

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри ММР

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:**

**«Обробка електричною дугою тіл обертання дротовим
електрод-інструментом»**

**«Electric arc treatment of bodies of revolution with a wire
electrode tool»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи ПМ-22М-2

спеціальності 131

«Прикладна механіка»,

_____ Слесарєв М. І.

Керівник проекту

канд. техн. наук, доцент

_____ Олег СІСА

Рецензент

канд. техн. наук, доцент

_____ Віктор ПУКАЛОВ

м. Кропивницький 2023/2024

Центральноукраїнський національний технічний університет

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
30 серпня 2023 р.

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
Слесарєву Максиму Ігоровичу**

1. Тема роботи: «Обробка електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом».
2. Керівник роботи: Сіса Олег Федорович, к. т. н., доцент.
3. Строк подання роботи до захисту: 21 січня 2024 р.
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи.
Мета: удосконалення способу електродугового різання дротовими електродами-інструментами шляхом застосування зворотного способу прокачування органічного середовища.
Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методику експериментальних досліджень; виконати експериментальні дослідження та провести аналіз отриманих результатів; виконати розрахунки з економічної частини.
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.	4.09.2023 р.	25.12.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	15.09.2023 р.	
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу	2.10.2023 р.	
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові	25.11.2023 р.	
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту	25.12.2023 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	22.01.2024 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	23.01.2024 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	26.01.2024 р.	

Дата видачі завдання
30 серпня 2023 р.

Підпис керівника

_____ О. Сіса

Завдання прийнято до виконання
30 серпня 2023 р.

Підпис здобувача

_____ М. Слесарєв

ЗМІСТ

ВСТУП		7
РОЗДІЛ 1.	ОБГРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ	11
	1.1. Аналіз сучасних способів обробки тіл обертання	11
	1.2. РОД як високопродуктивний спосіб обробки металів	14
	1.3. Узагальнення результатів огляду сучасних способів обробки тіл обертання та обґрунтуван- ня напрямку досліджень	27
РОЗДІЛ 2.	МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ	29
	2.1. Обґрунтування технологічної схеми формоутво- рення поверхні тіла обертання електричною ду- гою з використанням дротового електрод- інструмента	29
	2.2. Методика експериментального дослідження технологічних характеристик	31
	2.3. Експериментальне обладнання та оснащення	38
	2.4. Матеріали, зразки та вимірювальний інструмент..	40
	2.5. Техніка безпеки при експериментальному дослідженні	42
РОЗДІЛ 3.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ ТІЛ ОБЕРТАННЯ ДРОТОВИМ ЕЛЕКТРОД-ІНСТРУМЕНТОМ	44
	3.1. Продуктивність обробки	44
	3.2. Питома продуктивність обробки	48
	3.3. Питома витрата електроенергії	52
РОЗДІЛ 4.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ ТІЛ ОБЕРТАННЯ ДРОТОВИМ ЕЛЕКТРОД-ІНСТРУМЕНТОМ.....	57
	4.1. Шорсткість поверхні обробки	57
РОЗДІЛ 5.	ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	63
	5.1 Економічна ефективність процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом	63

ВИСНОВКИ	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71
ДОДАТКИ	74
Д1. Довідка про участь у науково-технічній конференції	75

АНОТАЦІЯ

Слесарев М. І. «Обробка електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом», спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Прикладна механіка», Центрально-український національний технічний університет, Кропивницький, 2024 рік.

Метою дослідження є підвищення точності процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом.

Запропоновано новий спосіб обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, та нова технологічна схема формоутворення поверхні. Формоутворення поверхні відбувається під дією електричної дуги яка збуджується в гідродинамічному потоці робочої рідини між електродом і заготовкою. Електрод-інструмент в зоні обробки протягується по поверхні електродотримача, а в цей час дуга збуджується між заготовкою і відбувається обробка. Запропонований спосіб дозволяє підвищити точність формоутворення поверхні з 14 до 9 квалітету. Отримані математичні моделі технологічних характеристик процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, які дозволяють прогнозувати їх та керувати продуктивністю обробки, питомою продуктивністю обробки, питомою витратою електроенергії, бічним міжелектродним зазором та шорсткістю обробленої поверхні. Показано, що найбільший вплив на шорсткість поверхні різку оказує сила технологічного струму, із підвищенням якої шорсткість поверхні збільшується. Описано механізм формування шорсткості поверхні після обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом. Формування поверхні відбувається послідовно за один прохід, або за декілька проходів. **електрична дуга, електрод-інструмент, технологія, гідродинамічний режим, обладнання**

ANNOTATION

M. I. Slesarev "Electric arc treatment of bodies of revolution with a wire electrode tool", specialty 131 "Applied Mechanics", OPP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of the study is to improve the accuracy of the process of processing bodies of rotation with an electric arc using a wire electrode tool.

A new method of electric arc processing of bodies of rotation with a wire electrode tool and a new technological scheme of surface shaping are proposed. The shaping of the surface occurs under the action of an electric arc that is excited in the hydrodynamic flow of the working fluid between the electrode and the workpiece. The electrode-tool in the processing zone is stretched over the surface of the electrode holder, and at this time the arc is excited between the workpiece and processing takes place. The proposed method makes it possible to increase the accuracy of surface shaping from 14 to 9 quality. Mathematical models of the technological characteristics of the process of electric arc processing of bodies of rotation with a wire electrode tool were obtained, which allow to predict them and control the processing productivity, specific processing productivity, specific power consumption, lateral interelectrode gap and roughness of the processed surface. It is shown that the greatest influence on the roughness of the cut surface is exerted by the strength of the technological current, with its increase the roughness of the surface increases.

The mechanism of formation of surface roughness after electric arc treatment of bodies of rotation with a wire electrode tool is described. The formation of the surface occurs sequentially in one pass or in several passes.

electric arc, electrode tool, technology, hydrodynamic mode, equipment

ВСТУП

Актуальність теми

В сучасному машинобудуванні для обробки тїл обертання широко застосовується токарна обробка, яка звичайно здійснюється рїзучим інструментом, зокрема рїзцем. Головний принцип механїчного рїзання: твердїсть рїзця повинна бути бїльша твердостї деталї, що оброблюється. Саме за цїєю причиною токарна обробка має суттєве обмеження в застосуванні при точінні заготовок із важкооброблюваних матерїалів.

В цьому напрямку електроерозійні методи зробили великі досягнення, які забезпечили обробку будь-якого електропровідного матерїалу поза залежністю від його фізико-хімічних властивостей несиловим(безконтактним) рїзанням. Відомо, що найбільш продуктивним способом електроерозійної обробки тїл обертання є електроконтактна обробка, при якїй електричну дугу в міжелектродному зазорї збуджують з поливом рїдини в зону обробки між електродом-заготовкою, яка обертається з відносно повільною швидкістю, і дисковим електродом-інструментом, окружна швидкість обертання якого досягає 30-50 м/с. Технологїчні можливостї способу електроконтактної обробки тїл обертання суттєво обмеженї великим діаметром електрода-інструмента та кїнематикою його обертання. При найкращих умовах електроконтактної обробки, об'ємний знос найбільш малозносного чавунного диску не зменшується нижче 3 – 10 %. З метою розширення технологїчних можливостей даного способу, професором Боковим В. М. запропоновано спосїб розмірної обробки дугою (РОД) для тїл обертання. Ідею є обробка малогабаритним електродом-інструментом, що не обертається. В процесї обробки графітовий електрод-інструмент може торкатися електрода-заготовки, що обертається, внаслідок чого відбувається абразивний знос,

який складає 10 – 20 %. При такому інтенсивному зносу електрода-інструмента, не вдається реалізувати точну обробку.

Запропоновано новий спосіб обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, який протягується в зоні обробки та таким чином «компенсує» його електроерозійний знос. Даний спосіб, за думкою автора, дозволить реалізувати точну обробку тіл обертання, але не був об'єктом дослідження.

Тому робота, що спрямована на підвищення точності процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, є актуальним науково-практичним завданням.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – підвищення точності процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз сучасних способів обробки тіл обертання;
- обґрунтувати і запропонувати нову технологічну схему формування поверхні тіла обертання електричною дугою з використанням дротового електрод-інструмента;
- розробити методикку експериментального дослідження технологічних характеристик процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом;
- виконати експериментальне дослідження продуктивності процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом;

- виконати експериментальне дослідження точності та якості процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є спосіб РОД тіл обертання. Предмет дослідження – спосіб обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Уперше розроблено теоретичні основи розмірного формотворення електричною дугою поверхні тіла обертання з використанням дротового електрод-інструмента: дротовий електрод-інструмент протягують в зоні обробки по опуклій поверхні електродотримача; електричну дугу збуджують між електродом-заготовкою, що обертається, та дротовим електродом-інструментом в поперечному потоці технічної води; процес реалізують без застосування слідкуючої системи. Це дозволяє підвищити точність та продуктивність обробки.

2. Уперше встановлено аналітичні зв'язки та виявлено вплив сили технологічного струму I та статичного тиску на вході робочої рідини в міжелектродний зазор $P_{ст}$ на технологічні характеристики процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, що визначають продуктивність M та питому продуктивність M_a обробки, питому витрату електроенергії a , бічний міжелектродний зазор δ_b та шорсткість обробленої поверхні Ra .

Практичне значення отриманих результатів

Отримані математичні моделі технологічних характеристик процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, які дозволяють прогнозувати їх та керувати продуктивністю обробки, питомою продуктивністю обробки, питомою витратою електроенергії, бічним міжелектродним зазором та шорсткістю обробленої поверхні.

Запропоновано, розроблено, виготовлено та випробувано експериментальний пристрій до токарного верстата для обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом.

Апробація результатів роботи

Основні положення та результати магістерської роботи повідомлені і обговорені на LVII науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти приуроченій «Дню науки – 2023» в ЦНТУ.

Публікації

За темою магістерської роботи опубліковано 1 друковану роботу у збірнику тез доповідей здобувачів вищої освіти LVII науково-технічної конференції, LIV науково-технічної конференції викладачів, аспірантів та співробітників «Наука в ЦНТУ основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2023» 20 квітня 2023 року.

Структура й обсяг роботи

Магістерська робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи 75 сторінки, в тому числі 20 рисунків і 9 таблиць, список використаних джерел з 20 найменувань та 1 додатку на 1 сторінці.

Розділ 1

**ОБГРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ
ДОСЛІДЖЕННЯ****1.1. Аналіз сучасних способів обробки тіл обертання**

В сучасному машинобудуванні для обробки тіл обертання широко застосовується *токарна обробка*, яка дозволяє обробляти деталі практично будь-яких розмірів, з заданою точністю обробки та якістю обробленої поверхні. Вона звичайно здійснюється на токарних верстатах ріжучим інструментом (рис. 1.1), зокрема різцем [1]. Головний принцип механічного різання: твердість різця повинна бути більша твердості деталі, що оброблюється. Саме за цією причиною токарна обробка має суттєве обмеження в застосуванні при точінні заготовок із важкооброблюваних матеріалів [2].

Значний прорив в цьому напрямку за останні роки зробили електроерозійні методи, які забезпечили несилове (безконтактне) різання і дозволили обробляти будь-який електропровідний матеріал поза залежністю від його фізико-хімічних властивостей, зокрема твердості.

Відомо, що найбільш продуктивним способом електроерозійної обробки тіл обертання є *електроконтактна обробка* (рис. 1.2), при якій електричну дугу в міжелектродному зазорі збуджують з поливом рідини в зону обробки між електродом-заготовкою, яка обертається з відносно повільною швидкістю, і дисковим електродом-інструментом, окружна швидкість обертання якого досягає 30-50 м/с [3]. Одна із причин необхідності обертання диску з великою окружною швидкістю обумовлена залежністю електроерозійного зносу металевого диску від швидкості обертання: чим більше швидкість, тим менше знос. Для забезпечення оптимальної технологічної швидкості електрода-інструмента діаметр

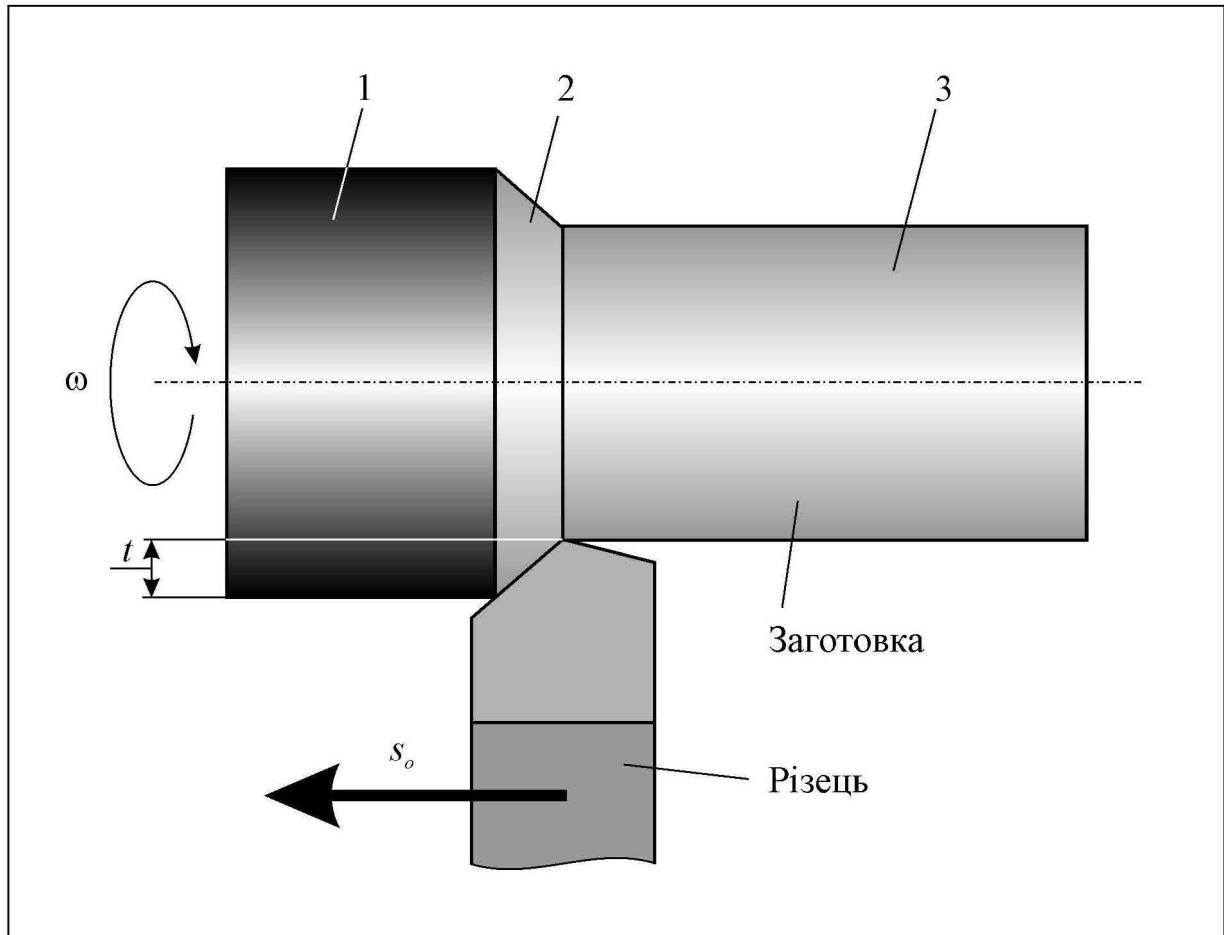


Рис. 1.1. Схема токарної обробки (операція точіння):

1 – оброблювана поверхонь;

2 – поверхонь різання;

