

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

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри ММР

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

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

**«Різання дротовим електрод-інструментом при
розмірній обробці дугою»**

**«Cutting with a wire electrode tool during dimensional arc
machining»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи ПМ-22М-2

спеціальності 131

«Прикладна механіка»,

_____ Шмаков В. В.

Керівник проекту

канд. техн. наук, доцент

_____ Олег СІСА

Рецензент

канд. техн. наук, доцент

_____ Віктор ПУКАЛОВ

м. Кропивницький 2023/2024 р.

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
 Шмакову Віталію Вікторовичу**

1. Тема роботи: «Різання дротовим електрод-інструментом при розмірній обробці дугою».
2. Керівник роботи: Сіса Олег Федорович, к. т. н., доцент.
3. Строк подання роботи до захисту: 2 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.	20.12.2023 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	15.12.2023 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	20.12.2023 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	22.12.2023 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	16.01.2024 р.	

Дата видачі завдання
30 серпня 2023 р.

Підпис керівника

_____ О. Сіса

Завдання прийнято до виконання
30 серпня 2023 р.

Підпис здобувача

_____ В. Шмаков

ЗМІСТ

ВСТУП		7
РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ		12
1.1. Аналіз сучасних способів різання металів		12
1.2. РОД як високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів		31
1.3. Узагальнення результатів огляду сучасних способів різання металів та обґрунтування напрямку досліджень		34
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ		36
2.1. Обґрунтування технологічної схеми формо- утворення різу при електродуговому різанні металів дротовим електрод-інструментом з використанням зворотного прокачування орга- нічного середовища		36
2.2. Методика експериментального дослідження технологічних характеристик електродугового різання		38
2.3. Експериментальне обладнання, зразки та вимірювальний інструмент		42
2.4. Матеріали, зразки та вимірювальний інструмент..		48
2.5. Техніка безпеки при експериментальному дослідженні		49
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РІЗАННЯ МЕТАЛІВ ДРОТОВИМ ЕЛЕКТРО- Д-ІНСТРУМЕНТОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗВОРОТНОГО ПРОКАЧУВАННЯ ОРГАНІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА		50
3.1. Продуктивність різання		50
3.2. Питома продуктивність різання		58
3.3. Питома витрата електроенергії		61
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РІЗАННЯ МЕТАЛІВ ДРОТОВИМ ЕЛЕКТРОД- ІНСТРУМЕНТОМ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗВОРОТНОГО ПРОКАЧУВАННЯ ОРГАНІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА		65

4.1. Бічний міжелектродний зазор	65
4.2. Шорсткість поверхні різку	69
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	74
5.1. Розрахунок річного економічного ефекту	74
ВИСНОВКИ	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
ДОДАТКИ	84
Д1. Довідка про участь у науково-технічній конференції.....	85

АНОТАЦІЯ

Шмаков В. В. «Різання дротовим електрод-інструментом при розмірній обробці дугою», спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Прикладна механіка», Центрально-український національний технічний університет, Кропивницький, 2024 рік.

Метою дослідження є удосконалення способу електродугового різання дротовими електрод-інструментами шляхом застосування зворотного прокачування органічного середовища.

Удосконалено технологію різання дротовим електрод-інструментом за рахунок застосування процесу РОД. Запропонована нова схема різання з використанням зворотнього прокачування органічного середовища, що підвищує продуктивність різання, точність різання за рахунок формування бічного між електродного зазору, підвищує якість різання без утворення нетиснутих дуг, ведення процесу без руйнування дугою стінок електродотримача. Виявлено взаємозв'язок характеристик процесу з електричними і гідродинамічними режимами обробки. Отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу різання дротовим електрод-інструментом, а саме продуктивність, точність, якість, які дозволяють оптимізувати режим обробки. Показано, що шорсткість бічної поверхні після різання заготовки залежить від сили технологічного струму I , із підвищенням сили струму шорсткість збільшується.

Запропоновано та випробувано спосіб різання дротовим електрод-інструментом при розмірній обробці дугою, який порівняно з відомим дозволяє на 15-20% підвищити продуктивність різання, на 30-40% підвищити точність формоутворення бічного між електродного зазору та на 60-100% зменшити шорсткість поверхні різання.

електрична дуга, електрод-інструмент, технологія, технологічні характеристики, обладнання

ANNOTATION

Shmakov V. V. "Cutting with a wire electrode tool during dimensional arc machining", specialty 131 "Applied Mechanics", OPP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of the study is to improve the method of electric arc cutting with wire electrode tools by using reverse pumping of an organic medium.

The technology of cutting with a wire electrode tool has been improved due to the use of the DEA process. A new cutting scheme with the use of reverse pumping of an organic medium is proposed, which increases cutting productivity, cutting accuracy due to the formation of a lateral inter-electrode gap, increases the quality of cutting without the formation of unpressurized arcs, conducting the process without arcing the walls of the electrode holder. The relationship between process characteristics and electrical and hydrodynamic modes of processing is revealed. Mathematical models of the technological characteristics of the cutting process with a wire electrode tool have been obtained, namely productivity, accuracy, quality, which allow optimizing the processing mode. It is shown that the roughness of the side surface after cutting the workpiece depends on the strength of the technological current I , with an increase in the current strength, the roughness increases.

A method of cutting with a wire electrode tool during dimensional processing with an arc has been proposed and tested, which, compared to the known, allows for a 15-20% increase in cutting performance, a 30-40% increase in the accuracy of forming the lateral inter-electrode gap, and a 60-100% reduction in the roughness of the cut surface.

electric arc, electrode tool, technology, technological characteristics, equipment

ВСТУП

Актуальність теми

В сучасному машинобудуванні для різання важкооброблюваних матеріалів застосовуються такі електрофізикохімічні методи, як електроіскрове різання дротовим електродом-інструментом, електрохімічне, анодно-механічне, електроконтактне, плазмове та лазерне різання. Кожен із цих методів володіє певними перевагами та недоліками, які обумовлюють їх раціональну область використання. В більшості випадків продуктивність процесу різання є визначальною при виборі того чи іншого способу різання.

За роботами Носуленка В. І. відомий високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД). Однак, процес РОД не знайшов застосування для ефективного різання металів. Головна причина – відсутність оптимальної технологічної схеми формоутворення різку, при якій певним чином компенсується електроерозійний знос електрода-інструмента.

В роботі Василенка В. П. запропоновано таку технологічну схему електродугового формоутворення різку, що дозволяє компенсувати знос електрода-інструмента шляхом паралельного протягування в робочій зоні двох дротових електродів-інструментів при прямому прокачуванні робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор. Однак швидкість потоку в напрямку евакуації продуктів ерозії із зони різання при прямому прокачуванні безперервно зменшується (за рахунок його розсіювання), тому і швидкість руху часток в бічному зазорі теж зменшується. Таким чином, створюються умови для концентрації часток в бічному зазорі. Результатом цього явища є виникнення довгих (малостиснутих) дуг, які, з одного боку утворюють похилу поверхню різку, збільшують час різання

(об'єм металу, що руйнується збільшується), а з другого боку руйнують стінки електродотримачів. В наслідок цього експлуатаційні характеристики даного способу різання погіршуються. Крім того, технічна вода, як робоча рідина, ні є досконалою, так як частково проводить електричний струм. За цією причиною частина енергії, що підводиться до електродів, не використовується ефективно (для різання).

В роботі удосконалено спосіб електродугового різання дротовими електродами-інструментами за рахунок використання зворотного прокачування органічної робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор. При різанні робоча рідина виносить продукти ерозії із зони обробки через центральний канал, тому довгі дуги в бічних зазорах, а отже похила поверхня різку, не утворюються. Крім того, оскільки органічне середовище є рідиною-діелектриком, уся енергія, що підводиться до електродів, ефективно використовується.

Таким чином, удосконалення способу електродугового різання дротовими електродами-інструментами є актуальним науково-практичним завданням.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – удосконалення способу електродугового різання дротовим електрод-інструментом шляхом застосування зворотного прокачування органічного середовища

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз сучасних способів різання металів;
- запропонувати нову технологічну схему формоутворення різку з використанням зворотного прокачування органічного середовища;

- розробити методику експериментального дослідження технологічних характеристик електродугового різання;
- виконати експериментальне дослідження технологічних характеристик електродугового різання;
- виконати експериментальне дослідження точності та якості електродугового різання металів дротовим електрод-інструментом з використанням зворотного прокачування органічного середовища.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є спосіб РОД. Предмет дослідження – спосіб електродугового різання металів дротовим електрод-інструментом з використанням зворотного прокачування органічного середовища.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Уперше розроблено теоретичні основи нової технологічної схеми формоутворення різку при електродуговому різанні металів дротовим електрод-інструментом, яка включає в себе зворотне прокачування органічного середовища та дозволяє підвищити продуктивність, точність та якість різання.

2. Уперше встановлено аналітичні зв'язки та виявлено вплив сили технологічного струму I та статичного тиску на вході робочої рідини в міжелектродний зазор P_{cm} на технологічні характеристики процесу електродугового різання металів дротовим електрод-інструментом з використанням зворотного прокачування органічного середовища, що визначають продуктивність M та питому продуктивність M_a різання, питому витрату електроенергії a , бічний міжелектродний зазор δ_b та шорсткість поверхні різку Ra .

Практичне значення отриманих результатів

Удосконалено спосіб електродугового різання металів дротовим електрод-інструментом за рахунок використанням зворотного прокачування органічного середовища, який, порівняно з відомим, дозволяє: на 15 – 20 % підвищити продуктивність різання, на 30 – 40 % підвищити точність формоутворення бічного міжелектродного зазору та на 60 – 100 % зменшити шорсткість поверхні різі.

Запропоновано, розроблено, виготовлено та випробувано експериментальний пристрій для електродугового різання металів 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 85 сторінки, в тому числі 25 рисунків і 9 таблиць, список використаних джерел з 16 найменувань та 1 додатку на 1 сторінці.

Розділ 1

**ОБГРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ
ДОСЛІДЖЕННЯ****1.1. Аналіз сучасних способів різання металів**

В сучасному машинобудуванні різання листового та сортового прокату звичайно здійснюють *механічним способом*. Для різання листового прокату застосовують листові ножиці [1, с. 20], а для різання сортового прокату – комбіновані прес-ножиці [2, с. 113]. Для окремих випадків можуть застосовуватися механічні ножівки та дискові пили [3, с. 210].

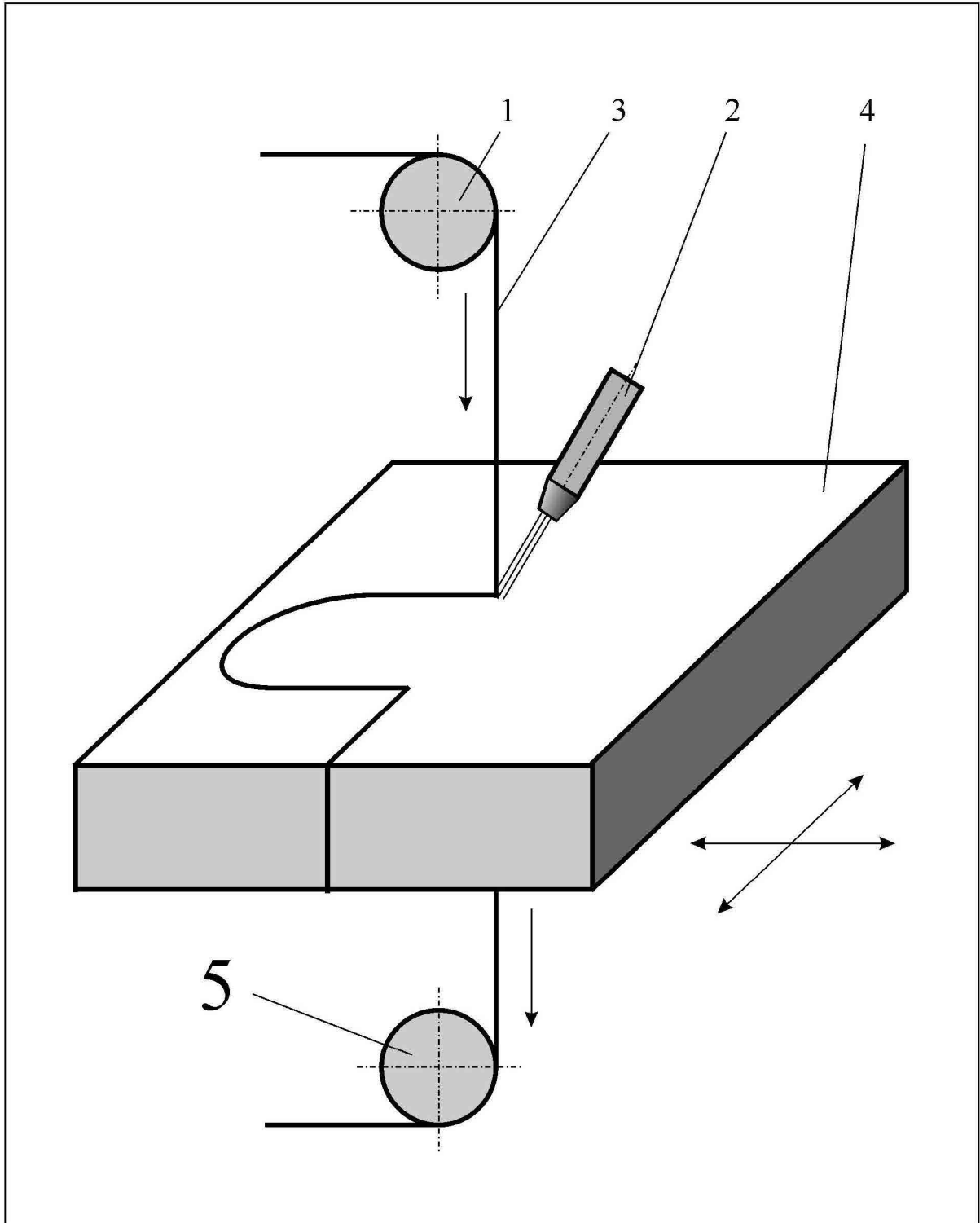
Однак, спосіб механічного різання не застосовується для розрізування важкооброблюваних матеріалів тому, що твердість матеріалу, що розрізується, може дорівнювати або більше твердості інструменту.