3 – оброблена поверхонь

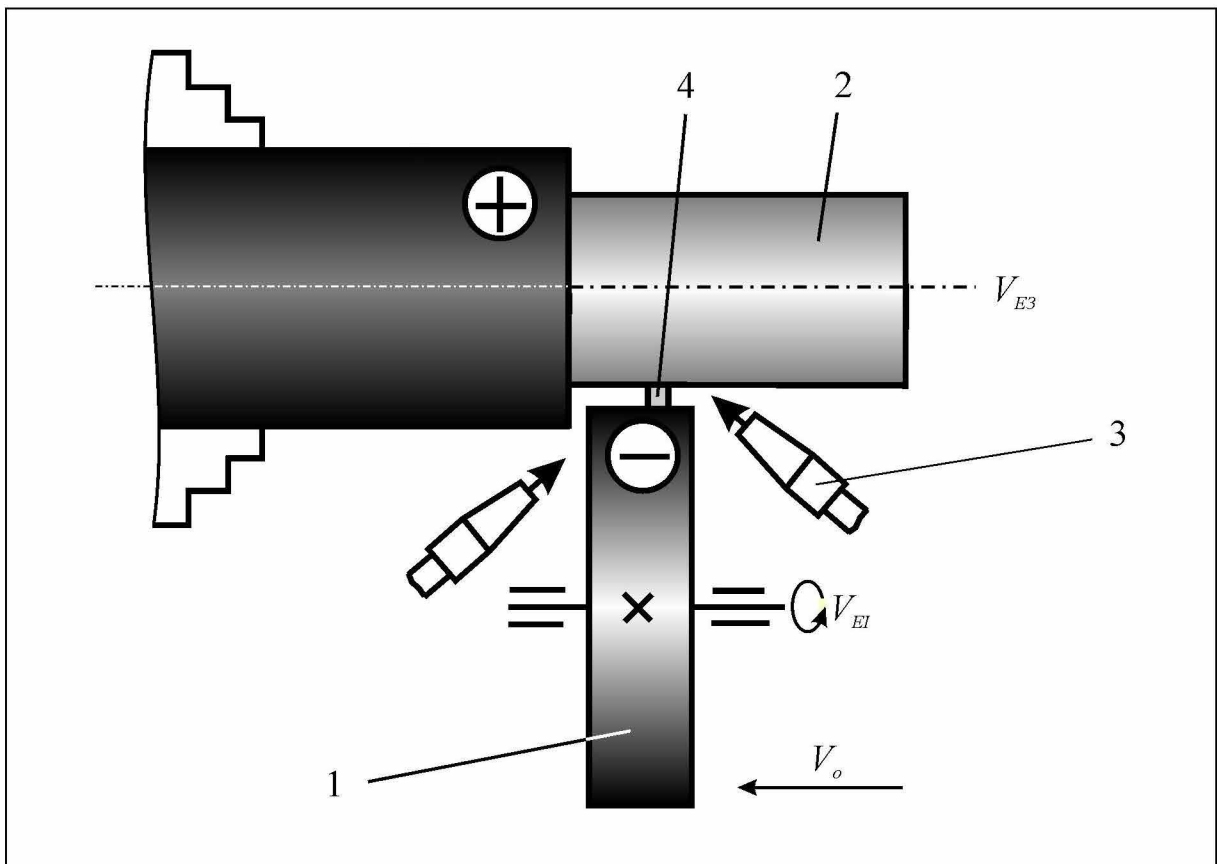


Рис. 1.2. Схема електроконтактної обробки тіл обертання:

- 1 – дисковий електрод-інструмент;**
- 2 – електрод-заготовка;**
- 3 – форсунка робочої рідини;**
- 4 – електрична дуга**

диску досягає розмірів 200 – 800 мм, а диск виготовляють із чавуну або сталі.

Технологічні можливості способу електроконтактної обробки тіл обертання суттєво обмежені великим діаметром електрода-інструмента та кінематикою його обертання. При найкращих умовах електроконтактної обробки, об'ємний знос найбільш малозносного чавунного диску не зменшується нижче 3 – 10 %.

Для компенсації електроерозійного зносу компанія AgieCharmilles [6] розробила *спосіб електроіскрової обробки тіл обертання з використанням в якості електрода-інструмента дроту* (рис. 1.3). Деталь обертають із швидкістю до 1500 хв^{-1} . Електричний іскровий розряд збуджують між дротом, який перемотується з однієї котушки на другу, та деталлю, що обробляється. Процес здійснюють із зануренням робочої зони у ванну з технічною водою. Спосіб забезпечує високу точність обробки та якість обробленої поверхні. Однак, внаслідок застосування нестационарної форми електричного розряду (наявності пауз: шпаруватість $q \gg 1$), та обмеженості в підведенні до дроту підвищеної сили технологічного струму (за допустимою густиною), продуктивність даного способу дуже мала, що негативно впливає на область його використання.

Тому, подальше удосконалення способу електроерозійної обробки поверхонь тіл обертання, з метою підвищення продуктивності обробки, пов'язано із використанням в якості джерела тепла електричної дуги, яка горить в міжелектродному проміжку, як відомо, без пауз (шпаруватість $q = 1$).

1.2. РОД як високопродуктивний спосіб обробки металів

Спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД) відомий по роботах [7, 8, 9, 10].

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

Порівняно з відомими способами електроерозійної обробки, заснованими на використанні нестаціонарного електричного розряду, процес РОД забезпечує такі переваги:

- значно більш високу продуктивність (в 5 – 10 разів і більше), що наближується до продуктивності обробки металів різанням;
- менші питомі витрати електроенергії (приблизно вдвічі), що помітно підвищує економічну ефективність процесу;
- джерела живлення технологічним струмом значно дешевші (в 3 – 5 разів), широко розповсюджені та загальнодоступні.

Продуктивність способу РОД насамперед залежить від сили струму, і при силі струму 1000 А та органічному робочому середовищі досягає:

- для сталі 45 – 25000 мм³/хв.;
- для титанового сплаву ВТ3-1 – 36000 мм³/хв.;
- для твердого сплаву ВК-15 – 3700 мм³/хв.

Як бачимо, продуктивність процесу РОД може в ряді випадків конкурувати з продуктивністю обробки відомих методів.

Вперше технологічну схему формоутворення поверхонь тіл обертання з використанням процесу РОД запропонував професор Боков В. М. [11]. В основу способу покладено обробку малогабаритним електродом-інструментом, що не обертається (рис. 1.4).

Сутність цього способу полягає в тому, що електричну дугу збуджують у між електродному зазорі між електродом-заготовкою, яка обертається, і електродом-інструментом, який має поступальні чи дискретні технологічні рухи осьової та радіальної подачі, під

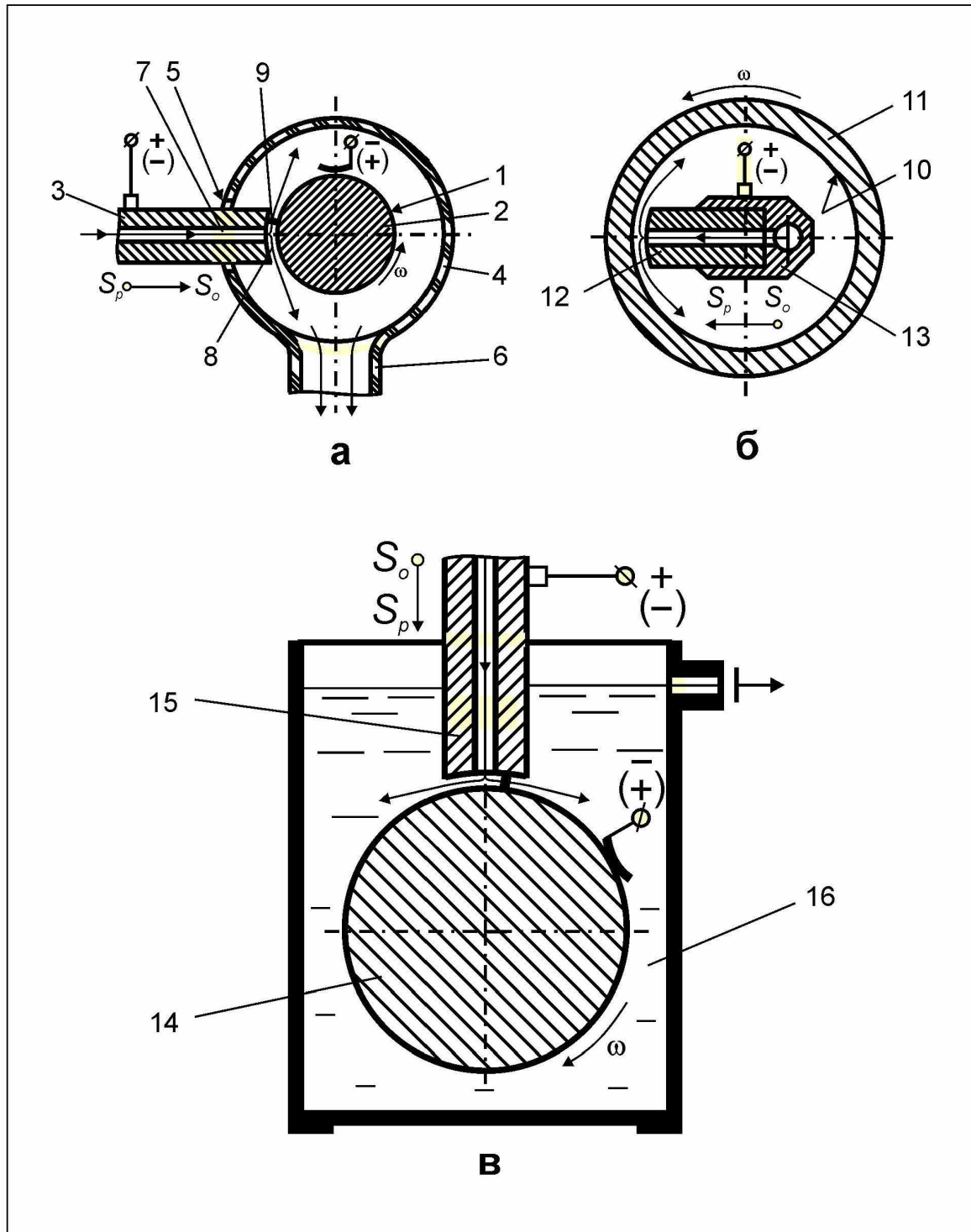


Рис. 1.4. Схема відомого способу РОД тіл обертання графітовим ЕІ, що не обертається: 1 – зовнішня поверхня; 2, 11, 14 – електрод-заготовка; 3, 12, 15 – електрод-інструмент; 4 – прозора камера; 5 – осьовий паз (отвір); 6 – патрубок; 7 – канал; 8 – потік; 9 – дуга; 10 – внутрішня поверхня; 13 – тримач; 16 – робоча рідина

технологічним тиском робочої рідини, що подається в МЕЗ крізь канал у ЕІ.

Для формоутворення зовнішньої поверхні 1 тіла обертання 2 (рис. 1.4, а) ЕІ 3 закріплюють, наприклад, у різцетримачі модернізованого токарного верстата замість різця з електроізоляцією від станини, а ЕЗ 2 – в трикулачковому патроні. До ЕЗ 2 підводять постійний технологічний струм за допомогою струмопідводу, що обертається. З метою забезпечення гідроізоляції оператора, зону обробки закривають прозорою камерою 4 з осьовим пазом для радіальної подачі S_p ЕІ і донним патрубком 6 для вилучення робочої рідини разом з продуктами ерозії електродів 2, 3. Крізь технологічний канал 7 нагнітають робочу рідину під технологічним тиском у МЕЗ 8, де збуджують електричну дугу 9. Таким чином, і при формоутворенні поверхні тіла обертання електрична дуга горить в торцевому МЕЗ в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини.

Для формоутворення внутрішньої поверхні 10 (операція розточування) тіла обертання 11 (рис. 1.4, б) короткий ЕІ 12 установлюють в компактному електродотримачу 13, який закріплюють в різцетримачі токарного верстата, а процес РОД здійснюють аналогічно.

В загальному випадку вибір режимів РОД обумовлено таким чином:

- тиск робочої рідини регулюють в межах від 0,05 до 10 МПа. Менші значення тиску застосовують при “м’яких” режимах обробки (невелика сила технологічного струму, велика швидкість обертання ЕЗ), а більші – при “жорстких” режимах обробки (велика сила технологічного струму, невелика швидкість обертання ЕЗ);

- силу технологічного струму регулюють у межах від 0,1 до 5000 А. Менші значення сили струму відповідають чистової малопродуктивної обробки (режим електроерозійного шліфування), а більші – чорнової високопродуктивної обробки;

- робочу напругу регулюють в межах від 20 до 100 В. Менші значення відповідають обробки з використанням великої сили технологічного струму, більші – малої;

- швидкість обертання ЕЗ регулюють у межах від 0,5 до 6000 обертів на хвилину. Менші значення швидкості відповідають обробки великогабаритних виробів і, як правило, на чорновому режимі (наприклад, обдирка литва), а великі – малогабаритних виробів на чистових режимах (наприклад, електроерозійне шліфування валів);

- радіальну подачу S_p ЕІ регулюють в межах від 0,01 до 0,5 мм. За умовами даного способу РОД тіл обертання, радіальна подача повинна бути завжди менша величини МЕЗ δ . Менші її значення відповідають чистової обробки, більші – чорнової;

- осьову подачу S_o ЕІ регулюють у межах від 0 до 200 мм на оберт. Нульове значення осьової подачі відповідає обробки із формоутворенням, як правило, фасонної поверхні ЕЗ, яка еквідистантна робочій поверхні ЕІ. Більші значення осьової подачі відповідають обробки великогабаритної ЕЗ при виконанні обдирних робіт із максимально можливою продуктивністю, а менші – малогабаритної ЕЗ.

Технологічні рухи осьової та радіальної подачі ЕІ можуть здійснюватися і в ручному і в автоматичному режимах.

При формоутворенні тіл обертання з застосуванням великої сили технологічного струму з'являється необхідність підвищення статичного тиску робочої рідини на вході в МЕЗ, з метою отримання певної якості обробленої поверхні. При цьому продукти ерозії, що являють собою розплавлений метал, під дією потужного гідродинамічного потоку, в струминному режимі та з великою швидкістю вилітають із МЕЗ, можуть пошкодити камеру 4 і тим самим створити небезпечні умови роботи оператора. Для забезпечення безпечних умов праці, а також локалізації електричної дуги в місцях виходу продуктів ерозії з МЕЗ, доцільно

обробку здійснювати з зануренням ЕЗ 14 та ЕІ 15 у робочу рідину 20 (рис. 1.4, в).

В загальному випадку при реалізації способу РОД тіл обертання може використовуватися в якості робочої рідини як органічне середовище, так і технічна вода. Нижче розглядаються фізико-технологічні особливості формоутворення поверхонь тіл обертання з використанням технічної води.

Предметом аналізу роботи [9] є технологічна схема формоутворення, яка застосовується при реалізації даного способу РОД тіл обертання (див. рис. 1.4, а). Вона характеризується зворотно-поступальним рухом ЕІ (осьовою подачею S_o) з періодичною його радіальною подачею S_p , обертальним рухом ЕЗ та однозонним способом прямого прокачування робочої рідини крізь торцевий МЕЗ. З використанням даної схеми процес обробки тіла обертання електричною дугою циліндричним ЕІ з центральним круглим отвором починається з приробки його робочої торцевої поверхні, яка відбувається в два етапи.