Для різання важкооброблюваних матеріалів застосовуються електрофізикохімічні методи. Нижче наводиться аналіз деяких із них.

Електроіскрове різання дротовим електродом-інструментом.

Схема реалізації процесу різання, зокрема вирізування, показана на рис. 1.1.

Для вирізування отвору дротовим ЕІ попередньо в ЕЗ обробляють стартовий отвір для заведення дроту. Звичайно діаметр отвору дорівнює 1 – 3 мм. Отвір обробляють на свердлувальному верстаті, або прошивають електроерозійним способом на копіювально-прошивному верстаті. Іноді застосовують високопродуктивні електроерозійні верстати, які призначені спеціально для отримання стартових отворів. Особливістю їх є використання мідних трубчастих ЕІ, що обертаються, через які прока-



1.1. Схема електроіскрового різання дротом ЕІ:

- 1 - котушка, що подає дрiт;**
- 2 - сопло для подачі робочої рiдини;**
- 3 - електрод-дрiт;**
- 4 - оброблювана деталь;**
- 5 - котушка, що приймає дрiт**

чується робоча рідина під технологічним тиском до 7 МПа. Швидкість прошивання досягає 30 мм/хв.

Електроіскровий метод обробки знайшов широке використання в верстатах для обробки непрофільованим (дротовим) інструментом [4, с. 153].

Більшість електроерозійних верстатів для дротового різання постачаються електроконтактною копіювальною системою, наприклад верстат моделі 4531.

Із сучасних електроіскрових верстатів найбільш відомі верстати фірми Sodick (рис. 1.2). Особливістю їх є [7]:

- застосування першими лінійних двигунів для координатних переміщень ЕІ та ЕЗ, які здатні контролювати міжелектродний зазор 500 разів в секунду (найкраща динаміка, моментальність та неперевершена динамічна точність, відсутність люфтів, мертвих ходів, нечутливості, нерівномірних подач);

- зростання продуктивності дротового різання на 40 – 100 %;

- обробка при оптимальному МЕЗ, який гарантується з великою точністю;

- застосування кераміки в верстатобудуванні;

- нанознос мідного ЕІ (0,02 – 0,06 %);

- наношорсткість обробленої поверхні (рекордне дзеркальне вихажування $Rz = 50$ нанометрів – 14 клас!).

При великій кількості переваг, спосіб електроіскрового різання важкооброблюваних матеріалів має велику ваду: *продуктивність різання дуже низька*. Останнє пояснюється тим, що процес різання супроводжується великими паузами (шпаруватість імпульсів $q \geq 10$). Тобто, час пауз більше ніж в десять разів перевищує час обробки.



Рис. 1.2. Прецизійний дрото-вирізний електроіскровий верстат моделі AQ750L фірми Sodick

Електрохімічне різання ґрунтується на анодному розчиненні металу в середовищі електроліту під дією великої сили струму і може здійснюватись дисковим електродом-інструментом (катодом), або дротом (стрижнем).

Висока окружна швидкість дискового катода (до 50 м/с) забезпечує ефективне промивання міжелектродного зазору електролітом (рис. 1.3). Електроліт подається або на периферію металевого катода, або розпиляється через пори вуглеграфітового катода. Інтенсивна циркуляція електроліту в зоні анодного розчинення створює передумови для роботи з

дуже малими міжелектродними зазорами (до 0,01 мм), що обумовлює високу точність обробки. Відсутність зносу катода робить даний процес перспективним за призначенням.

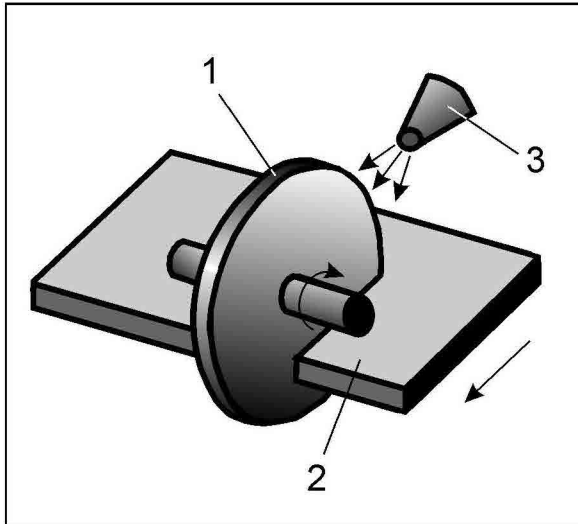


Рис. 1.3. Електрохімічне різання дисковим катодом, що обертається:

- 1 - диск-катод;**
- 2 - електрод-заготовка;**
- 3 - форсунка, що подає електроліт**

Однак, за даними роботи [6, с. 13], способом електрохімічного різання, що пов'язані з обертанням катода, властива *менша продуктивність* порівняно зі способами об'ємного копіювання та сполученої обробки.

Електрохімічне різання дротом або стрижнем відрізняється дуже малою жорсткістю інструменту, але володіє великими можливостями отримання складної конфігурації виробу при мінімальних витратах матеріалу та енерговитрат за рахунок локалізації анодного розчинення у межах малої ширини різку. В теперішній час існує два різновиду подібної обробки.

В першому випадку різання здійснюється дротовим (діаметром 0,3 – 0,5 мм) або стрижневим катодом. Даний спосіб перевершує аналогічний електроерозійний за продуктивністю та економічністю, але поступається йому за точністю.

В другому випадку різання здійснюється перфорованим (для подачі електроліту) трубчастим катодом, що вигнутий за контуром оброблюваної

поверхні. Даний спосіб доцільно використовувати для попередньої обробки з метою вилучення великого об'єму металу.

Анодно-механічне різання являє собою комбінований процес анодного розчинення та електроерозійного впливу на оброблювану заготовку, при якому електрод-інструмент рухається відносно поверхні, що оброблюється (рис. 1.4). Робочим середовищем є електроліт, що дає на аноді плівку, яка пасивує. Звичайно в якості електроліту використовується водний розчин рідкого скла [5, с. 17].

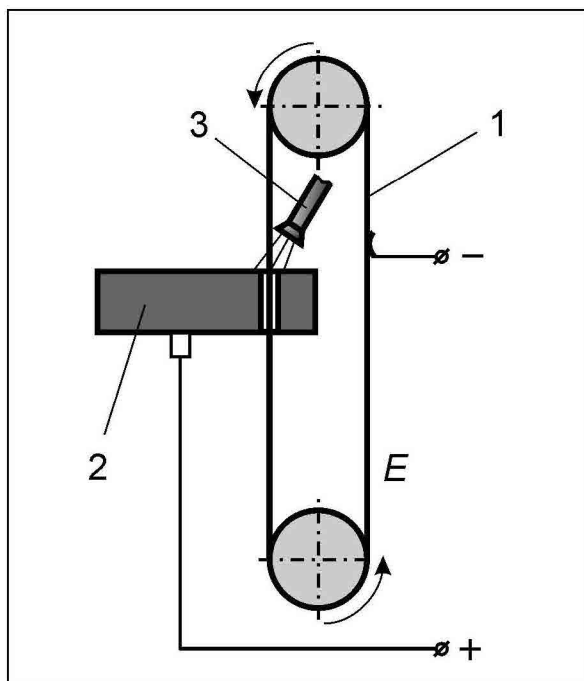


Рис. 1.4. Схема анодно-механічного різання стрічкою-електродом:

- 1 - стрічка-електрод;
- 2 - заготовка, що обробляється;
- 3 - форсунка, що подає електроліт

Джерело живлення технологічним струмом – випрямляч з робочою постійною напругою 24 – 32 В. Електрод-інструмент підключається до негативного, а заготовка, що обробляється – до позитивного полюсу. Електрод-інструмент виконується у вигляді диску або нескінченної стрічки.

Анодно-механічне різання дозволяє розрізати заготовки із високолегованих сталей та важкооброблюваних матеріалів товщиною до 1000 мм. Швидкість різання – до 30 – 35 см²/хв., шорсткість поверхні відповідає R_z

160 – 400 мкм. Ширина різку на дискових верстатах 1,5 – 3, стрічкових 1,8 – 2, а при великих товщина – до 3 мм. Глибина зони термічного впливу в залежності від оброблюваного матеріалу та умов обробки коливається в межах від 0,05 до 0,6 мм, відносний знос інструменту 15 – 25 %.

Основним недоліком способу анодно-механічного різання є необхідність в частій заміні стрічки-електрода, що пов'язано з її надто великим відносним зносом. Це приводить до значних втрат часу на її поновлення, а також до додаткових втрат коштів на її виготовлення, монтаж та демонтаж.

Електроконтактне різання (ЕКО – електроконтактна обробка) здійснюється дисковим електродом-інструментом, що обертається з великою швидкістю (колова швидкість більше 25 м/с), на постійному струмі в воді та на змінному струмі в повітрі (рис. 1.5). Напруга живлення – до 50 В. В якості джерела живлення як правило використовується зварювальний випрямляч потужністю от десятків до сотнею кіловат.

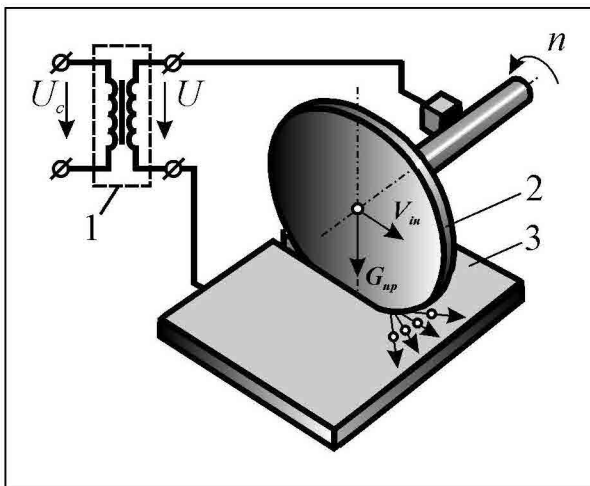


Рис. 1.5. Схема процесу електроконтактного різання:

- 1** - трансформатор;
- 2** - дисковий ЕІ;
- 3** - ЕЗ

При електроконтактному різанні в загальному випадку можуть одночасно діяти три джерела теплоти [4, с. 202]:

- механічне;
- електроконтактне;
- електроерозійне.

Так, при невисокій напруги U (1...2 В) переважне значення має механічне тертя; при напруги, що лежить у межах $2\text{В} < U < 10\text{ В}$, електрична енергія перетворюється в теплову завдяки контактному опору в місці торкання ділянок електродів, при цьому електричні розряди відсутні; при напруги більш 10 В процес стає чисто електроерозійним, тому, що напруга достатня для виникнення дугового розряду та переносу зарядів через плазмовий канал без торкання електродів один з одним. Останній різновид називають *електро-контактно-дуговим різанням*, в якій роллю власно механічних та контактних явищ можна нехтувати.

За даними роботи [4] при електроконтактно-дуговому різанні плазмовий канал розряду може створюватися не тільки пробосом між електродного проміжку. Завдяки обертанню та подачі електрода-інструмента в процесі обробки можливі короткочасні контакти між невеликими ділянками на поверхні електродів. Коли ці ділянки далі віддаляються один від одного, між ними виникають електричні розряди. Розряди не припиняються, коли електродні плями на вказаних ділянках завдяки обертанню електрода-інструмента віддаляються один від одного на відносно великі відстані.