На першому етапі, при поступовому зближенню електродів 1, 2, перша дуга збуджується на периферійній частині торцевого МЕЗ у відповідності з принципом найменшої витрати енергії, тобто там, де швидкість робочої рідини мінімальна (рис. 1.5, а). Після обробки периферійної частини торцевої поверхні ЕІ дуга продовжується і при певній довжині гасне або переходить на ближню ділянку у напрямку від периферії до центру ЕІ (рис. 1.5, б). Перший етап приробки торцевої поверхні ЕІ закінчується, коли дуга досягає центральної частини ЕІ (рис. 1.5, в). Другий етап пов'язаний з формоутворенням торцевої поверхні в площині обертання ЕЗ (рис. 1.5, г). Електрична дуга після обробки центральної частини ЕІ поступово переміщується до його периферійної частини. Одночасно з цим відбувається еквідистантне заниження (обробка) приробленої на першому етапі поверхні ЕІ. Другий етап приробки торцевої поверхні ЕІ закінчується, коли форма досягає квазістаціонарного (незмін-

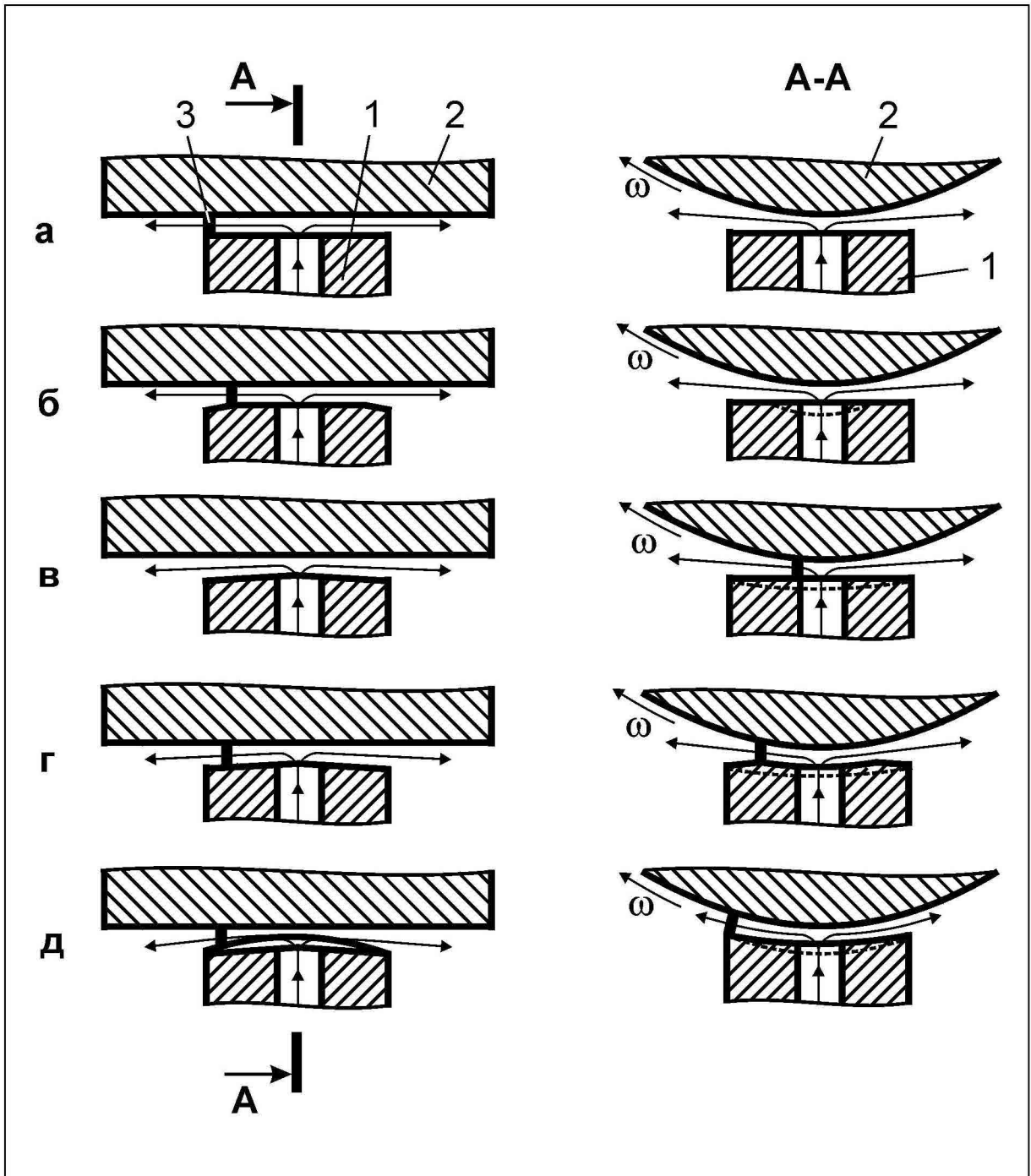


Рис. 1.5. Морфологія приробки торцевої поверхні циліндричного ЕІ з центральним круглим каналом до квазістаціонарного стану, при якому його відносний об'ємний знос $\gamma_0 = \text{const}$:

1 – ЕІ;

2 – ЕЗ;

3 – електрична дуга

ному у часі) стану, при якому електроерозійний знос ЕІ γ_i в будь-якій точці торцевої поверхні є постійний (рис. 1.5, д).

Встановлено, що при невеликих окружних швидкостях обертання ЕЗ (до 0,5 м/с) форма приробленої робочої поверхні ЕІ наближається до сідлоподібної і може бути апроксимована формою гіперболічного параболоїда, що описується відомим рівнянням [12, с. 251]

$$z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}. \quad (1.1)$$

При осьовому зворотно-поступальному русі ЕІ, який відповідає обробці циліндричної поверхні ЕЗ, останній виходе за межі робочого контакту з ЕЗ, а потім повертається. Для якісного формоутворення краю заготовки цей процес повинен відбуватися таким чином, щоб у будь-який момент часу електрична дуга горіла в МЕЗ в гідродинамічному потоці робочої рідини. Розглянемо нижче можливість виконання цієї умови.

В початковому положенні ЕІ 1 знаходиться за межами ЕЗ 2 на відстані МЕЗ δ_i (рис. 1.6, а), якій значно більше робочого торцевого зазору δ_m в центральній частині ЕІ. Електрична дуга не може виникнути між точками А і В без наявності в ньому продуктів ерозії від горіння дуги в центральній частині ЕІ, тобто без виконання тих умов, при яких поверхня ЕІ, що відповідає точці В, була попередньо сформована. Ця ж умова не виконується при наближенні осі ЕІ 1 до точки А ЕЗ 2 на відстань $l > 0$ (рис. 1.6, б). І лише при $l = 0$ виникає перша дуга 3, яка, як бачимо (рис. 1.6, в), горить в гідродинамічному потоці робочої рідини. Останній утворюється за рахунок часткового перекриття каналу в ЕІ електродом-заготовкою, що обробляється при усталеному процесі формоутворення циліндричної поверхні ЕЗ (рис. 1.6, г) електричні дуги в торцевому зазорі збуджуються у такій послідовності. Першою збуджується центральна дуга 4. Далі заго-

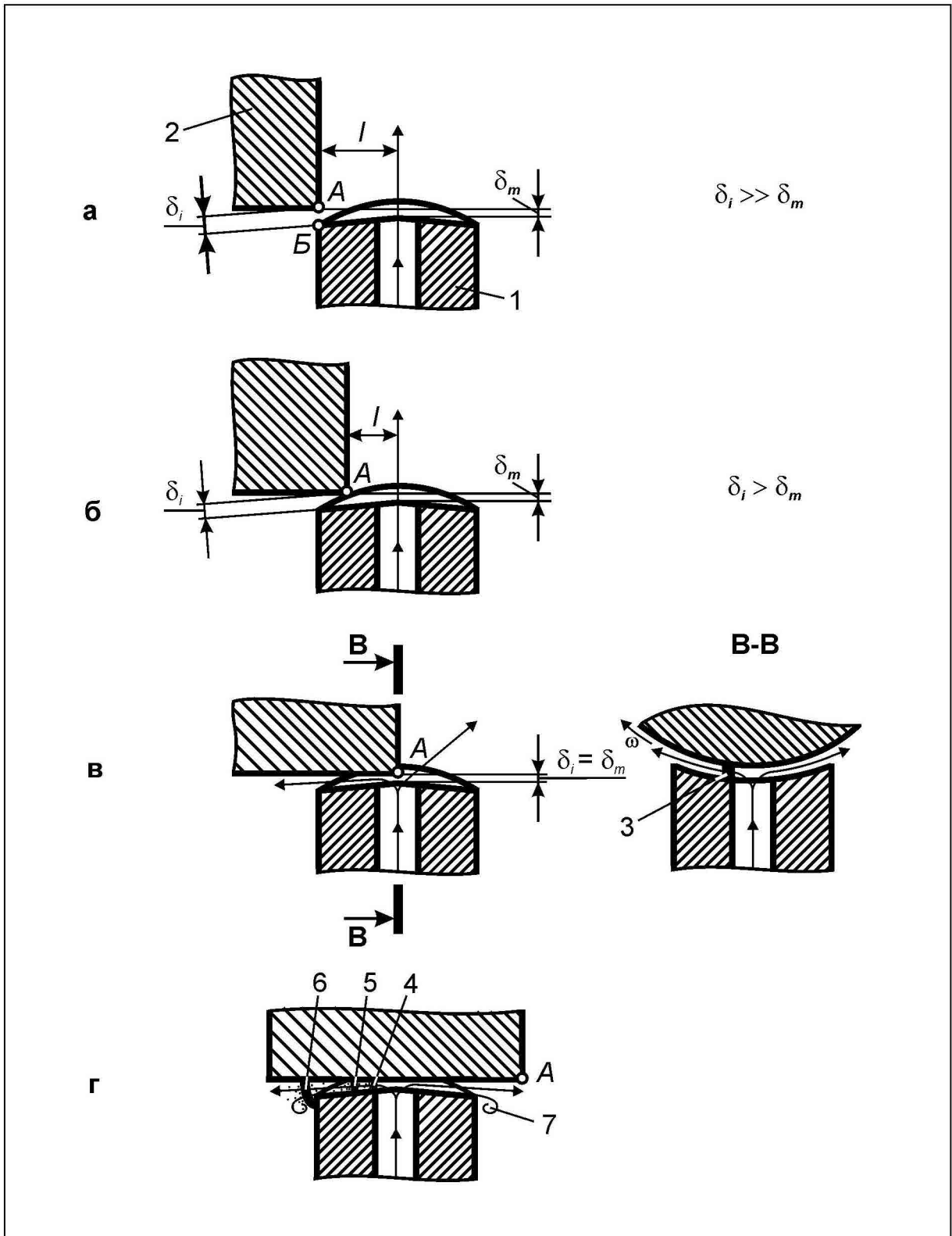


Рис. 1.6. Початкова фаза формоутворення електричною дугою краю циліндричної поверхні ЕЗ приробленим ЕІ: 1 – ЕІ; 2 – ЕЗ; 3...6 – електричні дуги; 7 – «застійна» зона

рається проміжна дуга 5, яка збуджується продуктами ерозії від горіння центральної дуги 4. Останньою загорається периферійна дуга 6, яка, в свою чергу, збуджується продуктами ерозії від горіння проміжної дуги 5. Таким чином, технологічна схема формоутворення 1.1BC дозволяє ЕІ виходити за край ЕЗ без побоювання, що в момент виходу може виникнути та пошкодити оброблювану поверхню ЕЗ не стиснута (довга, близька до зварювальної) електрична дуга в МЕЗ, де робоча рідина не прокачується, так як канал в ЕІ повністю відкритий (рис. 1.6, а, б).

Слід відмітити, що негативну властивість мають периферійні довгі дуги. По-перше, вони найменш стиснуті, бо отримані при значно меншій ніж біля центру швидкості потоку в МЕЗ, а тому оброблена ними поверхня відповідає найгіршій якості. Експериментальні дослідження показали, що при напрузі на електродах більше 20 В спостерігається збудження такої дуги 6 між поверхнею ЕЗ, що обробляється, та бічною поверхнею ЕІ (рис. 1.6, г), тобто на виході потоку з торцевого МЕЗ, там де швидкість потоку раптово зменшується і поблизу бічної поверхні ЕІ утворюється “застійна зона”. По-друге, саме вони відповідальні за світловий ефект, що негативно впливає на очі оператора..

З метою “приборкання” довгих дуг та усунення світлового ефекту пропонується виготовляти ЕІ з обмазкою (рис. 1.7). В якості обмазки доцільно застосовувати відомі суміші, що поширено використовуються для електродів при електрозварюванні, а також різні діелектричні матеріали, наприклад, гуму.

Прироблена за рахунок тертя об ЕЗ обмазка при зворотному прокачуванні (рис. 1.8) дозволяє підтримати швидкість робочої рідини на виході з торцевого МЕЗ на рівні швидкості рідини на периферійній частині МЕЗ і, тим самим, значно зменшити довжину дуги 4, що горить на периферії ЕІ. Звичайно, якість обробленою такою дугою поверхні тіла обертання покращується, а світловий ефект зникає.

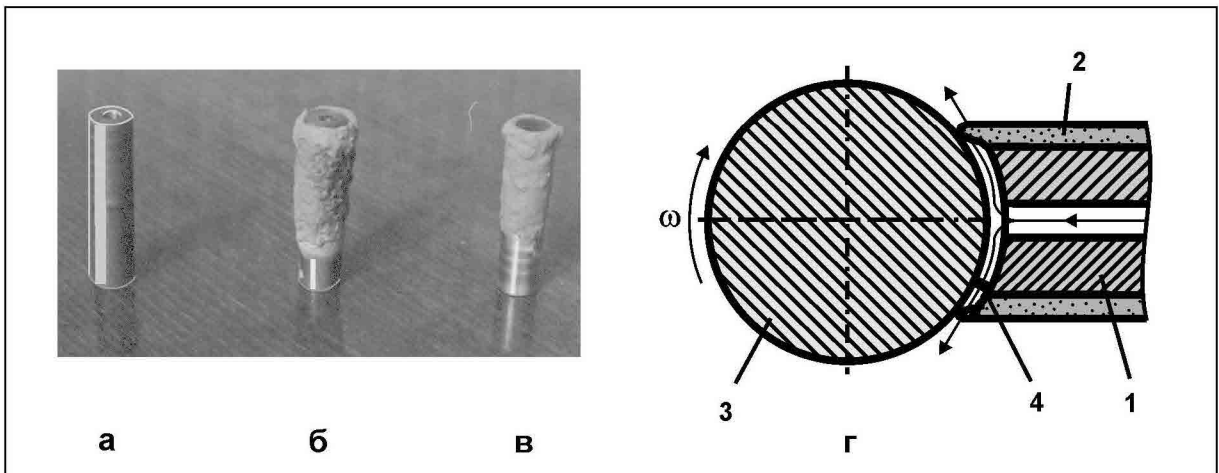


Рис. 1.7. Електроди для РОД тіл обертання та схема формоутворення циліндричної поверхні: а – чавунний ЕІ без обмазки; б – чавунний ЕІ з обмазкою; в – графітовий ЕІ в латунному тримачі з обмазкою; г – схема РОД поверхні з використанням ЕІ з обмазкою; 1 – ЕІ; 2 – обмазка; 3 – ЕЗ; 4 – електрична дуга

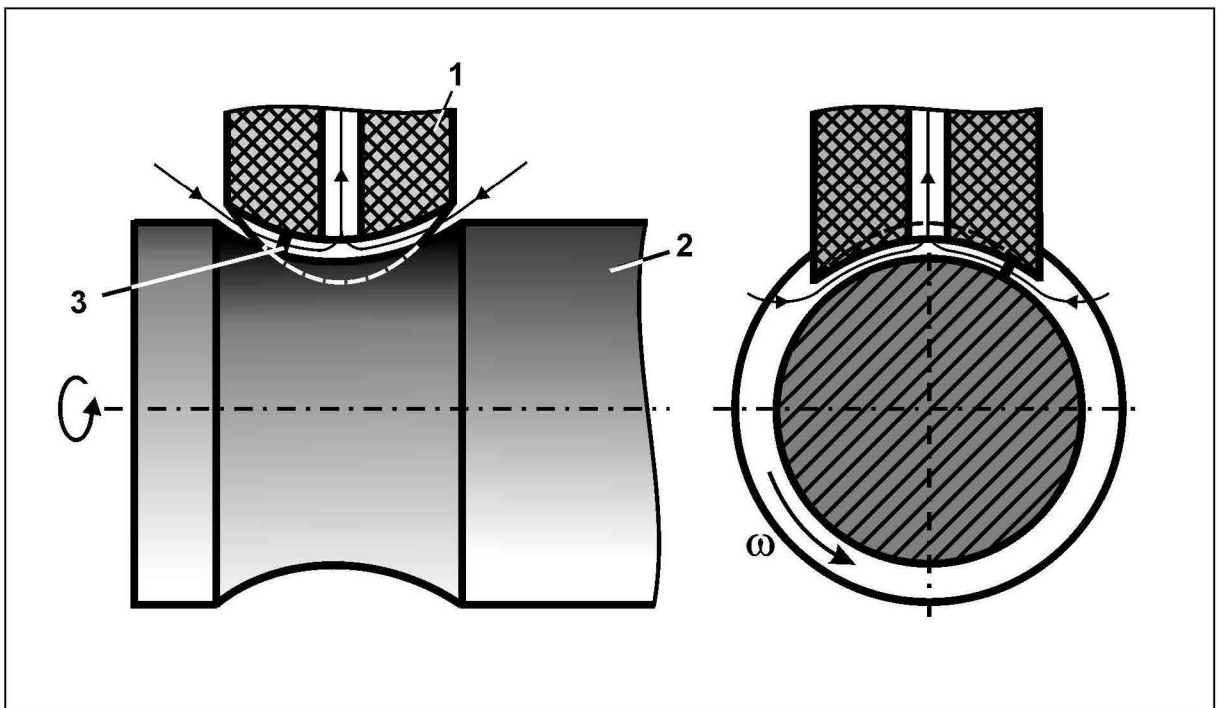


Рис. 1.8. Технологічна схема формоутворення зовнішньої поверхні тіла обертання способом РОД з використанням зворотного прокачування: 1 – ЕІ; 2 – ЕЗ; 3 – електрична дуга

Технологічна схема формоутворення тіл обертання способом РОД з використанням прямого прокачування відрізняється простотою реалізації, безнапірною камерою, дозволяє реалізувати процес обробки в ручному режимі, може бути реалізована на універсальному токарному верстаті шляхом використання простої за виконанням електроерозійної головки (рис. 1.9), а тому, на думку автора роботи [9], повинна набути широкого розповсюдження. Однак, отримання рівномірної шорсткості обробленої поверхні при її використанні обмежено градієнтом швидкостей потоку в радіальному напрямку торцевого МЕЗ, що є наслідком застосованого однозонного способу прямого прокачування. Крім того, нерівномірність шорсткості поверхні пов'язана із впливом кутової швидкості ω обертання ЕІ на форму епюри швидкостей потоку за висотою каналу на периферії МЕЗ та форму стовпа електричної дуги.



Рис. 1.9. Електроерозійна головка для РОД тіл обертання в дії на токарному верстаті

Значно більш рівномірну шорсткість обробленої поверхні тіла обертання можна отримати при використанні технологічної схеми формоутворення із застосуванням однозонного способу зворотного прокачування (рис. 1.8). Фізичний механізм формоутворення такої поверхні пов'язаний з можливістю горіння електричної дуги в торцевому МЕЗ при постійній швидкості потоку. Але дана схема потребує створення спеціального більш складного обладнання, де електроди, що рухаються, працюють в герметичній камері під технологічним тиском порядку 0,4...5 МПа.

Однак, при реалізації способу РОД тіл обертання графітовий електрод-інструмент може торкатися шорсткої поверхні електрода-заготовки, що обертається, внаслідок чого його лінійний абразивний знос може складати 10 – 20 %. Завдяки наявності інтенсивного зносу електрода-інструмента, цей недолік не дозволяє реалізувати точну обробку.

1.3. Узагальнення результатів огляду сучасних способів обробки тіл обертання та обґрунтування напрямку досліджень

Із викладеного вище витікає, що із усіх розглянутих способів обробки тіл обертання заслуговують на увагу лише два:

- високопродуктивний спосіб РОД, що використовує графітовий електрод-інструмент, але не забезпечує високу точність обробки у зв'язку з підвищеним абразивним зносом електрода-інструмента:

- високоточний спосіб електроіскрової обробки тіл обертання, що використовує дротовий електрод-інструмента, але не забезпечує високу продуктивність обробки.

Професор Боков В. М. та доцент Сіса О. Ф. об'єднали переваги даних способів, та запропонували новий спосіб РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента, який протягується в зоні

обробки і таким чином «компенсує» його електроерозійний знос [13]. Даний спосіб, за думкою авторів, дозволить реалізувати високопродуктивну і точну обробку тіл обертання, але не був об'єктом дослідження.

Саме тому, метою дослідження є підвищення точності процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз сучасних способів обробки тіл обертання;
- запропонувати та обґрунтувати нову технологічну схему формування поверхні тіла обертання електричною дугою з використанням дротового електрод-інструмента;
- розробити методику експериментального дослідження технологічних характеристик процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом;
- виконати експериментальне дослідження продуктивності процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом;
- виконати експериментальне дослідження точності та якості процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом.

Розділ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ**2.1. Обґрунтування технологічної схеми формоутворення
поверхні тіла обертання електричною дугою з
використанням дротового електрод-інструмента**

В способі обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, що пропонується, використовується нова технологічна схема формоутворення (рис. 2.1). В гідродинамічному потоці робочої рідини збуджують електричну дугу між електродом і заготовкою. Збудження відбувається між електрод-заготовкою яка обертається і електрод-інструментом дротовим. Дротовий електрод-інструмент протягують в зоні обробки по поверхні електродотримача, який перпендикулярний вісі заготовки, яка обертається. Сам процес здійснюють без можливого контакту електрод-інструмента з заготовкою і без застосування слідкуючої системи подачі електрода з гарантованим зазором між заготовкою і електрод-інструментом.

Даний спосіб здійснюють застосовуючи пристрій (рис. 2.1), який монтується на токарному верстаті модернізованому. Закріплюють в трьохкулачковому патроні електрод-заготовку 1 і обертають. Електричну дугу 3 від джерела живлення 2 постійного електричного струму, збуджують в гідродинамічному поперечному потоці робочої рідини 4. Збудження дуги відбувається між електрод-заготовкою 1 та дротовим (діаметром d) електрод-інструментом 5, який протягуються в зоні обробки по поверхні 6 електродотримача 7 в площині, що перпендикулярна осі обертання 8 електрода-заготовки 1. Сам процес здійснюють при гарантованому зазорі Z між поверхнею 9 електрод-заготовки 1 та електрод-інструмента 5, без контакту між заготовкою 1 та інструментом 5.

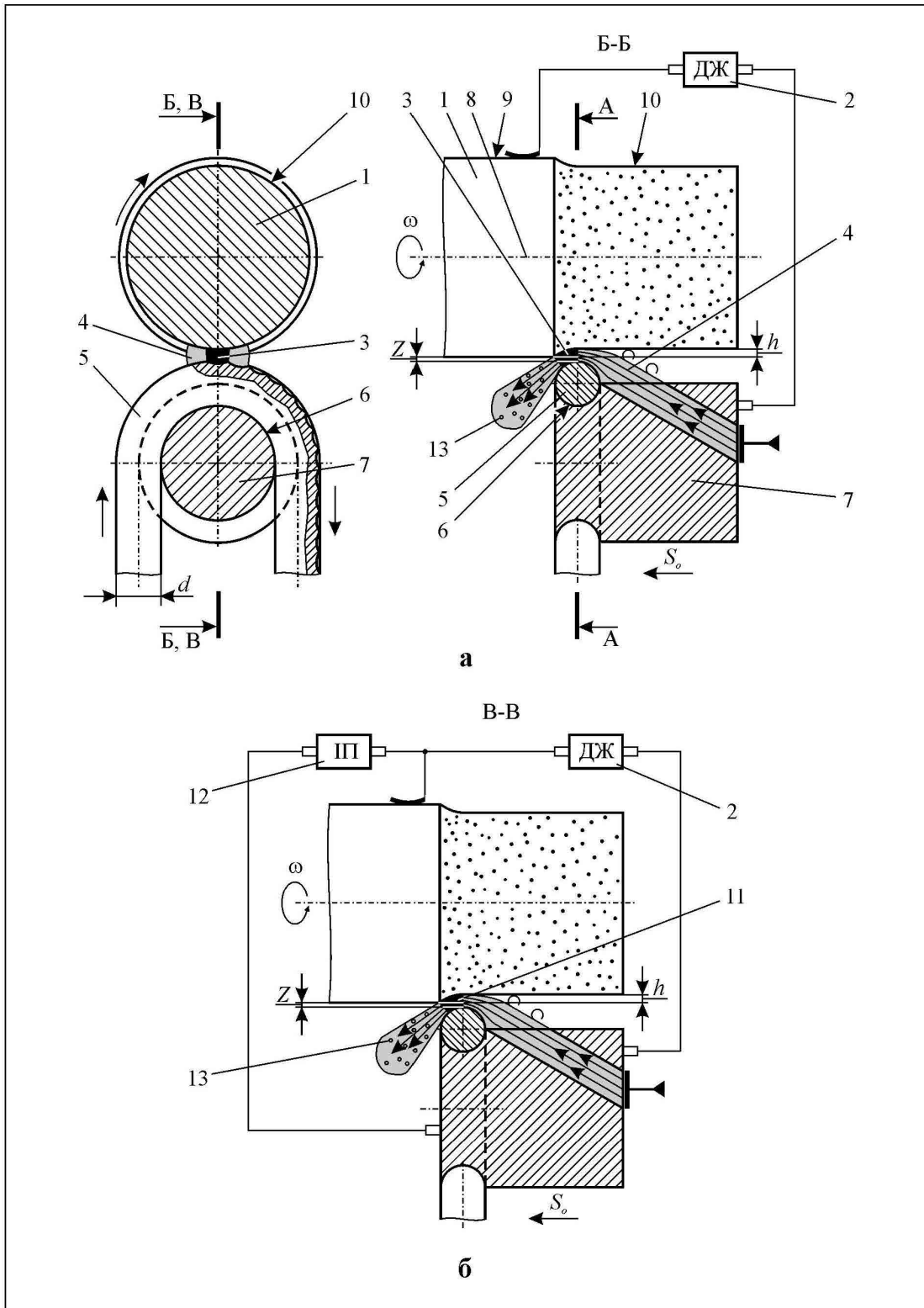


Рис. 2.1. Пристрій для реалізації технологічної схеми формоутворення поверхні тіла обертання електричною дугою з використанням дротового електрода-інструмента: а – без імпульсного підпалювача дуги; б – з імпульсним підпалювачем дуги

При постійній осьовій подачі S_o , без слідкуючої подачі електрод-інструмента 5, здійснюється процес обробки і формоутворення циліндричної поверхні 10. Це забезпечує підвищення точності формоутворення циліндричної поверхні 10, створення рівномірної шорсткості поверхні 10, також для деталей великого діаметра і розміру, які виготовлені із міцних зносостійких матеріалів.

Обробку важкооброблюваних матеріалів з великим електричним опором потрібно робити з високовольтним імпульсним підпаловачем 12, для ініціювання електричної дуги 11 тому, щоб забезпечити гарантований зазор $Z = 0,01 \dots 0,03$ мм.

З метою усунення можливості розбризкування робочої рідини на виході із міжелектродного зазору, організації збирання продуктів ерозії 13 та покращення умов роботи оператора, обробку здійснюють із зануренням робочої зони в ванну з робочою рідиною (на рисунку не показано).

Використання способу, що пропонується, порівняно з відомим, дозволить підвищити точність формоутворення поверхні з 14 до 9 якості.

2.2. Методика експериментального дослідження технологічних характеристик

2.2.1. Прийняття рішень перед плануванням експерименту [14].

На підставі інформації було вибрано чотири фактори, які повинні впливати на технологічні характеристики процесу електродугового різання (табл. 2.1):

- сила технологічного струму $I (X_1)$, А;
- статичний тиск робочої рідини на вході в зазор $P_{cm} (X_2)$, МПа;
- діаметр вихідної ЕЗ $D (X_3)$, мм;
- число обертів шпинделя $n_w (X_4)$, хв.⁻¹.

Таблиця 2.1

Матриця планування експерименту (план 2^{4-1})

Фактори		I , А	$P_{ств}$, МПа	D , мм	$n_{ш}$, $хв^{-1}$	M , мм ³ /хв	$M_{ш}$, мм ³ /А·хв	a , кВт·год/ кг	Ra , мкм		
Основний рівень		100	0,8	15	35						
Інтервал варіювання		50	0,2	5	25						
Верхній рівень		150	1,0	20	60						
Нижній рівень		50	0,6	10	10						
Код		x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_3	y_4	y_6		
Номер досліду	1	Порядок реалізації	6	+	+	+	+	292	1,91	33,02	28
	2		2	-	+	+	-	199	3,99	16,12	14
	3		4	+	-	+	-	330	2,26	29,92	38
	4		7	-	-	+	+	140	2,78	22,11	12
	5		1	+	+	-	-	318	2,15	29,53	42
	6		8	-	+	-	+	105	2,16	29,82	6,3
	7		3	+	-	-	+	323	2,17	29,33	40
	8		5	-	-	-	-	124	2,49	25,15	8,0
Досліди в центрі плану	1	0	0	0	0	222	2,22	28,69	25		
	2	0	0	0	0	219	2,19	29,08	24		
	3	0	0	0	0	234	2,34	27,22	26		
	4	0	0	0	0	240	2,40	26,54	25		

Усі вибрані фактори задовольняють умовам керованості, операціональності та однозначності.

Інші параметри процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом були зафіксовані на наступних постійних рівнях:

- напруга на електродах $U = 30$ В;
- робоча рідина: вода технічна;
- діаметр дроту 0,8 мм;
- полярність обробки – пряма (зразок – «плюс»);
- осьова подача ЕІ $s_o = 0,4$ мм/об.

Після експерименту розраховувалися або вимірялися технологічні характеристики процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом.

Так, продуктивність обробки M , мм³/хв., розраховували за формулою:

$$M = \frac{(m_{\text{до}} - m_{\text{після}}) \cdot 60}{t \cdot \gamma}, \quad (2.1)$$

де:

$m_{\text{до}}, m_{\text{після}}$ – маса заготовки, відповідно, до та після експерименту, г;

t – час обробки, с;

γ – густина сталеві заготовки. $\gamma = 0,00785$ г/мм³.

Питому продуктивність обробки M_a , мм³/А·хв., визначали за формулою:

$$M_a = \frac{M}{I}, \quad (2.2)$$

де:

M – продуктивність обробки, мм³/А·хв.;

I – сила технологічного струму, А.

Питому витрату електроенергії a , кВт·год/кг, визначали за формулою:

$$a = \frac{I \cdot U \cdot t}{3600 \cdot (m_{\text{до}} - m_{\text{після}})}, \quad (2.3)$$

де:

I – сила струму, А;

U – напруга, В;

t – час обробки, год.;

F_k – площа кільцевої поверхні ЕЗ, що обробляється за один прохід ЕІ, см²;

l – довжина ділянки ЕЗ, що обробляється, см;

ρ – густина матеріалу, що обробляється, кг/см³.

Міжелектродний зазор (МЕЗ) δ_6 , мм, якісно оцінювали за формулою 2.4 (рис. 2.2), але в матрицю планування експерименту не вводили:

$$\delta = w + \Delta, \quad (2.4)$$

де:

w – величина гарантованого зазору між дротовим ЕІ та ЕЗ, мм. Вона повинна бути мінімальною. Тому реально $w = 0,01$ мм;

Δ - товщина шару метала, що знімається за один прохід ЕІ, мм

$$\Delta = \frac{D-d}{2}. \quad (2.5)$$

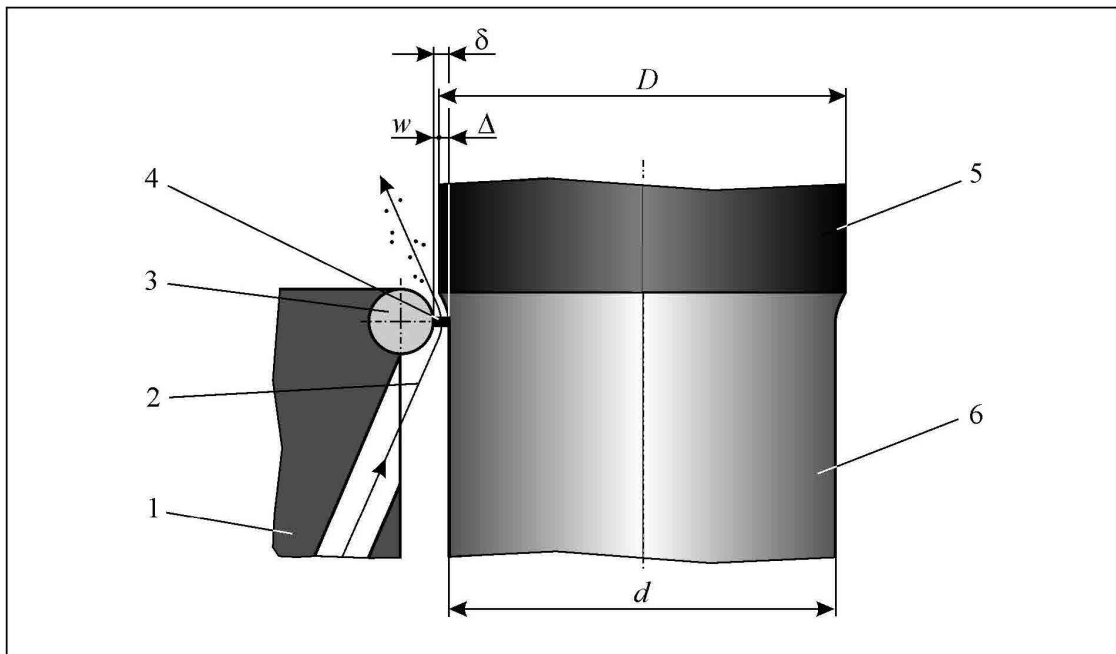


Рис. 2.2. До розрахунку міжелектродного зазору δ : 1 – електродотримач; 2 – потік робочої рідини; 3 – дротовий ЕІ; 4 – електрична дуга; 5 – вихідна поверхонь ЕЗ; 6 – оброблена поверхонь ЕЗ за один прохід ЕІ

В рамках експерименту МЕЗ змінювався у межах від 0,1 до 0,15 мм.