Під час дугової стадії розряду на електроерозійний процес впливає тангенціальний відносний рух поверхні електрода-інструмента. Внаслідок своєї в'язкості пари робочого середовища, що розташовані поблизу до поверхні електрода-інструмента, рухаються із швидкістю, яка дорівнює колової швидкості точок на периферії електрода-інструмента. Шари робочого середовища біля електрода-заготовки практично нерухомі.

При грубих режимах електроконтактного різання максимальний радіус каналу досить великий (декілька міліметрів), тому лунка на електроді-заготовки, що утворюється, має великі розміри (іноді витягнута в напрямку обертання диску. Основна частка речовини із лунки

викидається у вигляді крапель розплаву, причому рідкий метал видаляється безперервно за мірою плавлення матеріалу заготовки.

ЕКО застосовується для різання труб та сортового прокату, відрізування літників тощо. Продуктивність електроконтактного різання досягає $100 \text{ см}^2/\text{хв}$. Відносний знос дискового електрода-інструмента при роботі в воді складає 10 – 20 %.

Недоліки процесу електроконтактного різання:

- верстат постачається дуже потужним приводом обертання дискового електрода-інструмента;
- верстат має велику масу;
- великий діаметр диска, що обертається;
- великий знос диску потребує частої його заміни та коштів для виготовлення, монтажу та демонтажу.

Плазмове різання. Для отримання плазми розроблений ряд спеціальних пристроїв, що називаються плазмотронами. Найбільш поширені плазмотрони, в яких нагрівання газу до необхідної температури здійснюється електричним дуговим розрядом.

В дугових плазмотронах плазма може бути отримана при різних видах взаємодії дуги з газом, що утворює плазму. Дані гази можуть бути різні. Стабілізація дуги в плазмотроні може здійснюватися *аксіальним потоком газу*, що створює шар, який обмежує стовп дугового розряду. При *тангенціальній подачі газу* в дугову камеру плазмотрону стабілізація досягається за рахунок вихрового потоку плазмотвірного газу. Найбільш ефективним способом стабілізації дугового розряду в плазмотроні та підвищення його питомих енергетичних характеристик є обмеження діаметра стовпа дугового розряду *стілкою, що охолоджується*. Звичайно ця стінка виконується у вигляді мідного сопла, що охолоджується водою. Сопло має порівняно невеликий діаметр, який обмежує зовнішній діаметр

дуги. В реальних умовах в плазмотроні може застосовуватися одночасно декілька способів стабілізації стовпа дугового розряду.

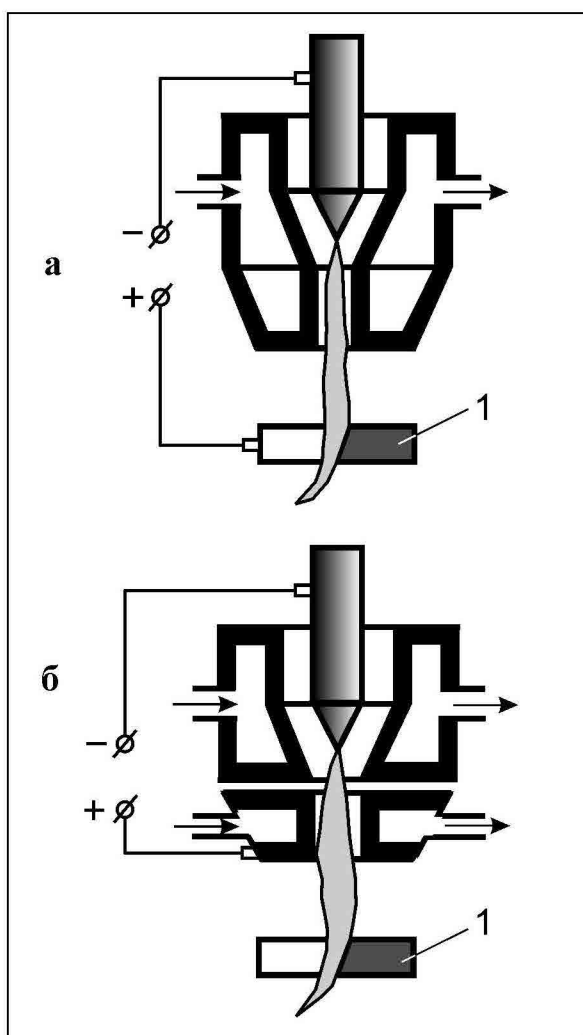


Рис. 1.6. Схеми плазмового різання:
а - плазмотрон прямої дії;
б - плазмотрон непрямої дії

Розрізняють три основні принципові схеми плазмотронів. В перших двох схемах (рис. 1.6, а, б) для отримання плазми використовується електричний дуговий розряд, а в третій – нагрівання газу та утворення плазми здійснюється за рахунок безелектродного високочастотного індукційного розряду. Схема, що показана на рис. 1.6, а, отримала назву *плазмової дуги*, а плазмотрон для її отримання – *плазмотрон прямої дії*. Якщо виріб 1 електрично не зв'язаний з плазмотроном (рис. 1.6, б), то схема називається *плазмовим струменем*, а плазмотрон носить назву *плазмотрона непрямої дії*.

Найбільш широко в якості газів, що утворюють плазму, використовуються аргон, гелій, азот, водень, кисень та повітря.

Основними характеристиками плазмового джерела енергії є його *ефективна теплова потужність*, що визначає відношення кількості тепла, яке вводиться в основний метал, до часу та *коефіцієнт зосередженості*, що визначає розподіл питомого теплового потоку за поверхнею виробу, який обробляється. Для плазмової дуги ефективна теплова потужність визначається за формулою

$$q = U \cdot I \cdot \eta_i,$$

де U – напруга дуги;

I – сила струму дуги;

η_i – ефективний коефіцієнт корисної дії процесу плазмового нагрівання, який враховує втрати енергії при передачі її до виробу.

Розподіл температури плазмової дуги та плазмового струменю за радіусом та за довжиною вкрай нерівномірний. Максимальна температура спостерігається в центрі на осі плазмового струменя, причому вона значно вище, ніж у відкритій дуги. Густина теплового струменя для плазмових джерел енергії вище, ніж для відкритої дуги, та досягає 10^6 Вт/см².

Плазмове різання має певні переваги, порівняно з різанням механічним інструментом:

- незначна залежність продуктивності обробки від механічних властивостей матеріалів, що розрізаються;
- можливість різання заготовок значної товщини (до 250 – 300 мм);
- можливість різання заготовок будь-якої конфігурації.

Існує два основних різновиду плазмового різання:

- розділове, коли метал прорізується на усю глибину;
- поверхневе, що називається струганням.

В основі процесу лежить локальне розплавлення металу в зоні різку та вилучення його у рідкій фазі за рахунок гідродинамічних сил, що створюються потоком плазми. При цьому відсутній силовий контакт між інструментом та заготовкою, а на поверхні різку залишається шар оплавленого металу в декілька десятків часток міліметра.

Розділове плазмове різання (РПР) широко застосовується у промисловості та будівництві у якості як попередньої, так і остаточної операції виготовлення деталі. У ливарному виробництві за допомогою РПР вилучають літникові системи на відливках із чавуну та інших важкооброблюваних матеріалів. Причому, різання може здійснюватися як в холодному, так і в гарячому стані відливки. Крім того, РПР застосовують для різання чавунних труб та розкрою сортового і листового прокату.

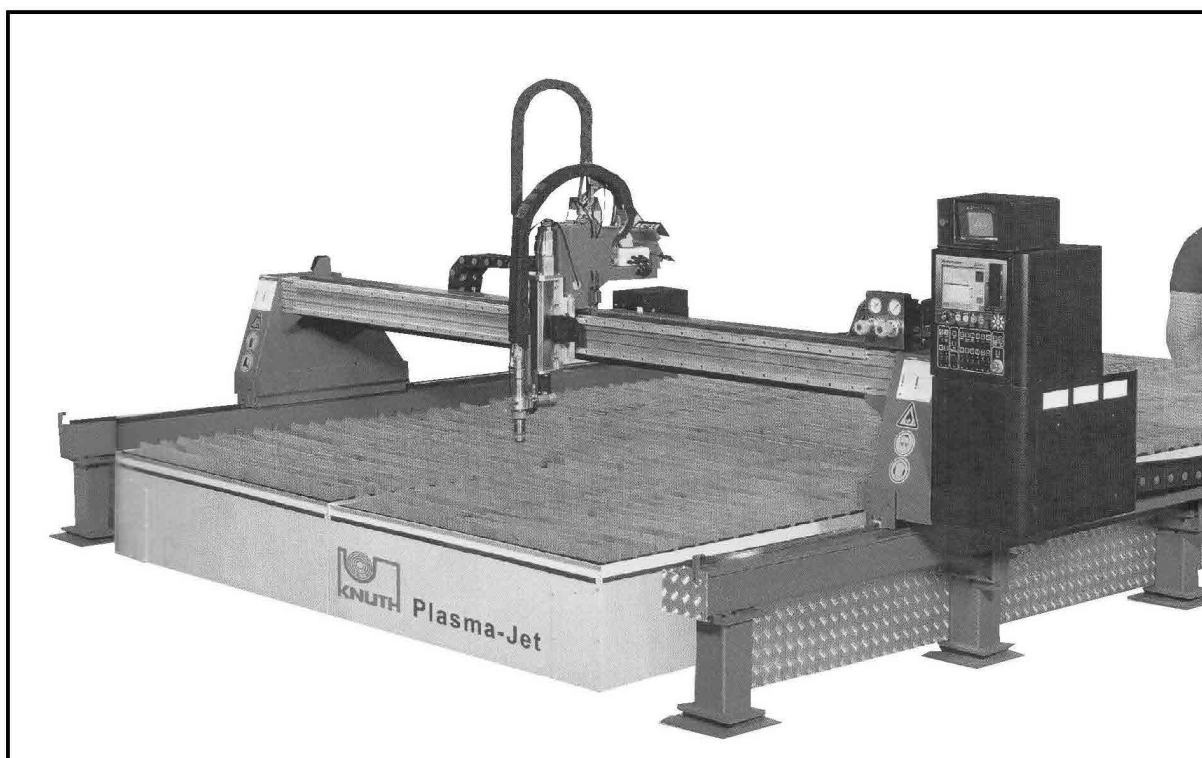


Рис. 1.7. Установка плазмового різання Plasma-JetDS

На рис. 1.13 наведена установка плазмового різання Plasma-Jet DS. Дана установка має: ЧПК Burny Phantom; лінійні напрямні за трьома осями; двобічний привод порталу; динамічні сервоприводи (АС) змінного

струму за трьома координатами з безззорним планетарним приводом; розраховані на безперервну роботу малозносні зубчасто-рейкові приводи; джерело плазми у відповідності з виробничим завданням; автоматичне керування висотою плазмового струменя головки, що ріже; окремий стіл для плазмового різання з високим допустимим навантаженням сталевих конструкцій; швидко заміну головки, що ріже за допомогою спеціального пристрою; магнітний тримач головки, що ріже.

Джерела живлення плазмотронів постійного струму дуже різноманітні за своїми параметрами та за схемними рішеннями. На початку застосовували стандартні джерела живлення для дугового зварювання (іноді по 2 – 3 в послідовному вмиканні). Однак особливості дугового розряду в плазмотроні вимагли створення спеціалізованих джерел живлення дуги. В теперішній час такі джерела серійно випускаються промисловістю (наприклад, випрямляч типу ВІР-602).

До недоліків плазмового різання слід віднести: необхідність *заміни багато коштовного електрода, частини пальника, що наближені до зони різання, часто виходять із ладу та потребують заміну*; дуже висока температура факелу, що значно перевищує температуру зварювальної дуги, *потребує дотримання особливих правил безпеки для оператора*.

Лазерне різання *основане на теплової дії лазерного випромінювання та відбувається при безперервному або періодичному переміщенні джерела тепла, яке сформоване у пляму з високою густиною потужності за допомогою спеціальної оптичної системи [8]. В залежності від конструктивних особливостей випромінювачів можлива реалізація безперервного або імпульсно-періодичного режиму лазерного різання. Для розкряю матеріалів більше розповсюдження отримало застосування лазерів безперервної дії. При цьому можливі різні механізми лазерного розділення, які основані на процесах: випаровуванні матеріалу, плавленні з*

додатковим вилученням розплаву із зони різання, хімічних реакцій горіння, розкладом з виділенням летучих з'єднань тощо. Крихкі матеріали можна розділяти методом терморозколювання. Останній метод ґрунтується в нанесенні не наскрізного різку, або серії отворів з подальшим розломом по лінії різку.