Шорсткість обробленої поверхні Ra , мкм, оцінювали за зразками електроерозійної шорсткості.

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:

$$x_1 = \frac{X_1 - 100}{50}; \quad (2.6)$$

$$x_2 = \frac{X_2 - 0,8}{0,2}; \quad (2.7)$$

$$x_3 = \frac{X_3 - 15}{5}; \quad (2.8)$$

$$x_4 = \frac{X_4 - 35}{25}. \quad (2.9)$$

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

$$N = P^k = 2^4 = 16. \quad (2.10)$$

Задача зводиться до будування лінійної математичної моделі вигляду

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i, \quad (2.11)$$

де b_0, b_i - коефіцієнти регресії моделі.

Відповідно до вибраного плану (2^{4-1}) 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 технологічної характеристики процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротом електрод-інструментом

- розраховуємо дисперсію дослідів за формулою [15, с. 13]

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_{0q} - \bar{y}_0)^2}{f_1}, \quad (2.12)$$

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

$$f_1 = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3. \quad (2.13)$$

- розраховуємо коефіцієнти регресії моделі за формулою [15, с. 14]

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u}{N}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (2.14)$$

де N - число дослідів. $N = 4$;

- перевіряємо статистичну значимість коефіцієнтів регресії.

Перевірка містить розрахунок дисперсії оцінок, який виконуємо з використанням формули [15, с. 14]

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad (2.15)$$

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

$$\Delta b_i = t_{\alpha, f} S_{b_i}. \quad (2.16)$$

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

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

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4; \quad (2.17)$$

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

$$t^{розр} = \frac{|b_0 - \bar{y}_0| \sqrt{N}}{S_y}. \quad (2.18)$$

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

2.3. Експериментальне обладнання та оснащення

Для дослідження технологічних характеристик процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом використовувався універсальний токарний верстат (рис. 2.2), який був модернізований. Замість різцетримача на його місце був встановлений експериментальний пристрій (рис. 2.3).

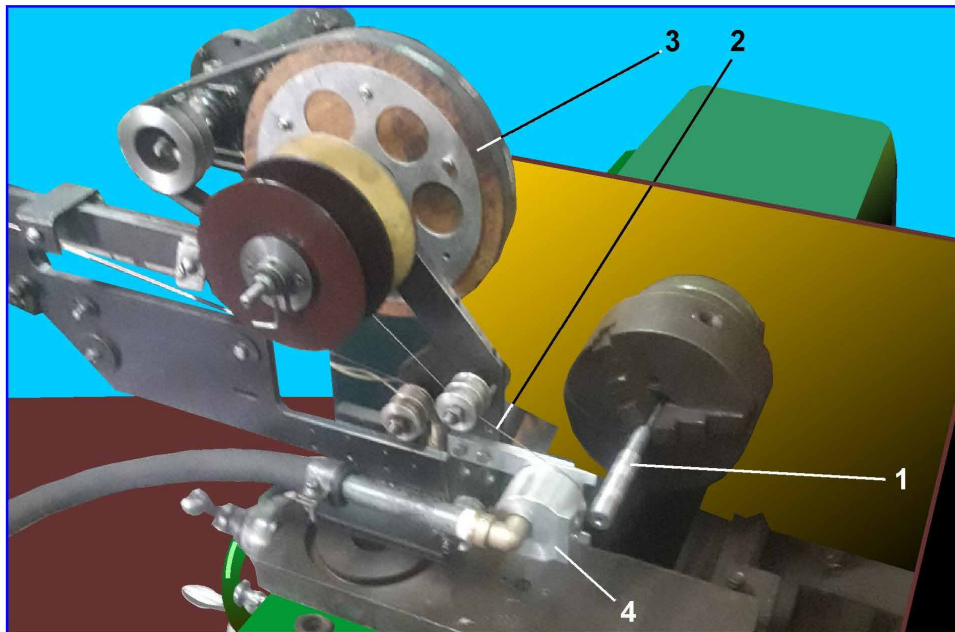


Рис. 2.3. Експериментальний пристрій для обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом: 1 – електрод-заготовка; 2 – дротовий електрод-інструмент; 3 – механізм перемотування дроту; 4 – інструментальна головка

Пристрій для обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом (рис. 2.4) включає в себе наступні основні деталі:

- електродотримач 1, де в пазу протягується дріт. Перемотування дріту відбувається спеціальним механізмом – електродвигуном з редуктором;

- планка 2 в якій є фігурна щілина для кумулятивного підведення робочої рідини у зону обробки;
- напрямляч 3 для забезпечення заведення дроту в паз електродотримача 1;
- тримач 4 для кріплення інструментальної головки до станини експериментального пристрою.

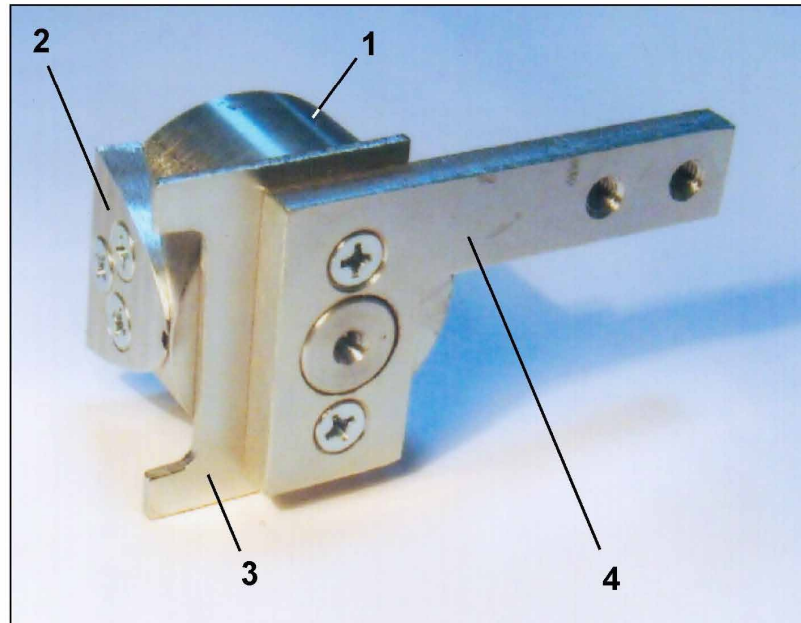


Рис. 2.4. Інструментальна головка пристрою для обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом: 1 – тримач дроту; 2 – планка для створення кумулятивного потоку; 3 – напрямляч дроту; 4 – тримач, що приєднує

Робота пристрою полягає у наступному: спочатку заготовку закріплюють у патроні токарного верстата; інструментальну головку підводять до заготовки на відстань не менше 1 мм.; вмикають привод обертання заготовки, механізм протягування дроту та привод подачі робочої рідини. Виставляють мінімальну силу струму на джерелі живлення технологічного струму. За допомогою супорта радіальної подачі повільно зближують дріт інструментальної головки з заготовкою до появи першого розряду. Виставляють технологічні режими обробки (I , $P_{ст}$, $n_{ш}$, s_o) і ведуть

процес точіння електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом. При перемотуванні дроту під час обробки постійно відбувається оновлення поверхні електрода-інструмента, завдяки чому точність обробки зростає.

2.4. Матеріали, зразки та вимірювальний інструмент

В якості електрода-інструмента використовувався зварювальний сталевий дріт діаметром 0,8 мм з мідним покриттям.

Зразки (електроди-заготовки) діаметром 10, 15 та 20 мм, довжиною 90 мм, виготовлялися із сталі 45 (рис. 2.5).

В якості контрольно-вимірювальних приборів та інструмента застосовувалися:

- для керування силою струму: амперметр з діапазоном вимірювання 0 – 50 А;
- для контролю напруги: вольтметр типу М4200;
- 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; електронний штангенциркуль типу ШЦЦ-І-125-0,01 із ціною поділки 0,01 мм;

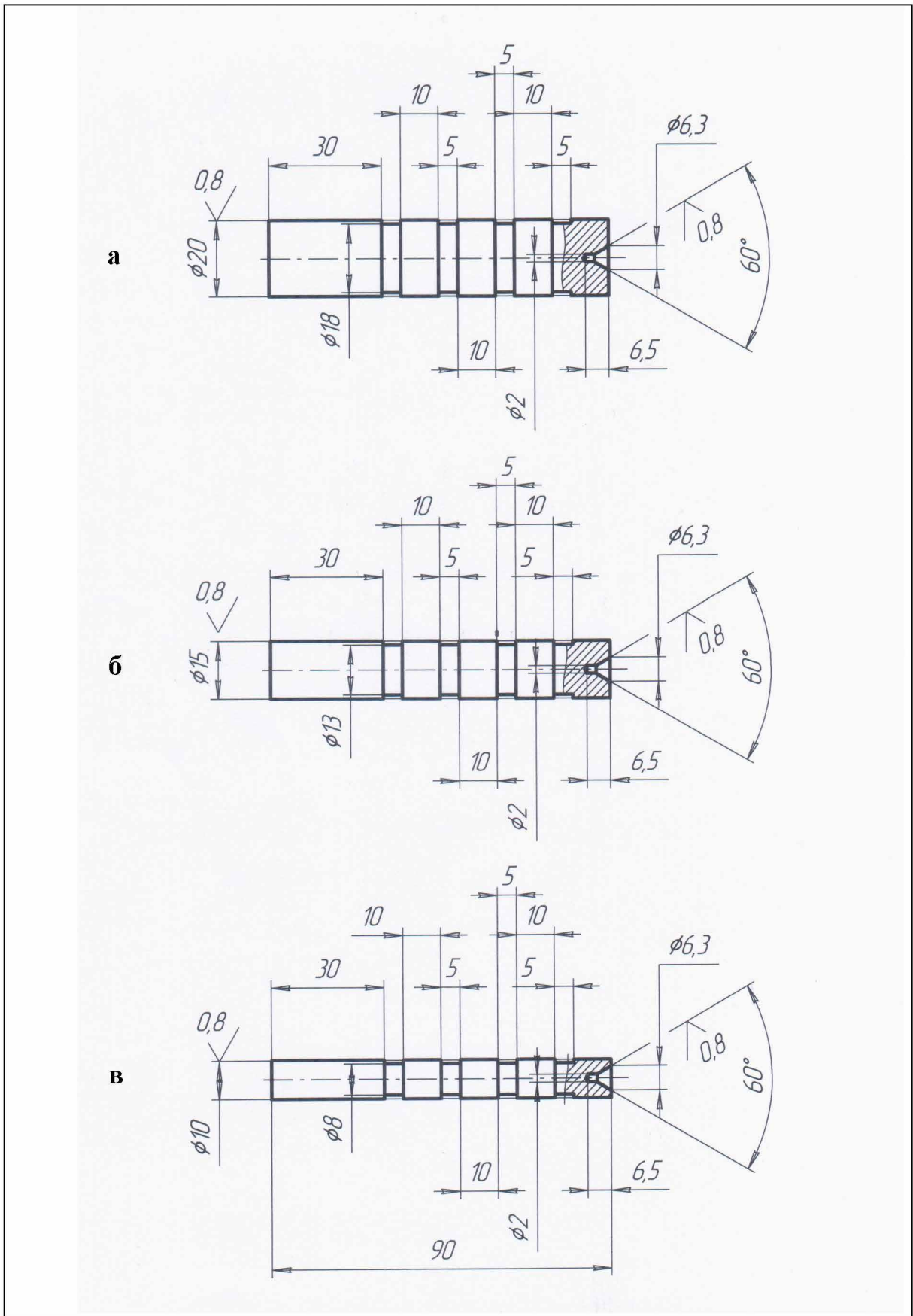


Рис. 2.5. Електроди-інструменти для експериментальних досліджень процесу РОД тіл обертання: а – $\text{Ø } 20$ мм; б – $\text{Ø } 15$ мм; в - $\text{Ø } 10$ мм

- для вимірювання шорсткості поверхні після РОД: еталони електроерозійної шорсткості;
- для точного зважування електродів-заготовок до та після РОД: ваги типу ВЛКТ-500г-М ГОСТ 19491-74 з ціною поділки 0,01 г;
- для вимірювання числа обертів шпинделя в хвилину було використано тахометр типу ТЧ10-Р з ціною поділки 10 хв.⁻¹ (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Тахометр типу ТЧ10-Р для вимірювання швидкості обертання шпинделя на токарному верстаті

2.5. Техніка безпеки при експериментальному дослідженні

Електроерозійні верстати, електроерозійні пристрої та прилади повинні експлуатуватися у суворій відповідальності з вимогами техніки безпеки. При порушенні цих вимог може створитися небезпека ураження електричним струмом, отримання опіків, отруєння газоподібними продуктами, також травмування рухомими деталями та вузлами верстата чи пристрою. До роботи, під час дослідів на електроерозійних верстатах та пристроях допускаються особи, що пройшли медогляд, спеціальне навчання та інструктаж. Робота на верстаті та оснащені, або його ремонт дозволяється тільки тоді коли в приміщенні лабораторії де знаходиться верстат або пристрої. Знаходиться не менше двох чоловік, які можуть

надати один одному допомогу. На робочому місці біля верстата повинен обов'язково знаходитися електроізоляційний килимок під ноги. Під час роботи не дозволяється торкатися струмопровідних частин (електрода, електродотримача, катушок з дротом тощо).

Налагодження, установа заготовки, інструменту необхідно робити після того як джерело технологічного струму вимкнено. Забороняється знімати або відкривати запобіжні щитки під час роботи верстата чи пристрою. По завершенню роботи, або при проведенні налагоджувальних робіт, верстат та пристрої повинні бути відключені від електричної мережі.

При роботі на верстатах чи пристроях, під час розмірної обробки електричною дугою, у якості робочого середовища може застосовуватися горючі речовини, тому необхідно дотримуватися правил протипожежної безпеки. Обов'язково поблизу верстата необхідно мати вуглекислотний вогнегасник. Неприпустимо знаходитися біля верстата чи пристрою під час дослідів у промасленому одязі, палити, зберігати обтиральний матеріал, або ємності з горючо-мастильними матеріалами.

Досліднику забороняється відлучатися від верстата, під час роботи. В приміщенні обов'язково повинна бути система вентиляції, яка під час роботи не дозволяє накопичуванню в атмосфері дослідницької ділянки шкідливих речовин. Для дослідження технологічних характеристик процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом застосовувався універсальний токарний верстат. На місце різцетримача був встановлений експериментальний пристрій. В якості робочої рідини використовувалася технічна вода. Тому даний верстат більш безпечний, порівняно з електроерозійними верстатами, що використовують в якості робочої рідини органічне середовище. Але правила електробезпеки у них однакові.