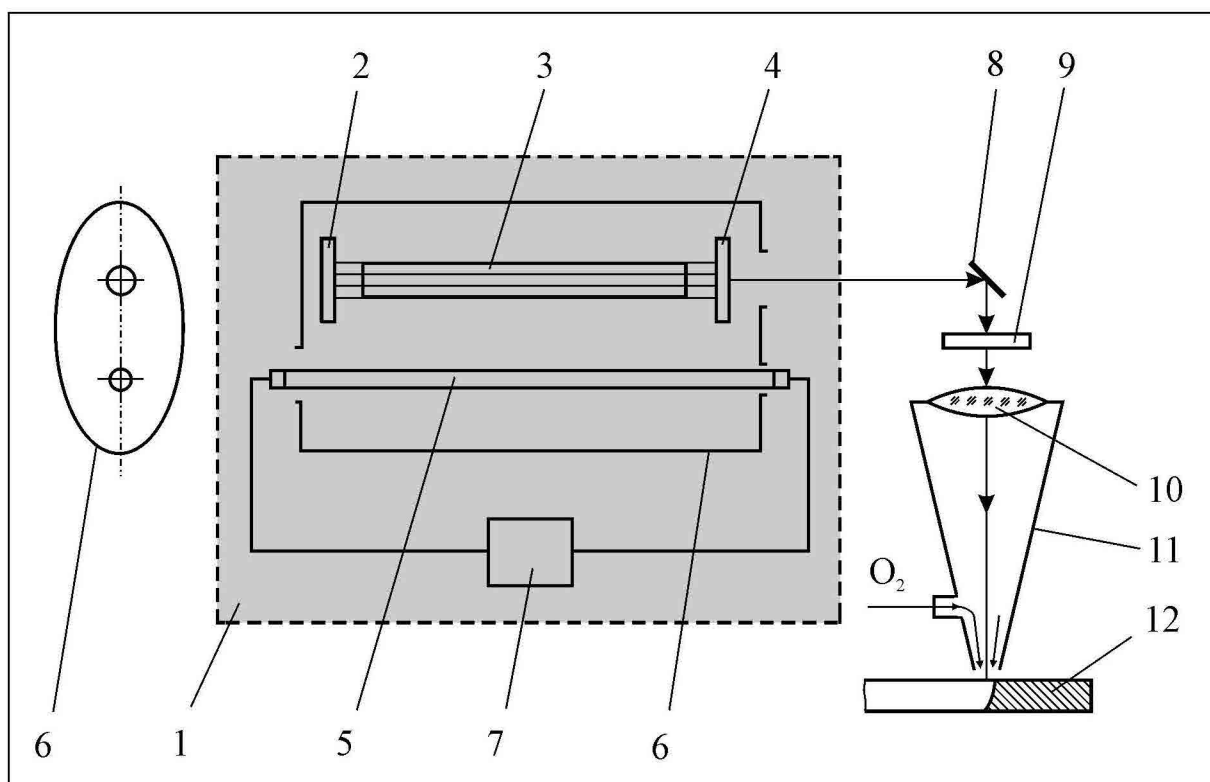


Рис. 1.8. Схема газолазерного різання матеріалів з співісною подачею струменя газу: 1 - оптичний квантовий генератор (ОКГ) або лазер; 2 - дзеркало; 3 - стрижень (синтетичний рубін); 4 - напівпрозоре дзеркало; 5 - газорозрядна лампа-вспалах; 6 - кожух, що відбиває світло; 7 - високовольтна батарея конденсаторів; 8 - поворотне дзеркало; 9 - заслонка; 10 - лінза, що фокусує; 11 - сопло; 12 - заготовка

Схема газолазерного різання матеріалів показана на рис. 1.8. Енергія у вигляді когерентного (постійної довжини хвилі) випромінювання генерується в оптичному квантовому генераторі 1 (ОКГ), який власне і є лазером. Стрижень 3, що виготовлений із робочої речовини (наприклад із синтетичного рубіну), розташовується між двома дзеркалами 2, 4. Дзеркало 2 повністю відбиває усі проміні, що на нього падають, а дзеркало

4 є напівпрозоре. Для накачування енергії використовується газорозрядна лампа-вспалах 5, яка для більшої ефективності опромінення кристала поміщається разом з ним усередину кожуха 6, що відбиває, який має поперечний переріз у вигляді еліпса. При розташування лампи 5 та кристала 3 в фокусах еліпса створюються найкращі умови рівномірного освітлення кристала. Живлення лампи-вспалаха 5 звичайно здійснюється від спеціальної високовольтної батареї конденсаторів 7. Отримане когерентне випромінювання після проходження крізь напівпрозоре дзеркало 4 відбивається від поворотного дзеркала та спрямовується до лінзи 10, що фокусує. При цьому енергія концентрується в точці, що приводить до суттєвого зростання температури. Найбільше розповсюдження отримав спосіб різання матеріалів лазерним випромінюванням з співвісною променю лазера подачею струменю кисню в зону різання.

Найбільш характерними параметрами випромінювання ОКГ, керування якими дає можливість отримувати певні ефекти, можна вважати:

- потужність випромінювання для ОКГ безперервної дії або енергію випромінювання та час імпульсу для пристроїв, що працюють в імпульсному режимі;

- довжину хвилі випромінювання;
- густину променевого потоку;
- зміну положення променя у часі.

Прибори керування параметрами випромінювання можуть бути вбудовані в конструкцію лазера або можуть знаходитися поза її у вигляді функціональних блоків.

Вибір типу та конструкції лазера повинен забезпечувати отримання необхідної потужності або енергії променю. Для керування цими параметрами використовується модуляція інтенсивності накачування за

рахунок зміни сили струму розряду лампи-вспалах у твердотільних лазерах, зміни сили струму в розрядній камері – в газових лазерах та за рахунок зміни сили, що тече крізь *p-n*-перехід, – в напівпровідникових ОКГ інжекційного типу. Існують і інші методи керування потужністю променя, наприклад способом подвійного променепереломлювання або застосуванням комірки Поккельса.

Довжина хвилі випромінювання звичайно суворо фіксована та залежить від типу робочої речовини, схеми та конструкції ОКГ. Робоча частота випромінювання визначає особливості його взаємодії з речовиною, можливості фокусування та відхилення променя. Розроблені ОКГ з плавною зміною частоти, яка здійснюється при пропусканні когерентного випромінювання через спеціальні кристалічні системи на основі ніобіта літію, титанату барію та інші. При використанні в якості джерела ОКГ на іттрієво-алюмінієвому гранаті створені параметричні генератори з плавним перестроюванням частоти в діапазоні довжин хвиль $\lambda = 0,55 - 3,65$ мкм.

Фокусування випромінювання ОКГ, як правило, проводиться з технологічною метою, коли необхідно збільшити густину променевого потоку у плямі нагрівання. Діаметр пучку, що виходить із резонатора лазера, звичайно дорівнює 5 – 80 мм і для фокусування частіше всього використовується система лінз, рідше – система дзеркал.

Керування переміщенням лазерного променя у просторі досягається застосуванням систем сканування. Найбільше розповсюдження отримав електрооптичний метод, який дозволяє отримувати високі швидкості відхилення та високу здатність дозволення. Сутність цього методу полягає в тому, що прикладене до електрооптичного елемента (кристалу) електричне поле викликає зміну показника заломлення в напрямку, що перпендикулярний напрямку розповсюдження пучка світла, а це викривляє його траєкторію.

Деяка частина потоку променевої енергії, що падає на поверхонь, поглинається, а інша – відбивається. Доля енергії, що відбивається, залежить від довжини хвилі випромінювання та стану поверхні речовини. Коефіцієнт відбиття змінюється в межах від 0,4 до 0,97. Для поверхонь, що покриті окислами та що мають більшу шорсткість, коефіцієнт відбиття зменшується. Можна досягнути того, що від 20 до 40 % енергії світлового потоку буде поглинатися речовиною.

Енергія випромінювання, що поглинається речовиною, передається електронам, у зв'язку з чим глибина проникнення світлової енергії в речовину відповідає середньої довжини їх пробігу. Для більшості речовин ця глибина складає $(5...50) \cdot 10^{-3}$ мкм. Подальша передача енергії із цієї зони в глибину речовини здійснюється за рахунок теплопровідності. У відміну від електронного променя енергія світлового випромінювання при взаємодії із речовиною в основному перетворюється в теплоту, а частка рентгенівського випромінювання, що виникає при цьому, дуже мала. Чим більша густина потоку випромінювання, тим більша глибина проплавлення, а починаючи з деякого значення відбувається випаровування речовини. При подальшому підвищенні концентрації енергії частка випареної речовини починає різко зростати, утворюються окремі краплі та частки речовини, які за рахунок дії парів викидаються із зони обробки.

Поверхня різку при невеликих швидкостях обробки являє собою сукупність рівномірно розташованих борозен. Для швидкостей різання, які перевищують деяку межу, різ отримується більш гладким, тобто без явно виражених борозен. Борозне-утворення на поверхні різки спостерігається при швидкостях обробки менших 2,5 м/хв.

На поверхні різки виділяються три зони:

- зона I характеризує руйнування, що періодично протікає від верхньої кромки всередину металу. Деякий нахил борозен у напрямку обробки залежить від переміщення передньої частини лазерного джерела із

швидкістю v в процесі різання у межах ширини утвореної у верхній кромки заготовки борозни з одночасним її поглибленням всередину металу зі швидкістю руйнування;

- зона II, що розташована нижче, хоча і формується безперервно, але також має структуру у вигляді борозни (однак менш виражену) внаслідок періодичного вилучення продуктів руйнування під дією струменя кисню із зони I. Нахил борозен зони II в напрямку, протилежному напрямку різання, визначається нахилом поверхні руйнування, що протікає безперервно. Для більш низьких швидкостей різання нахил борозен зменшується як для зони I, так і для зони II;

- зона III вказує на продовження процесу різання, але без участі лазерної енергії, а тільки лише за рахунок струменя кисню та перегрітого металу, що видувається із зони обробки. При цьому швидкість різання металу різко знижується (про що свідчить значний нахил борозен до кромки різку).

Встановлено, що ширина різку у верхній кромки більша, чим в середній його частині, а в зоні III спостерігається розширення різку.

Дослідження показали, що зона I має найменше значення шорсткості Rz . Для досягнення якісних поверхонь різання, коли шорсткість не перевищує величини $Rz = 40 \dots 50$ мкм, необхідно обмежувати швидкість для запобігання утворення на поверхні різання зони III.

Важливим фактором, що визначає як характер протікання процесу різання металів, так і розмірні характеристики виконаного різання, є густина потужності в зоні дії лазерного випромінювання W_p . Цей параметр є комплексною величиною та залежить не тільки від потужності лазерного випромінювання, але й від умов його фокусування, модового складу променя, його точності фокусування, діаметра на виході із резонатора та інших факторів. Густина потужності у фокальній плямі можна підрахувати за формулою

$$W_p = \frac{4P}{\pi d_0^2},$$

де P – потужність лазерного випромінювання.

Зменшення фокальної плями викликає зростання глибини якісно виконаного різь. Основною причиною такого зростання глибини різь є підвищення густини потужності в зоні обробки. Тому при різанні вуглецевих сталей необхідно прагнути до фокусування випромінювання в плями меншого діаметра (використовувати установки з кращім фокусуванням лазерного пучка, що працюють в одномодовому режимі, застосовувати більш короткофокусні лінзи тощо).

Не менш важливим фактором, що впливає на розмірні параметри різання, є тиск робочого газу, що продувається в зону обробки з співвісно лазерному променю. Підвищення тиску до 0,35 – 0,4 МПа приводе до пропорційного росту глибини різь. При подальшому зростанню тиску глибина різання стабілізується, а далі повільно знижується. Останнє пов'язано із інтенсифікацією вилучення продуктів реакції горіння сталі та підсиленню екзотермічної реакції.

Сучасні установки з ЧПУ моделі Laser-Jet для лазерного різання деталей із листа постачає Германія (рис. 1.9).

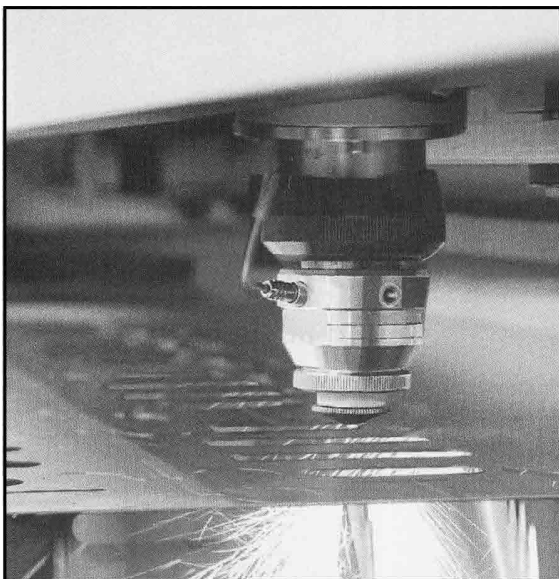


Рис. 1.9. Робоча зона установки для лазерного різання моделі Laser-Jet

До недоліків лазерного різання належить *залежність продуктивності обробки від теплопровідності матеріалу*, що розрізається. Так, при різанні мідного листового матеріалу велика частка енергії лазерного променя поглинається матеріалом, що розрізається. Тому продуктивність різко падає.

Кожен із цих методів володіє певними перевагами та недоліками, які обумовлюють їх раціональну область використання. В більшості випадків *продуктивність процесу різання є визначальною* при виборі того чи іншого способу різання.

1.2. РОД як високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів

За роботами Носуленка В. І. [9, 10] відомий високопродуктивний спосіб розмірної обробки металів електричною дугою.

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 ВТЗ-1 – 36000 мм³/хв.;
- для твердого сплаву ВК-15 – 3700 мм³/хв.

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

Однак, процес РОД не знайшов застосування для ефективного різання металів із-за ряду проблем:

- якщо виготовити електрод-інструмент із графіту марки МПГ 7, як матеріалу, що забезпечує мінімальний лінійний знос ЕІ, із застосуванням багатозонного прокачування [11], то такий ЕІ може забезпечити ширину різання на рівні 4,5 – 6,5 мм. Це найбільша мінімальна ширина різання із усіх відомих методів різання [8, с. 6]. Тому даний процес різання стає недоцільним;

- якщо виготовити ЕІ із сталі, його мінімальна ширина може зменшитися приблизно на 1 мм, але вартість виготовлення такого ЕІ зростає в зв'язку з необхідністю свердлення тонких глибоких отворів в сталі. Крім того, суттєво зростає лінійний знос сталевих ЕІ (до 50 – 100 %), тому витрата сталевих електродів-інструментів зростає. Так, що і цей шлях є хибним:

- в роботі Василенка В. П. [12] зроблена спроба реалізувати технологічну схему електродугового формоутворення різання з компенсацією зносу електрода-інструмента шляхом паралельного протягування в робочій зоні двох дротових електродів-інструментів. При даному способі різання (рис. 1.10) робоча рідина (технічна вода) прокачується через штучну щілину 1 між двома дротовими електродами-інструментами 2, 3,

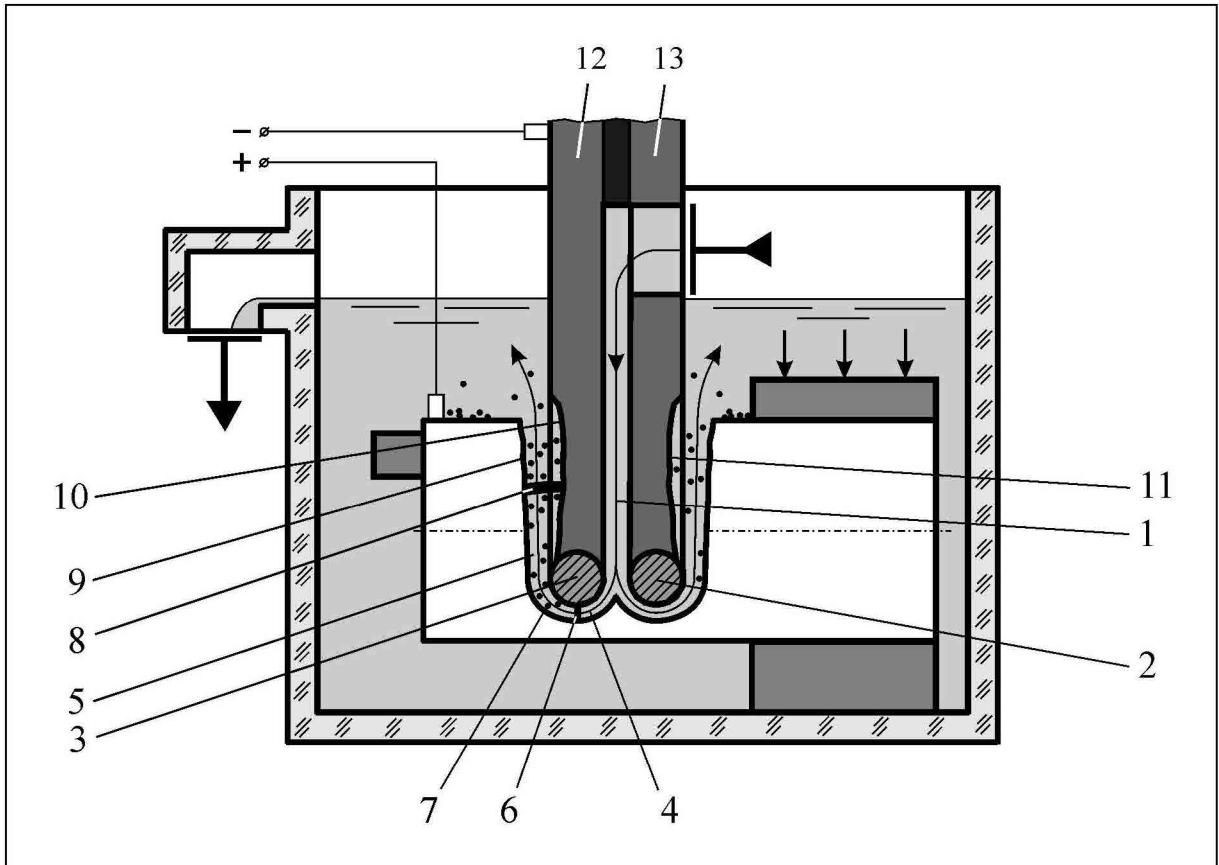


Рис. 1.10. Схема способу електродугового різання дротовими електродами-інструментами в використанні прямого прокачування технічної води

шириною 0,3 мм (пряме прокачування), в торцевий 4 та далі бічний 5 міжелектродні зазори. В торцевому зазорі збуджується електрична дуга 6, яка потужно стиснута динамічним тиском робочої рідини. Вона має найменші геометричні параметри (висоту, діаметр) та найбільшу концентрацію енергії. Оскільки паралельні дротові електроди-інструменти безперервно протягуються, електрична дуга 6 весь час різання горить на новому місці. Це компенсує знос електродів-інструментів. Продукти ерозії 7 від горіння дуги, що являють собою металевий порошок із металу, який руйнується, рухаються із торцевого зазору 4 бічний 5 за рахунок того ж динамічного потоку рідини. Однак швидкість потоку безперервно зменшується (за рахунок його розсіювання), тому і швидкість руху часток в бічному зазорі теж зменшується. Таким чином, створюються умови для концентрації часток в бічному зазорі. Результатом цього явища є

виникнення довгих (малостиснутих) дуг 8, які, з одного боку утворюють похилу поверхню різу 9, збільшують час різання (об'єм металу, що руйнується збільшується), а з другого боку руйнують стінки 10, 11 електродотримачів 12, 13, що, в свою чергу, погіршує експлуатаційні характеристики даного (відомого) способу різання. Крім того, технічна вода, як робоча рідина, ні є досконалою, так як частково проводить електричний струм. За цією причиною частина енергії, що підводиться до електродів, не використовується ефективно (для різання).

Якщо застосувати пряме прокачування, з метою усунення камери 3, то навіть при зануренні заготовки в ванну, виникає небезпечна з пожежної точки зору ситуація, коли органічне середовище в струминному режимі (під тиском) витікає із ванни.

Отже, спосіб різання металів електричною дугою, який використовує дану технологічну схему формоутворення, ні є конкурентно-здатний.

1.3. Узагальнення результатів огляду сучасних способів різання металів та обґрунтування напрямку досліджень

Із викладеного вище виходить, що для удосконалення способу електродугового різання дротовим електрод-інструментом необхідно забезпечити при задовільній ширині різу наступні переваги:

- підвищення продуктивності різання шляхом повного використання електричної енергії, що підводиться до електродів;
- підвищення точності різання за рахунок формування бічного між-електродного зазору без утворення похилої поверхні різу;
- підвищення якості різання шляхом ведення процесу без утворення довгих (нетиснутих) дуг в бічному міжелектродному зазорі;
- ведення процесу без руйнування дугою стінок електродотримачем.

В роботі удосконалення процесу електродугового різання дротовим електрод-інструментом досягається за рахунок використання зворотного прокачування органічного середовища. Даний процес не був об'єктом реалізації та дослідження, а тому його технологічні характеристики не відомі. Останнє стримує впровадження його у виробництво. Саме тому процес електродугового різання дротовим електрод-інструментом з використанням зворотного прокачування органічного середовища є предметом дослідження теперішньої роботи.

Таким чином, метою дослідження є удосконалення процесу електродугового різання дротовим електрод-інструментом шляхом застосування зворотного прокачування органічного середовища.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати аналіз сучасних способів різання металів;
- запропонувати та обґрунтувати нову технологічну схему формування різку при електродуговому різанні металів дротовим електродом-інструментом з використанням зворотного прокачування органічного середовища;
- розробити методику експериментального дослідження технологічних характеристик електродугового різання;
- виконати експериментальне дослідження продуктивності електродугового різання металів дротовим електрод-інструментом з використанням зворотного прокачування органічного середовища;
- виконати експериментальне дослідження точності та якості електродугового різання металів дротовим електрод-інструментом з використанням зворотного прокачування органічного середовища.

Розділ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ**2.1. Обґрунтування технологічної схеми формоутворення різку при електродуговому різанні металів дротовим електрод-інструментом з використанням зворотного прокачування органічного середовища**

В способі електродугового різання металів дротовим електрод-інструментом, що пропонується, використовується нова технологічна схема формоутворення (рис. 2.1). Електричну дугу збуджують в гідродинамічному потоці робочої рідини між електрод-заготовкою та складеним електрод-інструментом, який включає в себе два паралельні дроти, які протягують по поверхні спеціального електрода. Органічну робочу рідину нагнітають в герметичну камеру під технологічним тиском, а відводять с продуктами ерозії крізь щілину між дротами.

Перед початком дослідження електрод-заготовку 1 закріплюють відносно плити 2 шпинделя 3 верстата за допомогою тримача 4, а електрод-інструмент закріплюють на плиті верстата 5 за допомогою тримача 6 та електродотримача 7. Герметичну камеру 8 закривають, вмикають верста, привід пристрою і здійснюють процес різання. Електричну дугу 9 збуджують в гідродинамічному потоці 10 органічної робочої рідини між електродом-заготовкою 1 та електрод-інструментом, який складається з двох паралельних дротів 11, 12, які протягують по поверхні 13 електродотримача 7. Робоча рідина подається під тиском в зону різання порожнину 14 герметичної камери 8, а відводиться разом з продуктами ерозії 15 крізь щілину 16 між дротами 11, 12. Ширина щілини 16 (с) менша