Розділ 3

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ
ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ ТІЛ ОБЕРТАННЯ
ДРОТОВИМ ЕЛЕКТРОД-ІНСТРУМЕНТОМ**

3.1. Продуктивність обробки**3.1.1. Розрахунок дисперсії досліду**

Розрахунок дисперсії досліду здійснюємо за формулою (2.12). Дані для розрахунку вносимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

Дані для розрахунку дисперсії досліду

Номер дубля	y_{0q}	$\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	Δy^2
1	222	6,75	45,56
2	219	9,75	95,06
3	234	5,25	27,56
4	222	6,75	45,56
	$\bar{y}_0 = 228,75$		$\sum \Delta y^2 = 294,75$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{294,75}{3} = 98,25$$

і відповідно

$$S_y = 9,91.$$

3.1.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14):

$$b_0 = \frac{1}{8}(292 + 198 + 331 + 140 + 318 + 105 + 323 + 124) = 228,88;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(292 - 198 + 331 - 140 + 318 - 105 + 323 - 124) = 87,13;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(292 + 198 - 331 - 140 + 318 + 105 - 323 - 124) = -0,63;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(292 + 198 + 331 + 140 - 318 - 105 - 323 - 124) = 11,38;$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(292 - 198 - 331 + 140 - 318 + 105 + 323 - 124) = -13,88.$$

3.1.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.15):

$$S_{b_i}^2 = \frac{98,33}{8} = 12,28,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 3,50.$$

3.1.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.16):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 3,50 = 11,13.$$

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

3.1.5. Будування математичної моделі продуктивності обробки

Рівняння регресії y_1 набуде вигляду:

$$y_1 = 228,88 + 87,13x_1 - 13,88x_4.$$

(3.1)

Математична модель продуктивності обробки M електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, що побудована з урахуванням залежностей (2.6) – (2.9), набуде вигляду:

$$M = 76,89 + 1,98 \cdot I - 0,65 \cdot n_{ш}.$$

(3.2)

3.1.6. Перевірка гіпотези про адекватність моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.18):

$$t^{розр} = \frac{(228,88 - 228,75)\sqrt{8}}{9,91} = 0,04.$$

Оскільки $0,04 < 3,18$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.1.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів на продуктивність обробки M електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом показано на рис. 3.1, а.

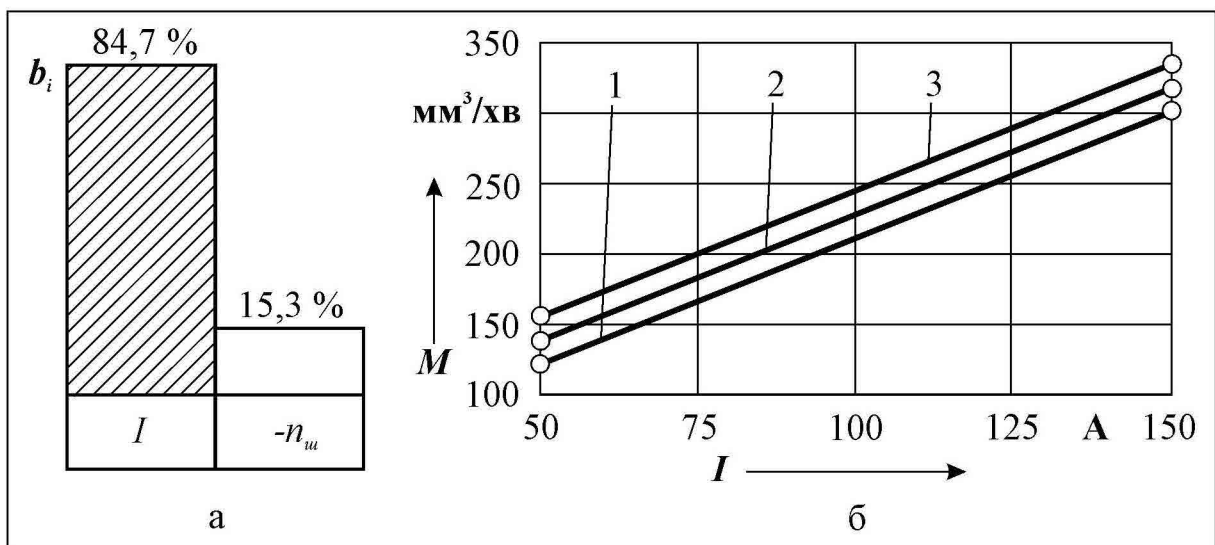


Рис. 3.1. Ступінь впливу факторів (а) та залежність продуктивності обробки M від I та n_m (б): 1 – $n_m = 60 \text{ хв}^{-1}$; 2 – $n_m = 35 \text{ хв}^{-1}$; 3 – $n_m = 10 \text{ хв}^{-1}$

Як бачимо, найбільший вплив на M впливає сила технологічного струму I , де із підвищенням сили технологічного струму I продуктивність

обробки збільшується, це підтверджує теплову природу РОД. Сила технологічного струму є основний керуючий фактор.

Число обертів шпинделя $n_{ш}$ менше впливає, але є суттєвим значенням., коли число обертів шпинделя $n_{ш}$ підвищується то продуктивність зменшується.

На рис. 3.1,б представлена залежність $M = f(I, n_{ш})$, яка демонструє вплив факторів на продуктивність обробки у вибраному факторному просторі їх зміни.

Продуктивність обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом в рамках експерименту змінювалася у межах від 105 до 331 мм³/хв.

3.2. Питома продуктивність обробки

3.2.1. Розрахунок дисперсії дослідів

Розрахунок дисперсії дослідів здійснювали за формулою (2.12). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Дані для розрахунку дисперсії дослідів

Номер дубля	y_{0q}	$\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	Δy^2
1	2,22	0,07	0,0049
2	2,19	0,10	0,0100
3	2,34	0,05	0,0025
4	2,40	0,11	0,0121
	$\bar{y}_0 = 2,29$		$\sum \Delta y^2 = 0,0295$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,0295}{3} = 0,00983,$$

ВІДПОВІДНО

$$S_y = 0,0992.$$

3.2.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14):

$$b_0 = \frac{1}{8}(1,91 + 3,99 + 2,26 + 2,78 + 2,15 + 2,16 + 2,17 + 2,49) = 2,489;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(1,91 - 3,99 + 2,26 - 2,78 + 2,15 - 2,16 + 2,17 - 2,49) = -0,366;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(1,91 + 3,99 - 2,26 - 2,78 + 2,15 + 2,16 - 2,17 - 2,49) = 0,064;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(1,91 + 3,99 + 2,26 + 2,78 - 2,15 - 2,16 - 2,17 - 2,49) = 0,246;$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(1,91 - 3,99 - 2,26 + 2,78 - 2,15 + 2,16 + 2,17 - 2,49) = -0,234.$$

3.2.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.15):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,00983}{8} = 0,00123,$$

відповідно середньо квадратична помилка $S_{b_i} = 0,035$.

3.2.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.16):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,035 = 0,111.$$

В даному випадку вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ не виконується для коефіцієнта регресії b_2 . Тому його слід визнати статистично не значимим та вилучити із моделі.

3.2.5. Будівництво математичної моделі питомої продуктивності обробки

Рівняння регресії y_2 набуде вигляду:

$$y_2 = 2,489 - 0,366x_1 + 0,246x_3 - 0,234x_4. \quad (3.3)$$

Математична модель питомої продуктивності обробки M_a електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, що побудована з урахуванням залежностей (2.6) – (2.9), набуде вигляду:

$$M_a = 9,602 - 0,00761 \cdot I + 0,0491 \cdot D - 0,00948 \cdot n_{ш}. \quad (3.4)$$

3.2.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.18):

$$t^{\text{розр}} = \frac{|2,489 - 2,29|\sqrt{8}}{0,0992} = 5,67.$$

При рівні значимості $\alpha = 0,01$ табличне значення t -критерію Стьюдента дорівнює 5,84 [14]. Оскільки $5,67 < 5,84$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.2.7. Аналіз моделі

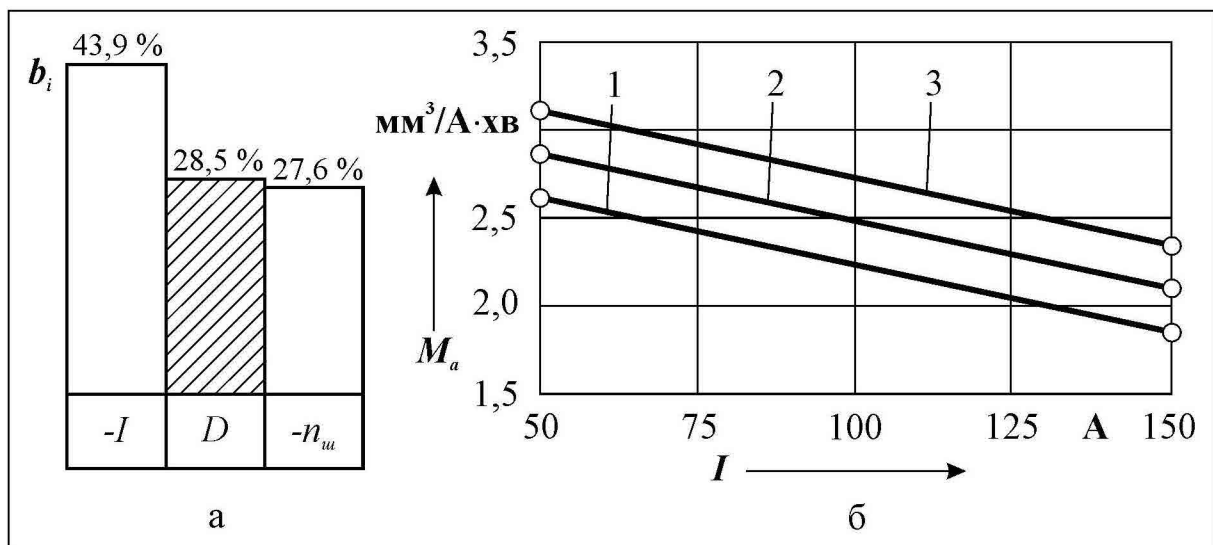


Рис. 3.2. Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої продуктивності обробки M_a від I та D (б) [$n_u = 35 \text{ хв}^{-1}$]: 1 – $D = 10$ мм; 2 – $D = 15$ мм; 3 – $D = 20$ мм

Із математичної моделі питомої продуктивності обробки M_a електричною дугою тіл обертання дротівим електрод-інструментом (3.4)

витає, що сила технологічного струму є головним керуючим фактором. Збільшується продуктивність обробки M_a (рис. 3.2, а), якщо сила технологічного струму зменшується. Фактори, як діаметр вихідної заготовки D та число обертів шпинделя $n_{ш}$ приблизно однаково впливають на M_a . Із підвищенням числа обертів шпинделя $n_{ш}$ питома продуктивність обробки зменшується, а із підвищенням діаметру заготовки D питома продуктивність обробки збільшується. Графік залежності $M_a = f(I, D)$ демонструється на рис. 3.2, б.

Питома продуктивність обробки електричною дугою тіл обертання дровим електрод-інструментом в умовах експерименту змінювалася у межах від 1,91 до 3,99 мм³/А·хв.

3.3. Питома витрата електроенергії

3.3.1. Розрахунок дисперсії дослідів

Розрахунок дисперсії дослідів здійснювали за формулою (2.12). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Дані для розрахунку дисперсії дослідів

Номер дубля	y_{0q}	$\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	Δy^2
1	28,69	0,81	0,6561
2	29,08	1,20	1,4400
3	27,22	0,66	0,4356
4	26,54	1,34	1,7956
	$\bar{y}_0 = 27,88$		$\sum \Delta y^2 = 4,3273$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{4,3273}{3} = 1,4424,$$

ВІДПОВІДНО

$$S_y = 1,20.$$

3.3.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14):

$$b_0 = \frac{1}{8}(33,02 + 16,12 + 29,92 + 22,11 + 29,53 + 29,82 + 29,33 + 25,15) = 26,86;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(33,02 - 16,12 + 29,92 - 22,11 + 29,53 - 29,82 + 29,33 - 25,15) = 3,58;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(33,02 + 16,12 - 29,92 - 22,11 + 29,53 + 29,82 - 29,33 - 25,15) = 2,5;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(33,02 + 16,12 + 29,92 + 22,11 - 29,53 - 29,82 - 29,33 - 25,15) = -1,58;$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(32,89 - 16,02 - 29,76 + 23,05 - 29,73 + 29,76 + 29,73 - 25,25) = 1,84.$$

3.3.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.9):

$$S_{b_i}^2 = \frac{1,4424}{8} = 0,1803,$$

ВІДПОВІДНО

$$S_{b_i} = 0,42 .$$

3.3.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.16):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,42 = 1,33 .$$

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

3.3.5. Будування математичної моделі питомої витрати електроенергії

Рівняння регресії y_3 набуде вигляду:

$$y_3 = 26,86 + 3,58x_1 + 2,50x_2 - 1,58x_3 + 1,84x_4 .$$

(3.5)

Математична модель питомої витрати електроенергії a при обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, побудована з урахуванням залежностей (2.6) – (2.9), набуде вигляду:

$$a = 11,342 + 0,08 \cdot I + 13,6 \cdot P_{cm} - 0,316 \cdot D + 0,0738 \cdot n_{ш} .$$

(3.6)

3.3.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стюдента за формулою (2.18):

$$t^{розр} = \frac{|26,86 - 27,88|\sqrt{8}}{1,2} = 2,41.$$

Оскільки $2,41 < 3,18$, гіпотеза про адекватність лінійної моделі не відхиляється.

3.3.7. Аналіз моделі

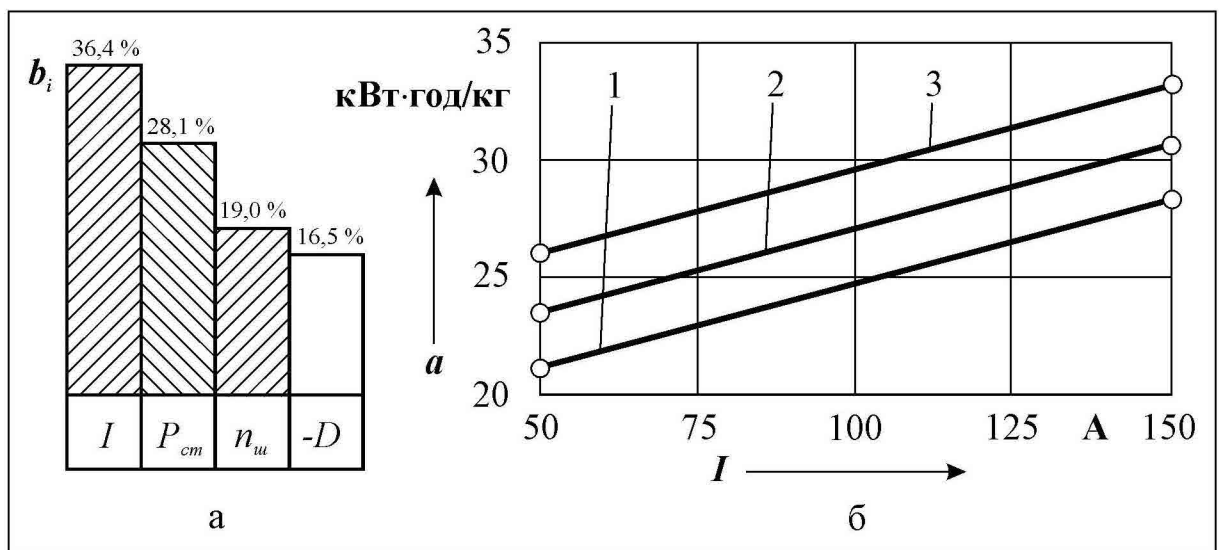


Рис. 3.3. Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої витрати електроенергії a від I та P_{cm} [$D = 15$ мм; $n_{ш} = 35$ хв⁻¹](б): 1 – $P_{cm} = 0,6$ МПа; 2 – $P_{cm} = 0,8$ МПа; 3 – $P_{cm} = 1,0$ МПа

Ступінь впливу факторів на питому витрату електроенергії a при обробці електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом показано на рис. 3.3, а.