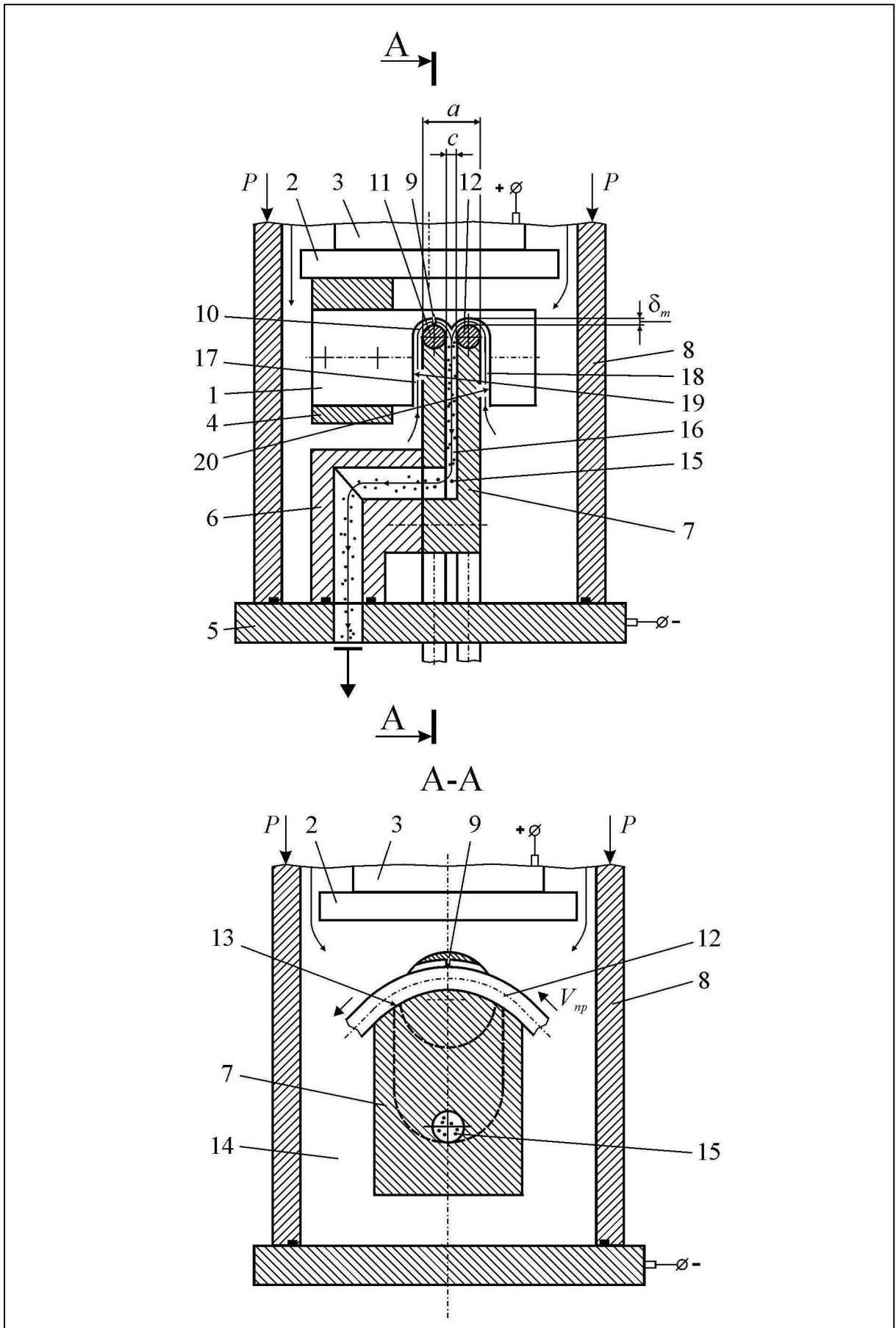


Рис. 2.1. Технологічна схема формотворення різь, що пропонується

або дорівнює двом торцевим міжелектродним зазорам (δ_m). Під дією гідродинамічного потоку 10 дуга 9 стискується, при цьому енергетичні параметри підвищуються, що підвищує якість поверхні різку. Довгі малостиснуті дуги не утворюються так, як продукти ерозії 15 в бічних міжелектродних зазорах 17, 18 відсутні. Це дозволяє підвищити точність різання за рахунок формування поверхонь 19, 20 без нахилу та забезпечити процес без руйнування стінок електродотримача 7. Подача електродотримача 7 з дротами 11, 12 в напрямку розрізування здійснюється автоматично. При оптимальній відстані c технологічний виступ між дротами 11, 12 не утворюється. Завдяки протягуванню дротів точність різання зростає, а витрати на електрод-інструмента зменшуються.

2.2. Методика експериментального дослідження технологічних характеристик електродугового різання

2.2.1. Прийняття рішень перед плануванням експерименту [13].

На підставі апріорної інформації було вибрано два фактори (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Матриця планування експерименту (план 2^2)

Фактори		I, A	$P_{ст}, MPa$	$M,$ мм ³ /хв.	$M_a,$ мм ³ /А·хв.	$a,$ кВт·год/кг	$\delta_s,$ мм	$Ra,$ мкм		
Основний рівень		15	1,3							
Інтервал варіювання		5	0,3							
Верхній рівень		20	1,6							
Нижній рівень		10	1,0							
Код		x_1	x_2	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5		
Номер досліджу	1	Порядок реалізації	3	+	+	60	3,00	21,61	0,26	8
	2		2	-	+	31	3,10	21,32	0,12	5
	3		4	+	-	105	5,25	12,00	0,29	11
	4		1	-	-	39	3,90	17,81	0,14	7
Досліди в центрі плану	1		0	0	61	4,07	15,56	0,23	7	
	2		0	0	64	4,27	14,93	0,22	8	
	3		0	0	59	3,93	16,19	0,22	7	
	4		0	0	53	3,53	18,02	0,19	7	

Ці фактори повинні впливати на технологічні характеристики процесу електродугового різання:

- сила технологічного струму $I (X_1)$, А;
- статичний тиск робочої рідини на вході в зазор $P_{ст} (X_2)$, МПа.

Усі вибрані фактори задовольняють умовам керованості, операціональності та однозначності.

Інші параметри процесу електродугового різання були зафіксовані на наступних постійних рівнях:

- напруга на електродах $U = 30$ В;
- склад робочої рідини:
 - масло «Індустріальне І-20А» ГОСТ 20790-75 – 50 %;
 - гас освітлювальний ГОСТ 4953-68 – 50 %;
- полярність обробки – пряма (зразок – «плюс»).

Після експерименту розраховувалися або вимірялися такі технологічні характеристики процесу електродугового різання, як :

- продуктивність обробки M , мм³/хв.;
- питома продуктивність обробки M_a , мм³/А·хв.;
- питома витрата електроенергії a , кВт·год/кг;
- бічний МЕЗ δ_b , мм;
- шорсткість поверхні різу Ra , мкм.

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:

$$x_1 = \frac{X_1 - 15}{5}; \quad (2.1)$$

$$x_2 = \frac{X_2 - 1,3}{0,3}; \quad (2.2)$$

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

$$N = P^k = 2^2 = 4. \quad (2.4)$$

Задача зводиться до будування лінійної математичної моделі вигляду

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i x_i, \quad (2.5)$$

де b_0, b_i - коефіцієнти регресії моделі.

Відповідно до вибраного плану (2^2) було проведено 4 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 електродугового різання:

- розраховуємо дисперсію дослідів за формулою [4, с. 13]

$$S_y^2 = \frac{\sum \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)^2}{f_1}, \quad (2.6)$$

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

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

f_1 - число ступенів свободи

$$f_1 = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3. \quad (2.7)$$

- *розраховуємо коефіцієнти регресії моделі за формулою [4, с. 14]*

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u}{N}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (2.8)$$

де N – число дослідів. $N = 4$;

- *перевіряємо статистичну значимість коефіцієнтів регресії.*

Перевірка містить розрахунок дисперсії оцінок, який виконуємо з використанням формули [4, с. 14]

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad (2.9)$$

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

$$\Delta b_i = t_{\alpha, f} S_{b_i}. \quad (2.10)$$

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:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2; \quad (2.11)$$

- перевіряємо гіпотезу про адекватність моделі за t -критерієм Стьюдента [4, с. 15]

$$t^{розр} = \frac{|b_0 - y_0| \sqrt{N}}{S_y}. \quad (2.12)$$

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 технологічних характеристик застосовувався електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «Дуга-8Г» [3] (рис. 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.

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

- власне, верстат 1, інструментальну головку якого виконано у вигляді жорсткої замкнутої рами із силовим замиканням за допомогою гідروциліндра;
- 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 керування верстатом.

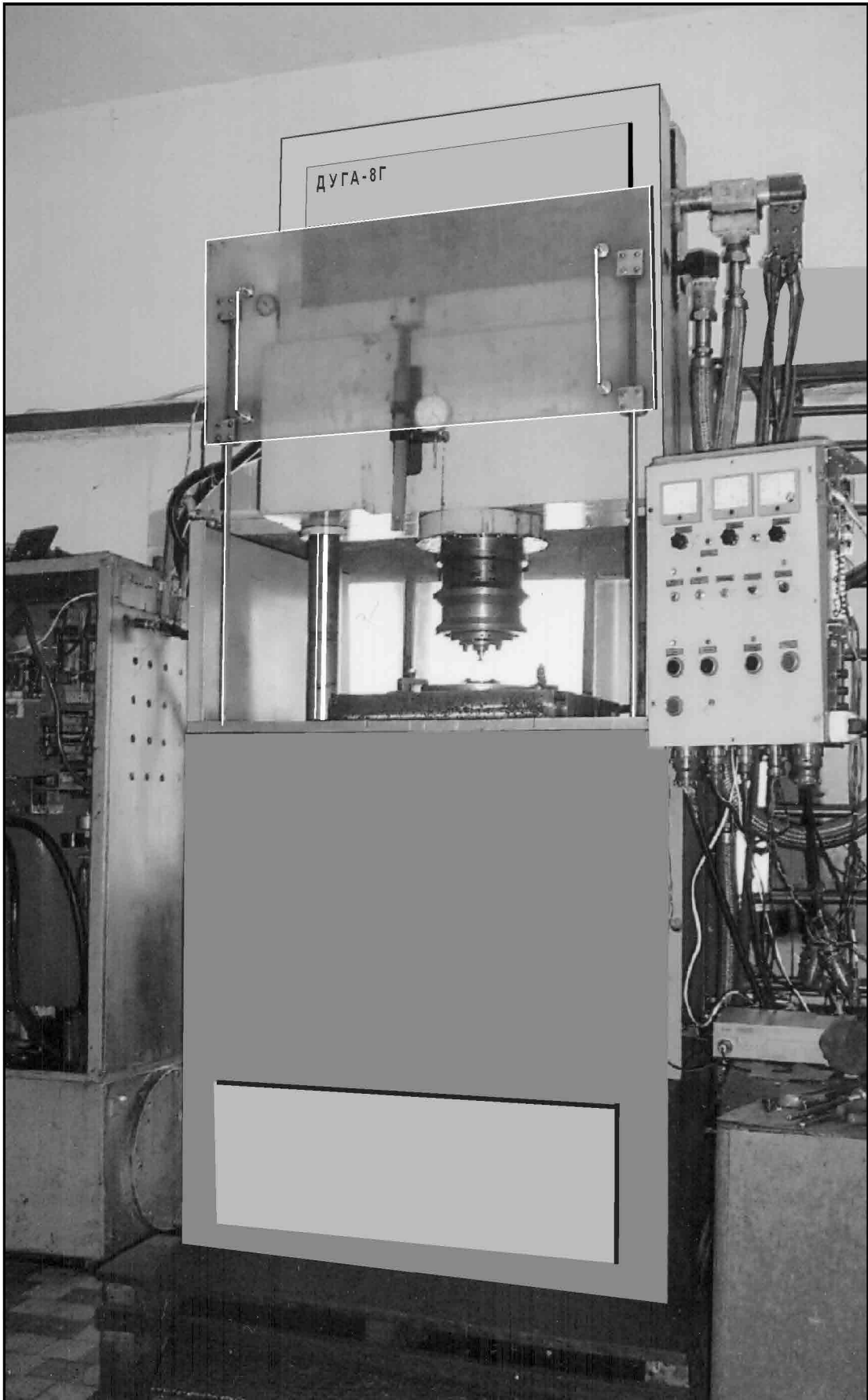


Рис. 2.2. Экспериментальный электроэрозионный верстат “Дуга-8Г”

Основні дані верстата «Дуга-8Г»

Розміри стола (довжина х ширина), мм	400 × 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 ³ /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 х ширина х висота), мм	1000 х 1000 х 2740
Маса верстата, кг	2100

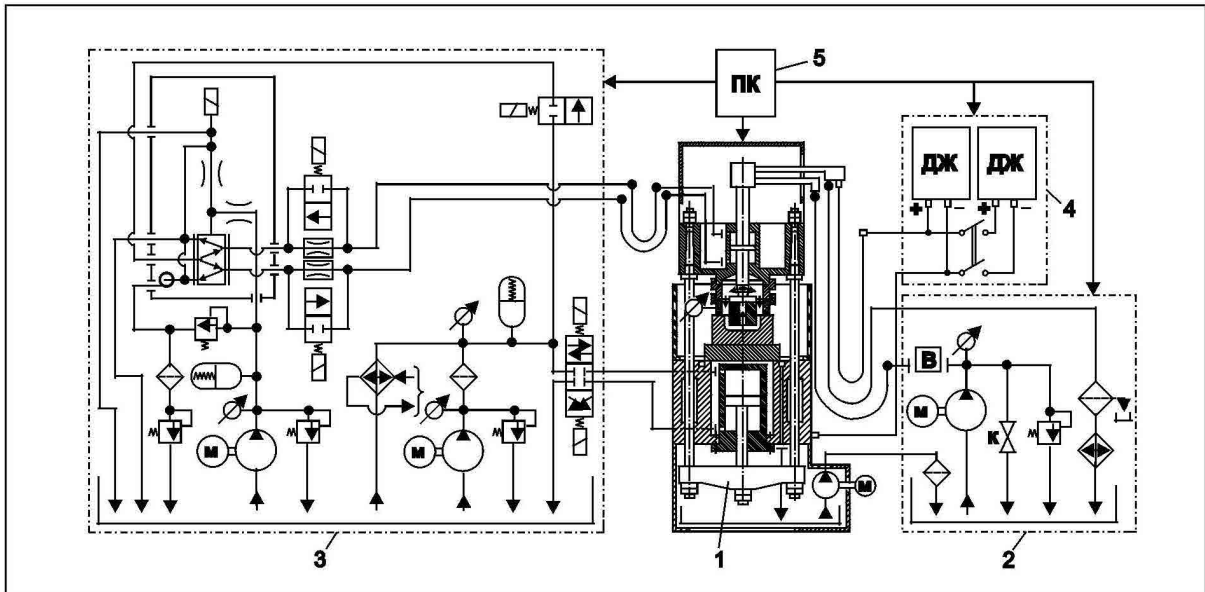


Рис. 2.3. Електрогідрокинематична схема експериментального копіювально-прошивного верстата моделі «Дуга 8Г»: 1 - верстат; 2 - станція робочої рідини; 3 - станція гідропривода; 4 - джерела живлення технологічним струмом (два зварювальних випрямляча ВДУ-504); 5 - пульт керування

2.3.2. Експериментальний пристрій. Для дослідження технологічних характеристик різання, спроектовано та виготовлено оригінальний експериментальний пристрій до електроерозійного верстата «Дуга-8Г» (рис. 2.4).

Пристрій складається з наступних деталей:

- механізм перемотування дроту ;
- тримача для регулювання вертикального положення платформи;
- плити для встановлення пристрою;
- стійки для позиціонування плити;
- тримача для позиціонування плити;
- тримача для розташування елементів ущільнення;
- тримач для тримання шибери;
- основи та тримача електрод-інструмента та інших деталей.

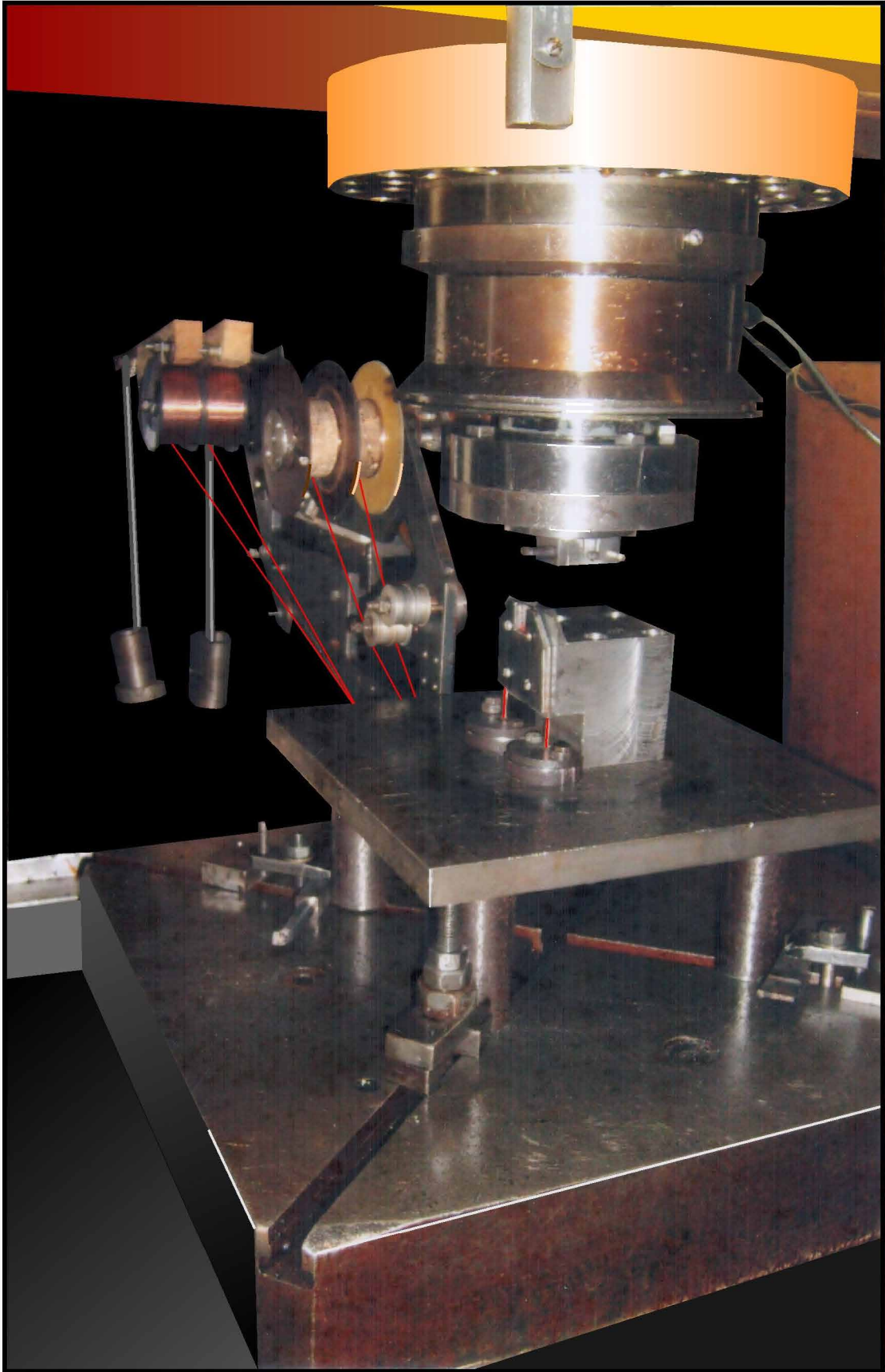


Рис. 2.4. Експериментальний пристрій для електродугового різання металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища (верстат "Дуга-8Г")

Робота пристрїя полягає у наступному. Перед початком роботи електрод-заготовку закрїплюють вiдносно тримача. Закривають герметичну камеру верстата за допомогою гiдравлiчного приводу. Вмикають електродвигун насосної установки подачi робочої рiдини в зону обробки, електродвигун механiзму перемотування дротiв та вмикають джерело живлення технологiчним струмом i ведуть електродугове рiзання металiв дротовими електрод-iнструментом.

2.4. Матерiали, зразки та вимiрювальний iнструмент

В якостi електрода-iнструмента використовувався зварювальний сталевий дрiт дiаметром 0,8 мм з мiдним покриттям.

Зразки (електроди-заготовки) дiаметром 8 мм, довжиною 100 мм, виготовлялися iз сталi 45.

В якостi контрольно-вимiрювальних приборiв та iнструмента застосовувалися:

- для керування силою струму: кiлоамперметр типу М367;
- для контролю напруги: вольтметр типу М4200;
- для керування статичним тиском робочої рiдини на входi в мiжелектродний зазор: манометр типу М1-2-2;
- для вимiрювання часу обробки: секундомiр iз цiною подiлки 0,05 с;
- для вимiрювання геометричних параметрiв електрода-iнструмента та електрода-заготовки: штангенциркуль типу ШЦЦ-I-125-0,01 iз цiною подiлки 0,01 мм;
- для вимiрювання лiнiйного перемiщення шпинделя подачi електрода-iнструмента: iндикатор годинникового типу ИЧ-25;
- для вимiрювання шорсткостi поверхнi пiсля РОД: еталони електроерозiйної шорсткостi.

2.5. Техніка безпеки при експериментальному дослідженні

При різанні дротовим електрод-інструментом розмірною обробкою дугою необхідно враховувати умови експлуатації, щоб при дії вологи, механічних коливань, температури. Високих і низьких тисків, агресивних речовин, електромагнітних випромінювань і т.п., обладнання не стало небезпечним.

При обслуговуванні електроерозійних верстатів і оснащень необхідно дотримуватись основних правил безпеки, а саме: не проводити ніяких вимірів на працюючому обладнанні; застосовувати безпечні прийоми встановлення на верстат важких деталей, застосовувати робочі рідини які не є шкідливими для здоров'я людини.

Досліднику який буде працювати під час дослідів необхідно дотримуватись правил від ураження електричним струмом: при роботі верстата не можна торкатися його струмопровідних частин; при виконанні ремонту перевірити відключення верстата від усіх джерел живлення; перевірити заземлення верстата; біля верстата необхідно мати гумовий килимок. Процес обробки здійснюється в рідких середовищах, які уявляють собою горючі речовини (гас, масло) і будь-яке порушення правил експлуатації може призвести до спалаху, тому наявність вогнегасника при дослідженні є обов'язковим.

Перед початком робіт дослідник повинен одягнений в спеціальний одяг. Встановлювати заготовки і оснащення обережно, щоб не травмуватися, кріпити спеціальним інструментом. Коли підготовчі роботи виконані, обережно включити обладнання, джерела струму електричної напруги і починати процес обробки. Після завершення процесу різання, виключити джерела енергії і привід оснащення, та підняти робочу камеру у гору, виключити станцію гідроприводу і зняти заготовку.

Розділ 3

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ
ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РІЗАННЯ МЕТАЛІВ ДРОТОВИМ
ЕЛЕКТРОД-ІНСТРУМЕНТОМ З ВИКОРИСТАННЯМ
ЗВОРОТНОГО ПРОКАЧУВАННЯ ОРГАНІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА**

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

Розрахунок дисперсії досліду здійснюємо за формулою (2.6). 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	61	1,75	3,0625
2	64	4,75	22,5625
3	59	0,25	0,0625
4	53	6,25	39,0625
	$\bar{y}_0 = 59,25$		$\sum \Delta y^2 = 64,75$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{64,75}{3} = 21,5833$$

і відповідно

$$S_y = 4,646.$$

3.1.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.8):

$$b_0 = \frac{1}{4}(60 + 31 + 105 + 39) = 58,75;$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(60 - 31 + 105 - 39) = 23,75;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(60 + 31 - 105 - 39) = -13,25.$$

3.1.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.9):

$$S_{b_i}^2 = \frac{21,5833}{4} = 5,396,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 2,323.$$

3.1.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.10):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 2,232 = 7,39.$$

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

3.1.5. Будування математичної моделі продуктивності різання

Рівняння регресії, або математична модель продуктивності електродугового різання металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища M набуде вигляду:

$$y_1 = 58,75 + 23,75x_1 - 13,25x_2.$$

(3.1)

3.1.6. Перевірка гіпотези про адекватність моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.12):

$$t^{розр} = \frac{(58,75 - 59,25)\sqrt{4}}{4,646} = 0,21.$$

Оскільки $0,21 < 3,18$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.1.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів на продуктивність процесу електродугового різання M показано на рис. 3.1, а.

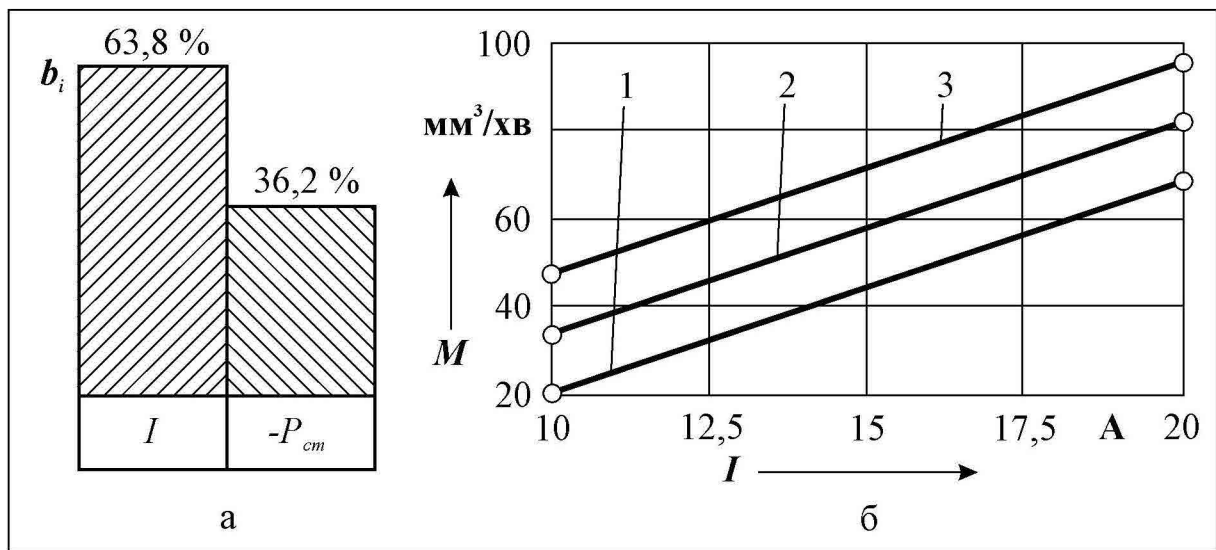


Рис. 3.1. Ступінь впливу факторів (а) та залежність продуктивності електродугового різання M від I та P_{cm} (б): 1 – $P_{cm} = 1,6$ МПа; 2 – $P_{cm} = 1,3$ МПа; 3 – $P_{cm} = 1,0$ МПа

Як бачимо, найбільший вплив на M виявляє сила технологічного струму I , із підвищенням якої продуктивність різання збільшується. Останнє підтверджує теплову природу РОД. Силу технологічного струму розглядаємо як основний керуючий фактор. Вплив статичного тиску P_{cm} менший, з його підвищенням продуктивність зменшується.