Як бачимо, на питому витрату електроенергії a найбільш впливовим фактором є сила технологічного струму I , при підвищенні якої питома витрата електроенергії a збільшується. Сила технологічного струму I є головний керуючий фактор.

Суттєве значення має статичний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_{cm} . При підвищенні P_{cm} питома витрата електроенергії a збільшується.

На питому витрату електроенергії a менше впливають наступні фактори – число обертів шпинделя $n_{ш}$ і діаметр вихідної ЕЗ D .

Графік залежності $a = f(I, P_{cm})$ демонструється на рис. 3.3, б.

Питома витрата електроенергії a процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом в умовах експерименту змінювалася у межах від 16,12 до 33,02 кВт·год/кг.

Розділ 4

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ
ОБРОБКИ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ДУГОЮ ТІЛ ОБЕРТАННЯ
ДРОТОВИМ ЕЛЕКТРОД-ІНСТРУМЕНТОМ**

4.1. Шорсткість поверхні обробки**4.1.1. Розрахунок дисперсії досліду**

Розрахунок дисперсії досліду здійснювали за формулою (2.12). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Дані для розрахунку дисперсії досліду

Номер дубля	y_{0q}	$\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	Δy^2
1	25	0	0
2	24	1	1
3	26	1	1
4	25	0	0
	$\bar{y}_0 = 25$		$\sum \Delta y^2 = 2$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{2}{3} = 0,667,$$

відповідно

$$S_y = 0,816.$$

4.1.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14):

$$b_0 = \frac{1}{8}(28 + 14 + 38 + 12 + 42 + 6,3 + 40 + 8,0) = 23,54;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(28 - 14 + 38 - 12 + 42 - 6,3 + 40 - 8,0) = 13,46;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(28 + 14 - 38 - 12 + 42 + 6,3 - 40 - 8,0) = -0,96;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(28 + 14 + 38 + 12 - 42 - 6,3 - 40 - 8,0) = -0,54;$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(28 - 14 - 38 + 12 - 42 + 6,3 + 40 - 8,0) = -1,96;$$

4.1.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.15):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,667}{4} = 0,167,$$

відповідно

$$S_{b_i} = 0,408.$$

4.1.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.16):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,408 = 1,30.$$

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

4.1.5. Будування математичної моделі шорсткості поверхні обробки

Рівняння регресії y_4 набуде вигляду:

$$y_4 = 23,54 + 13,46x_1 - 1,96x_4.$$

(4.1)

Математична модель шорсткості поверхні Ra процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, що побудована з урахуванням залежностей (2.6) – (2.9), набуде вигляду:

$$Ra = -2,13 + 0,291 \cdot I - 0,0787 \cdot n_{ш}.$$

(4.2)

4.1.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.18):

$$t^{розр} = \frac{|23,54 - 25| \sqrt{8}}{0,816} = 5,06.$$

При рівні значимості $\alpha = 0,01$ табличне значення t -критерією Стьюдента дорівнює 5,84 [14]. Оскільки $5,06 < 5,84$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

4.1.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів на шорсткість поверхні Ra обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, на рис. 4.1, а.

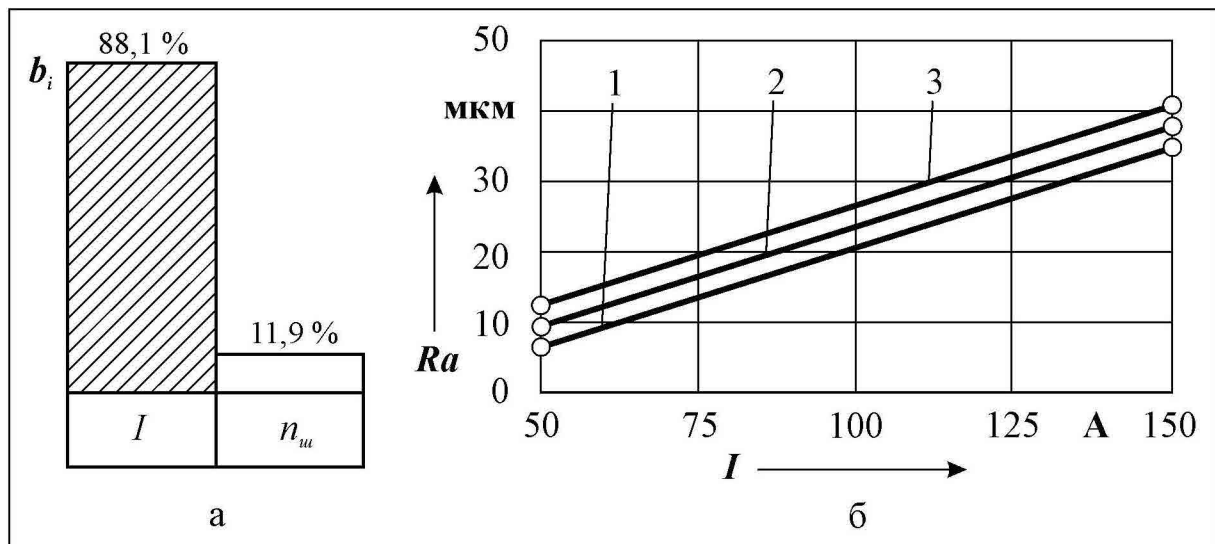


Рис. 4.1. Ступінь впливу факторів (а) та залежність шорсткості поверхні обробки Ra від I та n_u (б): 1 – $n_u = 10 \text{ хв}^{-1}$; 2 – $n_u = 35 \text{ хв}^{-1}$; 3 – $n_u = 60 \text{ хв}^{-1}$

На шорсткість поверхні обробки найбільш впливає сила технологічного струму I , при підвищенні якої шорсткість поверхні обробки Ra збільшується, тому сила технологічного струму I є головний керуючий фактор. Менше впливає на шорсткість обробленої поверхні швидкість обертання шпинделя. Залежність $Ra = f(I, n_u)$ демонструється на рис. 4.1, б.

В умовах експерименту шорсткість поверхні Ra обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, змінювалася у межах від 6,3 до 42 мкм.

Шорсткість торцевої поверхні після РОД [5, с. 129] визначається мікрорельєфом. Сліди горіння електричної дуги на поверхні утворюються в результаті суперпозиції. Так само і визначається шорсткість поверхні обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом. Сліди горіння являють собою лунки або доріжки (рис. 4.2). Форма і геометрія елементарної електроерозійної лунки характеризується діаметром D_n , якщо утворюється електроерозійна доріжка то діаметр D_n характеризує її ширину.

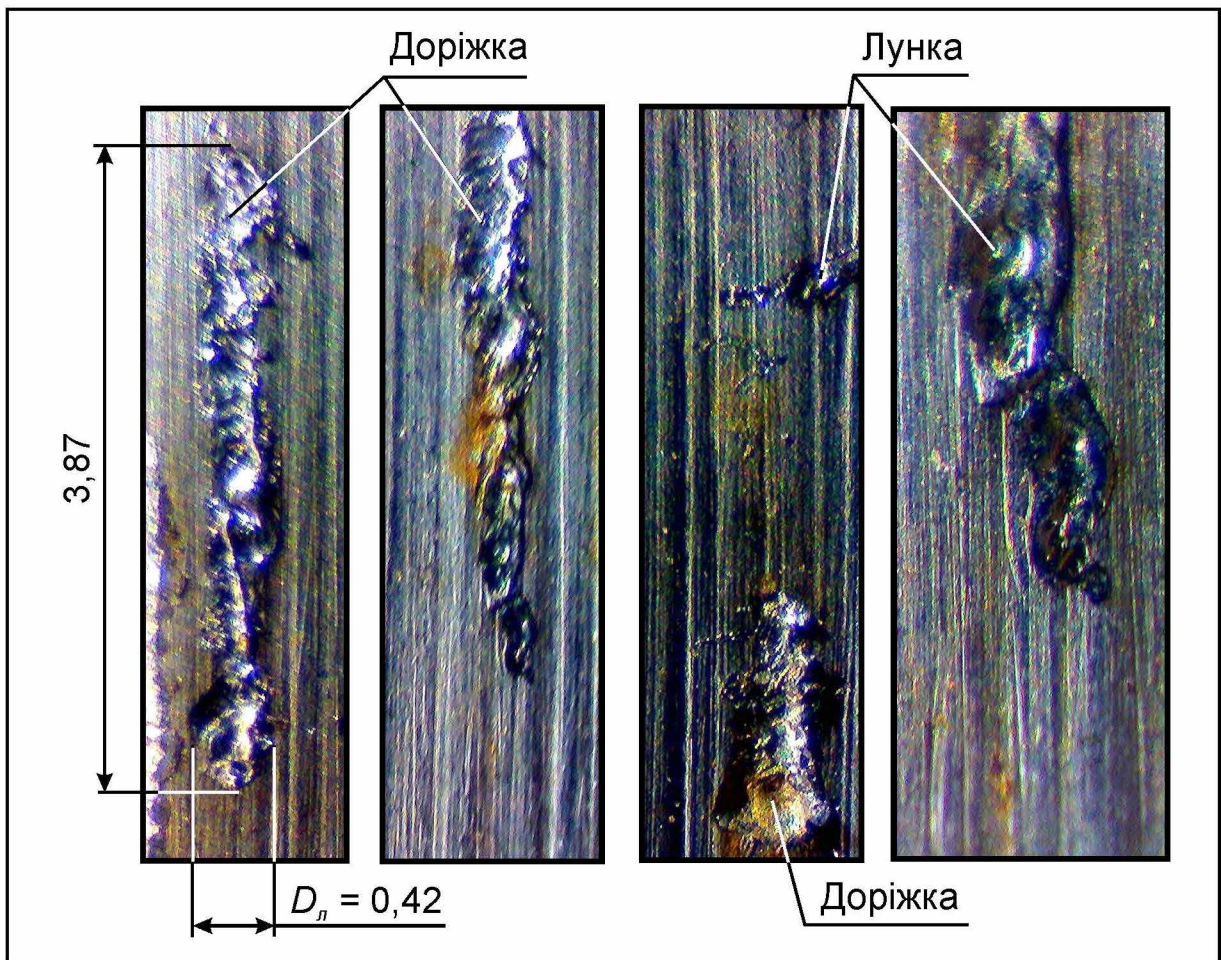
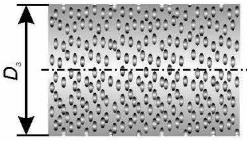
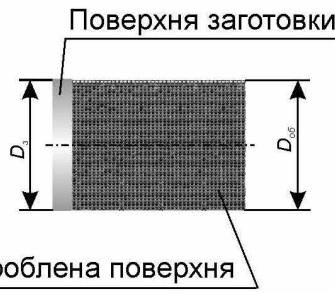
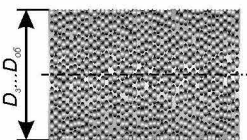
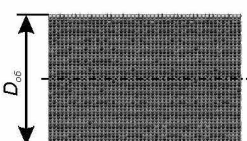


Рис. 4.2. Сліди електричної дуги на поверхні заготовки ($\times 25$): $I = 50$ А; $P_{cm} = 0,6$ МПа; $D = 35$ мм; $n_{ш} = 60$ хв $^{-1}$

Формування поверхні дровим електрод-інструментом при обертанні може здійснюватися (табл. 4.2):

Таблиця 4.2

Формування поверхні тіла обертання дровим електрод-інструментом

Показники процесу обробки	Режим обробки	
	послідовний	одноразовий
Характеристика режиму обробки	<ol style="list-style-type: none"> $I = I_{min}$. $n_{ш} = n_{ш(max)}$. $s_o = const \leq d_{дрота}$. 	<ol style="list-style-type: none"> $I = I_{max}$. $n_{ш} = n_{ш(min)}$. $s_o = const \leq d_{дрота}$.
Кількість проходів	Непарна: 1, 3, 5...	Один
Моделювання слідів дуги за проходями	Перший прохід: 	Разовий прохід: 
	Третій прохід: 	
	П'ятий прохід: 	
Результат обробки та рекомендації щодо застосування	<ol style="list-style-type: none"> Малопродуктивна чистова обробка: $M < M_{opt}$ Мінімальна шорсткість обробленої поверхні ($Ra = 6,3$ мкм) 	<ol style="list-style-type: none"> Високопродуктивна чорнова обробка: $M \geq M_{opt}$ Максимальна шорсткість обробленої поверхні ($Ra = 40$ мкм)

Розділ 5

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА**5.1. Економічна ефективність процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом**

Економічну ефективність процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом оцінювали шляхом розрахунку очікуваного річного економічного ефекту [18,19,20] від впровадження у виробництво пристрою до токарного верстата, який реалізує даний процес обробки. Розрахунок базується на таких умовах:

- за базовий варіант прийнято відомий спосіб електроіскрової обробки тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента [6], при якому дріт вільно перемотується з однієї котушки на іншу дотично до поверхні обробки. За даними роботи [16, с. 248] поверхнева продуктивність обробки сталі M_n складає $40 \text{ мм}^2/\text{хв}$, або при діаметрі дроту $d = 0,3 \text{ мм}$ та міжелектродному зазорі $\delta = 0,05 \text{ мм}$, об'ємна базова продуктивність обробки M_b складає:

$$M_b = M_n \cdot (d + 2\delta) = 40 \cdot (0,3 + 2 \cdot 0,05) = 16 \text{ мм}^3/\text{хв};$$

- за проектний варіант прийнято спосіб РОД тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента [13], який протягують в зоні обробки по опуклій поверхні електродотримача дотично до поверхні обробки. За даними експериментальних досліджень середня проектна продуктивність обробки $M_{np} = 224 \text{ мм}^3/\text{хв}$, що відповідає силі струму $I = 100 \text{ А}$, статичному тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор $P_{cm} = 0,8 \text{ МПа}$, швидкості обертання шпинделя $n_{ш} = 35 \text{ хв}^{-1}$ та діаметру заготовки $d = 15 \text{ мм}$;

- річна маса металу, що знімається з тіл обертання, складає 1580 т/рік. Вона задається із умови завантаження обладнання з коефіцієнтом 0,75. Вихідні дані для подальшого розрахунку наведено в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Вихідні дані

№ пп	Найменування показників	Умовні позначення	Одиниці виміру	Варіанти		Джерело даних
				базовий	проектний	
1	Річна програма (маса металу, що знімається з тіл обертання)	n	т/рік	0,211	0,211	За умовою використання одного нового верстата з коефіцієнтом завантаження 0,75
2	Середня трудомісткість знімання однієї тони металу	t	год/т	133867	9516	$t = \frac{1}{M}$ $t_{\delta} = \frac{1}{16} \text{ хв/мм}^3 = 133867 \text{ год/т}$ $t_n = \frac{1}{224} \text{ хв/мм}^3 = 9516 \text{ год/т}$
3	Коефіцієнт ефективності	K_e	-	14	1	$K_e = \frac{M_n}{M_{\delta}} = \frac{224}{16} = 14$
4	Денний зарібок	z	грн	500	500	За даними заводу-виготвляча
5	Дійсний фонд часу обладнання при однозмінній роботі	F_e F_{δ}	год днів	2008 251	2008 251	За сучасними нормами
6	Вартість знімання однієї тони металу	T	грн/т	8327014,2	594786,7	$T = \frac{z \cdot F_{\delta} \cdot K_e}{n}$ $T_{\delta} = \frac{500 \cdot 251 \cdot 14}{0,211} = 8327014,2$ грн/т $T_n = \frac{500 \cdot 251 \cdot 1}{0,211} = 594786,7 \text{ грн/т}$
7	Вартість обладнання	K	грн	200000	250000	За даними заводу-виготвляча
8	Виробнича площа, що займає одиниця обладнання	S	м ²	8	10	За технічною характеристикою верстатів
9	Коефіцієнт, що ураховує додаткову виробничу площу на одну одиницю обладнання	K_{δ}	-	1,1	1,1	За даними проекту
10	Вартість 1 м ² виробничої площі	C_n	грн/м ²	1500	1500	За даними заводу-виготвляча
11	Сумарна потужність двигунів та джерел живлення	N	кВт	10	30	За технічною характеристикою верстатів
12	Коефіцієнт використання потужності обладнання	K_n	-	0,9	0,3	За технічною характеристикою верстатів
13	Вартість однієї кВт/год електроенергії	C_e	грн	0,9	0,9	За даними заводу-виготвляча
14	Річна норма амортизаційних відрахувань	a_a	%	11,48	11,48	За даними заводу-виготвляча
15	Річна норма відрахувань на утримання та поточний ремонт обладнання	a_p	%	3,64	3,64	За даними заводу-виготвляча
16	Річна норма відрахувань на ремонт, амортизацію та утримання виробничої площі	a_n	%	2,4	2,4	За даними заводу-виготвляча
17	Коефіцієнт, що ураховує додаткову заробітну плату	$K_{\delta z}$	-	1,089	1,089	За даними заводу-виготвляча
18	Коефіцієнт завантаження	$K_{\delta o}$	-	0,75	0,75	За даними заводу-виготвляча
19	Сума витрат на НДР	$E_{НДР}$	грн	-	150000	Договір з НДР

Для розрахунку суми капітальних вкладень необхідно визначити:

- розрахункову H_p та прийняту H_n кількість потрібного обладнання для розмірної обробки електричною дугою тіл обертання за програмою n ;
- вартість всього обладнання $K_{об}$;
- вартість виробничих приміщень $K_{ен}$.

Дані розрахунки наведено нижче в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

Розрахунок суми капітальних вкладень у виробництво

№ пп	Найменування показників	Умовні позначення	Одиниці виміру	Варіанти		Формули, розрахунки
				базовий	проектний	
1	Розрахункова кількість обладнання	H_p	шт	14,04	0,99	$H_p = \frac{n \cdot t}{F}$ $H_{p(б)} = \frac{0,211 \cdot 133867}{2008} = 14,04$ $H_{p(n)} = \frac{0,211 \cdot 9516}{2008} = 0,99$
2	Прийнята кількість обладнання	H_n	шт	14	1	-
3	Вартість всього обладнання	$K_{об}$	грн	2800000	250000	$K_{об} = \kappa \cdot H_n$ $K_{об(б)} = 200000 \cdot 14 = 2800000$ $K_{об(n)} = 250000 \cdot 1 = 250000$
4	Вартість виробничих приміщень	$K_{ен}$	грн	184800	16500	$K_{ен} = S \cdot K_{д} \cdot H_n \cdot \Pi_n$ $K_{ен(б)} = 8 \cdot 1,1 \cdot 14 \cdot 1500 = 184800$ $K_{ен(n)} = 10 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1500 = 16500$
5	Загальна сума капітальних вкладень	$K_{вс}$	грн	2984800	266500	$K_{вс} = K_{об} + K_{ен}$ $K_{вс(б)} = 2800000 + 184800 = 2984800$ $K_{вс(n)} = 250000 + 16500 = 266500$

Для подальшого розрахунку собівартості обробки тіл обертання відомим способом та способом, що пропонується, треба визначитися із:

- заробітною платою $C_{зн}$;
- амортизацією, утриманням та ремонтом обладнання $C_{ам}$;
- вартістю електроенергії C_e ;
- ремонтом та утриманням виробничої площі $C_{пл}$.

Дані показники є складовими частинами собівартості продукції за річною програмою знімання металу, розрахунок якої наведено у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

**Розрахунок собівартості продукції за річною програмою
знімання металу**

№ пп	Найменування показників	Умовні позначення	Одиниці виміру	Варіанти		Формули, розрахунки
				базовий	проектний	
1	Заробітна плата	C_m	грн	765349,2	54667,8	$C_m = n \cdot T \cdot K_{\Delta z}$ $C_{m(б)} = 0,211 \cdot 8327014,2 \cdot 1,089 = 1913373$ $C_{m(п)} = 0,211 \cdot 594786,7 \cdot 1,089 = 136669,5$
2	Амортизація, утримання та ремонт обладнання	$C_{ам}$	грн	423360	37800	$C_{ам} = \frac{\kappa \cdot H_n \cdot (a_a + a_y)}{100}$ $C_{ам(б)} = \frac{200000 \cdot 14 \cdot (11,48 + 3,64)}{100} = 423360$ $C_{ам(п)} = \frac{250000 \cdot 1 \cdot (11,48 + 3,64)}{100} = 37800$
3	Вартість електроенергії	C_e	грн	170780,4	12198,6	$C_e = N \cdot K_m \cdot F \cdot H_n \cdot U_0 \cdot K_{\Delta o}$ $C_{e(б)} = 10 \cdot 0,9 \cdot 2008 \cdot 14 \cdot 0,9 \cdot 0,75 = 170780,4$ $C_{e(п)} = 30 \cdot 0,3 \cdot 2008 \cdot 1 \cdot 0,9 \cdot 0,75 = 12198,6$
4	Ремонт та утримання виробничої площі	$C_{пм}$	грн	4435	396	$C_{пм} = \frac{S \cdot K_{\delta} \cdot H_n \cdot U_n \cdot a_n}{100}$ $C_{пм(б)} = \frac{8 \cdot 1,1 \cdot 14 \cdot 1500 \cdot 2,4}{100} = 4435$ $C_{пм(п)} = \frac{10 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 1500 \cdot 2,4}{100} = 396$
5	Собівартість випуску продукції	C	грн	2511948,4	187064,1	$C = C_m + C_{ам} + C_e + C_{пм}$ $C_{(б)} = 1913373 + 423360 + 170780,4 + 4435 = 2511948,4$ $C_{(п)} = 136669,5 + 37800 + 12198,6 + 396 = 187064,1$

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження у виробництво процесу розмірної обробки електричною дугою тіл обертання з використанням дротового електрода-інструмента визначаємо за формулою:

$$E_p = [C_{(б)} - C_{(п)}] + E_n [K_{ке(б)} - K_{ке(п)}] =$$

$$= (2511948,4 - 187064,1) + 0,15(2984800 - 266500) = 2732630 \text{ грн.}$$

При цьому коефіцієнт ефективності НДР:

$$K_{эф} = \frac{E_p}{E_{НДР}} = \frac{2732630}{150000} = 18,22.$$

ВИСНОВКИ

Основні результати магістерської роботи полягають в наступному:

1. В сучасному машинобудуванні для обробки тіл обертання широко застосовується токарна обробка, яка звичайно здійснюється ріжучим інструментом, зокрема різцем. Головний принцип механічного різання: твердість різця повинна бути більша твердості деталі, що оброблюється. Саме за цією причиною токарна обробка має суттєве обмеження в застосуванні при точінні заготовок із важкооброблюваних матеріалів. Значний прорив в цьому напрямку за останні роки зробили електроерозійні методи, які забезпечили несилове різання. Ці методи дозволили обробляти будь-який електропровідний матеріал не залежно від твердості і фізико-хімічних властивостей. Найбільш продуктивним способом електроерозійної обробки тіл обертання є електроконтактна обробка. Де електричну дугу в міжелектродному зазорі збуджують з поливом рідини в зону обробки між електродом-заготовкою і дисковим електродом-інструментом при обертанні. Технологічні можливості обмежені кінематикою його обертання і великим діаметром електрода-інструмента. Об'ємний знос дискового електрод-інструмента не зменшується нижче 3 – 10 %. З метою розширення технологічних можливостей даного способу, професором Боковим В. М. запропоновано спосіб розмірної обробки дугою (РОД) тіл обертання. Обробка відбувається графітовим електрод-інструментом, де його лінійний абразивний знос може складати 10 – 20 %. Такий знос не дозволяє реалізувати точну обробку. Запропоновано новий спосіб обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом. Дріт в зоні обробки протягується, обробляє і компенсує його електроерозійний знос. Цей спосіб дозволить реалізувати точну обробку тіл обертання, але не був об'єктом дослідження. Тому робота, що спрямована на підвищення точності процесу обробки електричною дугою

тіл обертання дротовим електрод-інструментом, є актуальним науково-практичним завданням.

2. Виконано узагальнення результатів огляду сучасних способів обробки тіл обертання та обґрунтовано напрямок досліджень. Показано, що самим продуктивним способом обробки тіл обертання є процес РОД. Однак, наявність великого зносу не дозволяє його використовувати для розмірної обробки. Запропоновано підвищити точність процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом. Даний процес не був об'єктом реалізації та дослідження, а тому його технологічні характеристики не відомі.

3. Запропонована нова технологічна схема формоутворення поверхні тіла обертання. В гідродинамічному потоці робочої рідини збуджують електричну дугу між електродом і заготовкою. Збудження відбувається між електрод-заготовкою яка обертається і електрод-інструментом дротовим. Дротовий електрод-інструмент протягують в зоні обробки по поверхні електродотримача, який перпендикулярний вісі заготовки, яка обертається. Сам процес здійснюють без можливого контакту електрод-інструмента з заготовкою і без застосування слідкуючої системи подачі електрода з гарантованим зазором між заготовкою і електрод-інструментом.

4. Отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, які визначають продуктивність, якість обробки і дозволяють керувати ними та прогнозувати.

5. Отримано математичну модель продуктивності обробки M електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом. Як бачимо, найбільший вплив на M впливає сила технологічного струму I , де із підвищенням сили технологічного струму I продуктивність обробки збільшується, це підтверджує теплову природу РОД. Сила технологічного

струму є основний керуючий фактор. Число обертів шпинделя $n_{ш}$ менше впливає, але є суттєвим значенням., коли число обертів шпинделя $n_{ш}$ підвищується то продуктивність зменшується. Продуктивність обробки електричною дугою тїл обертання дротовим електрод-інструментом в рамках експерименту змінювалася у межах від 105 до 331 мм³/хв.

6. Із отриманої математичної моделі питомої продуктивності обробки M_a електричною дугою тїл обертання дротовим електрод-інструментом витїкає, що сила технологїчного струму є головним керуючим фактором. Збільшується продуктивність обробки M_a , якщо сила технологїчного струму зменшується. Фактори, як діаметр вихідної заготовки D та число обертів шпинделя $n_{ш}$ приблизно однаково впливають на M_a . Із підвищенням числа обертів шпинделя $n_{ш}$ питома продуктивність обробки зменшується, а із підвищенням діаметру заготовки D питома продуктивність обробки збільшується. Питома продуктивність обробки електричною дугою тїл обертання дротовим електрод-інструментом в умовах експерименту змінювалася у межах від 1,91 до 3,99 мм³/А·хв.

7. Із отриманої математичної моделі питомої витрати електроенергїї a процесу обробки електричною дугою тїл обертання дротовим електрод-інструментом бачимо, що на питому витрату електроенергїї a найбільш впливовим фактором є сила технологїчного струму I , при підвищенї якої питома витрата електроенергїї a збільшується. Сила технологїчного струму I є головний керуючий фактор. Суттєве значення має статичний тиск робочої рїдини на входї в міжелектродний зазор P_{cm} . При підвищеннї P_{cm} питома витрата електроенергїї a збільшується. На питому витрату електроенергїї a менше впливають наступні фактори – число обертів шпинделя $n_{ш}$ і діаметр вихідної ЕЗ D . Питома витрата електроенергїї a процесу обробки електричною дугою тїл обертання дротовим електрод-інструментом в умовах експерименту змінювалася у межах від 16,12 до 33,02 кВт·год/кг.

8. Отримано математичну модель шорсткості поверхні Ra після обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом. На шорсткість поверхні обробки найбільш впливає сила технологічного струму I , при підвищенні якої шорсткість поверхні обробки Ra збільшується, тому сила технологічного струму I є головний керуючий фактор. Менше впливає на шорсткість обробленої поверхні швидкість обертання шпинделя. В умовах експерименту шорсткість поверхні Ra обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом, змінювалася у межах від 6,3 до 42 мкм.

9. Описано і показано можливість формування поверхні за один або декілька проходів та фізичний механізм формування шорсткості поверхні під час обробки електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом.

10. Апробація роботи здійснювалася шляхом доповіді на LVII науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти приуроченій «Дню науки – 2023» в ЦНТУ. Тези доповіді на тему «Обробка електричною дугою тіл обертання дротовим електрод-інструментом» опубліковано в збірнику тез доповідей здобувачів вищої освіти LVII науково-технічної конференції, LIV науково-технічної конференції викладачів, аспірантів та співробітників «Наука в ЦНТУ основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2023» 20 квітня 2023 року.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Грабовский Г. И. Резание металлов: учебник для вузов / Г. И. Грабовский, В. Г. Грабовский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
2. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник. – М.: Машиностроение, 1976. – 176 с.
3. Размерная электрическая обработка металлов: учебное пособие для вузов / Б. А. Артамонов, А. Л. Винницкий, Ю. С. Волков, А. В. Глазков / Под ред. А. В. Глазков. – М.: Высш. шк., 1978. – 336 с.
4. Спосіб обробки тіл обертання електричною дугою і електрод-інструмент для його реалізації: пат. 24439А Україна: МПК В23Р 17/00 / Боков В. М.; заявник та патентоволодар Кіровоградський інститут сільськогосподарського машинобудування. - № 97041927; заявл. 22.04.97; опубл. 30.10.98, Бюл. № 5.
5. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою: монографія / В. М. Боков. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2002. – 300 с.
6. Новое в электроэрозии – ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЕ ТОЧЕНИЕ [Электронный ресурс] / Пер. из ж-ла MODERN MACHINESHOP. – Режим доступа: galika.ru/wp-content/uploads/2013/03/Statea_EDM_Turning.pdf – Загл. с экрана.
7. А. с. 368965 СССР, МКИ В23Р 1/02. Способ электрофизической обработки металлов / Носуленко В. И. (СССР). – 1223593/25-8; заявл. 04.03.68; не подлежит опубл. в откр. печати.
8. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой / В. И. Носуленко, Г. М. Мещеряков // Электронная обработка материалов. – 1981. – № 1. – С. 19-23.

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

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

11. Спосіб обробки тіл обертання електричною дугою і електрод-інструмент для його реалізації: пат. 24439А Україна: МПК В23Р 17/00 / Боков В. М.; заявник та патентоволодар Кіровоградський інститут сільськогосподарського машинобудування. - № 97041927; заявл. 22.04.97; опубл. 30.10.98, Бюл. № 5.

12. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 720 с.

13. Спосіб обробки поверхонь тіл обертання електричною дугою в гідродинамічному потоці робочої рідини: пат 121498 Україна: МПК В23К 9/013, В23К 35/38 / Боков В. М., Сіса О. Ф.; заявник та власник Центральноукраїнський національний технічний університет. - № u201705537; заявл. 06.06.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23.

14. Новик Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

15. Боков В. М. Методичні вказівки з курсу «Методологія наукових досліджень» / В. М. Боков. – Кіровоград: КІСМ, 1993. – 64 с.

16. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. А. Амитап, И. А. Байсупов, Ю. М. Барон и др.; под общ. ред. В. А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Лененгр. отд-ние, 1988. – 719 с.

17. Основи охорони праці: підручник / К. Н. Трачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний та ін.; за ред. К. Н. Тручука і М. О. Халімовського. – К.: Основа, 2003. – 472 с.

18. Економічні розрахунки при проектуванні штампувальних цехів: вказівки до курсової роботи та економічної частини дипломного проекту /Укладачі: Склярєнко І.В., Муцинова Л.В. – Кіровоград: КДТУ, 2000.

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

20. Методические указания по дипломному проектированию для студентов спец. 0503 /Сост. В.М. Боков, В.С. Запорожченко и др. под ред. Н.В. Шепельского. – Кіровоград: КИСХМ, 1989.

ДОДАТКИ

Д1. Довідка про участь у науково-технічній конференції



Довідка № 206 від 18.12.2023р.

Видана студенту групи ПМ22-М2-2 Слесарєву Максиму про те, що він 20 квітня 2023 р. брав участь у засіданні секції LVII науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти приуроченій «Дню науки – 2023» на секції машинобудування, мехатроніки і роботехніки з доповіддю на тему: «Обробка електричною дугою тіл обертання дротовим електродомінструментом» (наук. кер.: доц. О.Сіса).

Керівник МОВ

Олексій СМІРНОВ