На рис. 3.1,б представлена залежність $M = f(I, P_{cm})$, яка демонструє вплив факторів на продуктивність різання у вибраному факторному просторі їх зміни. В рамках експерименту продуктивність процесу електродугового різання змінювалася у межах від 31 до 105 $\text{mm}^3/\text{хв}$.

За роботою [14, с. 111] відомо, що продуктивність РОД залежить від усталеності процесу. При експерименті був неусталений процес. Це пояснює недостатню напругу на електродах ($U = 30$ В) при реалізації малих струмів (10 – 20 А), що погіршує умови існування електричних дуг.

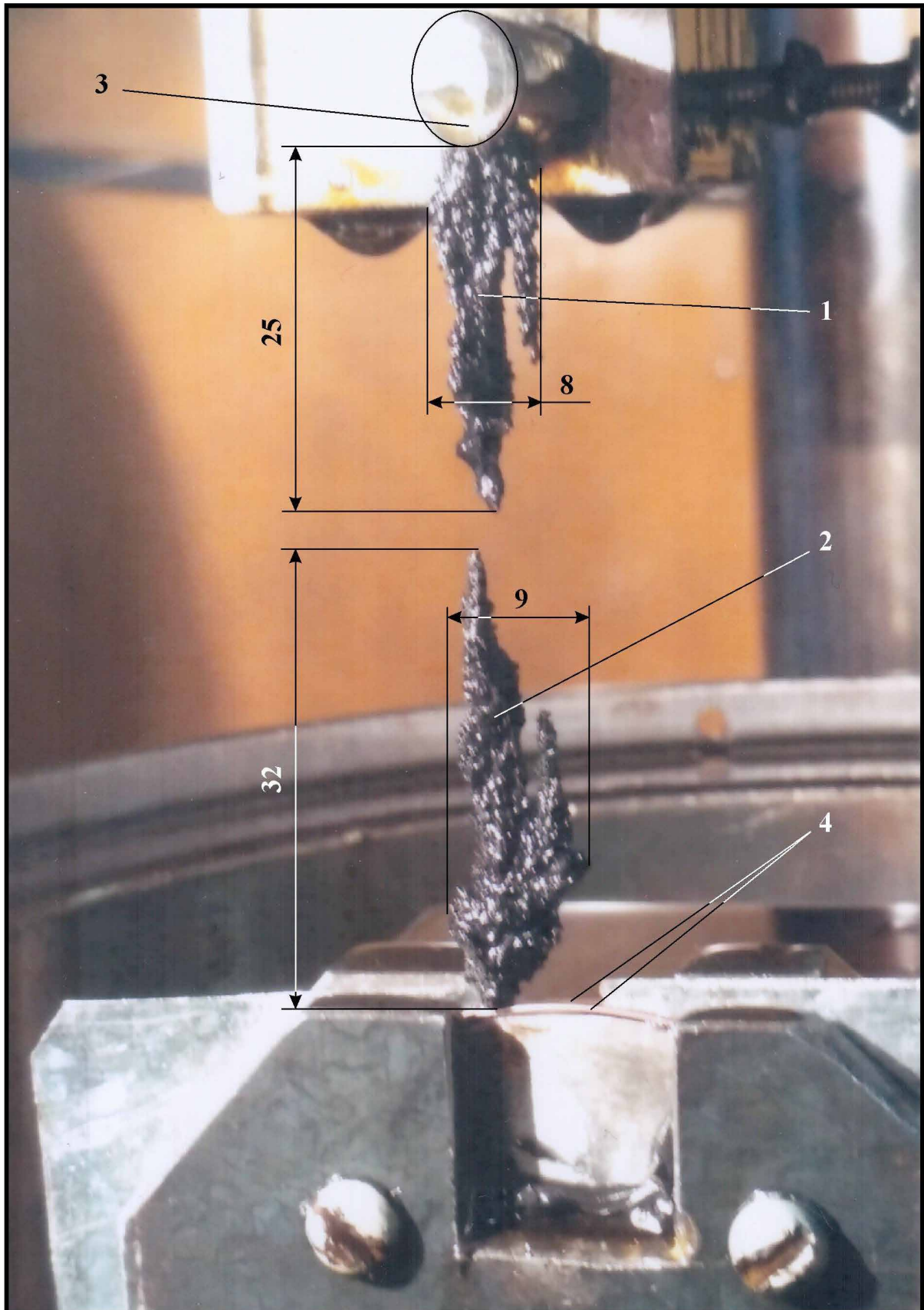


Рис. 3.2. Явище утворення на катоді та аноді бурунькоподібних наростів: 1 - анодний нарост; 2 - катодний нарост; 3 - електрод-заготовка; 4 - дрові електроди-інструменти

Подальше підвищення продуктивності різання пов'язано не тільки з підвищенням сили струму, але й з підвищенням напруги на електродах.

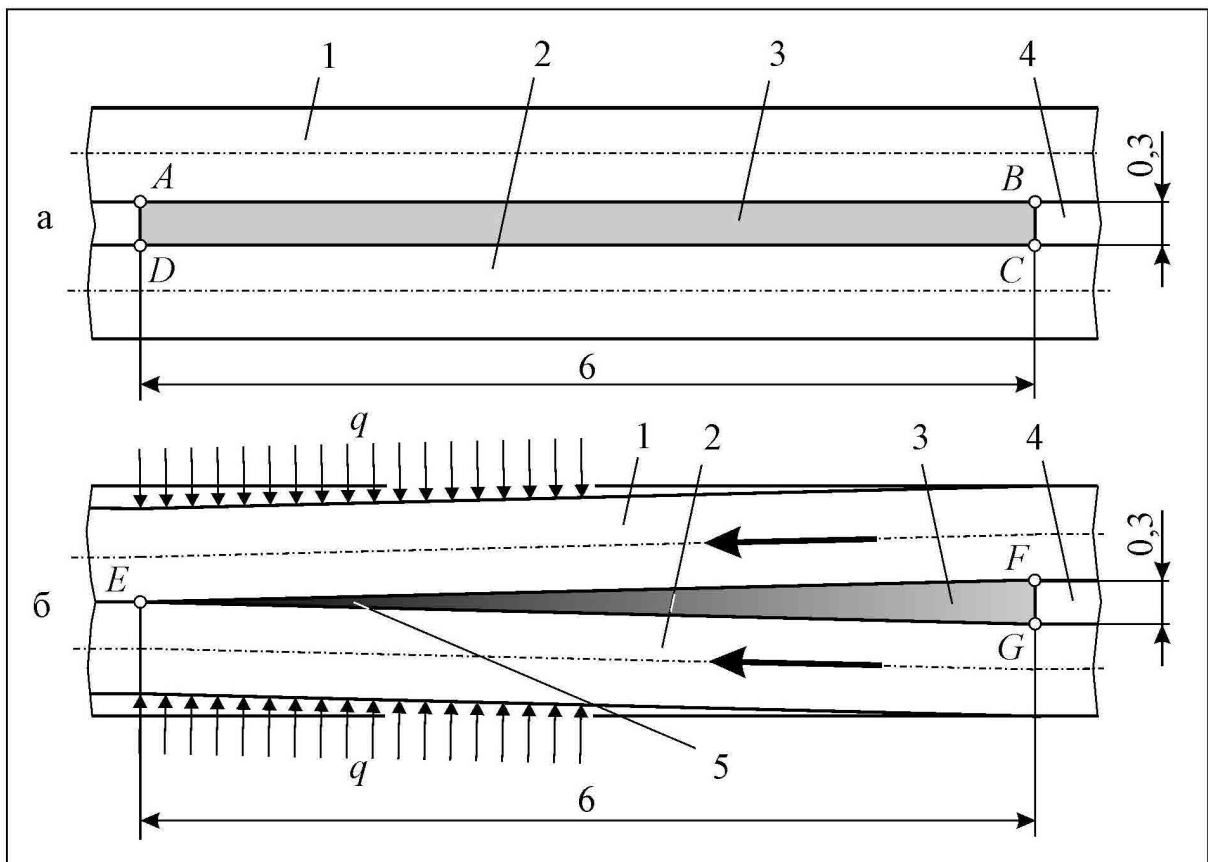


Рис. 3.3. Форма каналу в зоні обробки: а – до експерименту; б – після експерименту

Виявлено явище утворення на аноді (вгорі) та на катоді (внизу) бурулькоподібних наростів (рис. 3.2) вуглеводню. Вони створилися при порушенні гідродинамічного режиму, що викликане суттєвим зменшенням площі каналу 3 між дротовими електродами-інструментами 1, 2 в зв'язку із вимушеним зближенням дротів (рис. 3.3).

Зближення дротів 1, 2 при досліді обумовлене асиметричним виконанням поверхні для фіксації дроту на електродотримачах. Асиметрія викликає виникнення сил, які зближають дроти 1, 2 при протягуванні, а тертя сталевих дротів об центральну прокладку 4, закінчується її подальшим пластичним руйнуванням (рис. 3.4).

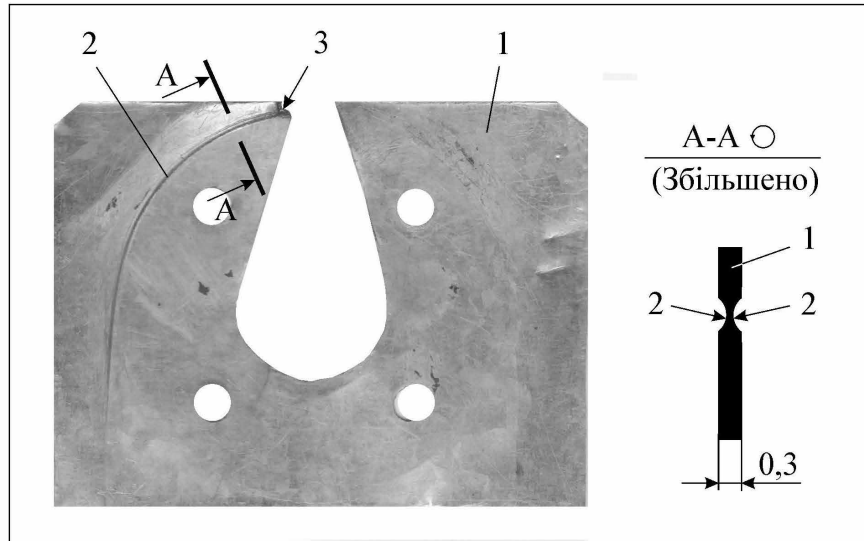


Рис. 3.4. Прокладка після експерименту: 1 – прокладка; 2 – слід від деформування дротом; 3 – місце збудження довгих дуг

Нарости формуються електричним полем із пилиноподібних часток, що є у великій кількості в забрудненій органічній рідині (рис. 3.5). Це продукти розкладу органічної рідини на вуглеводень та перетворення графіту під дією електричної дуги.

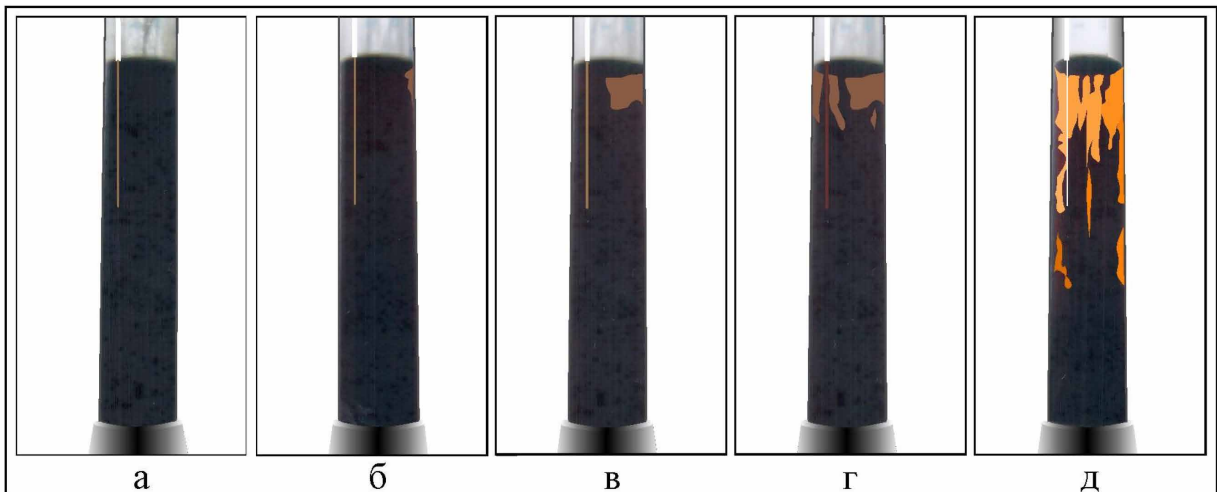
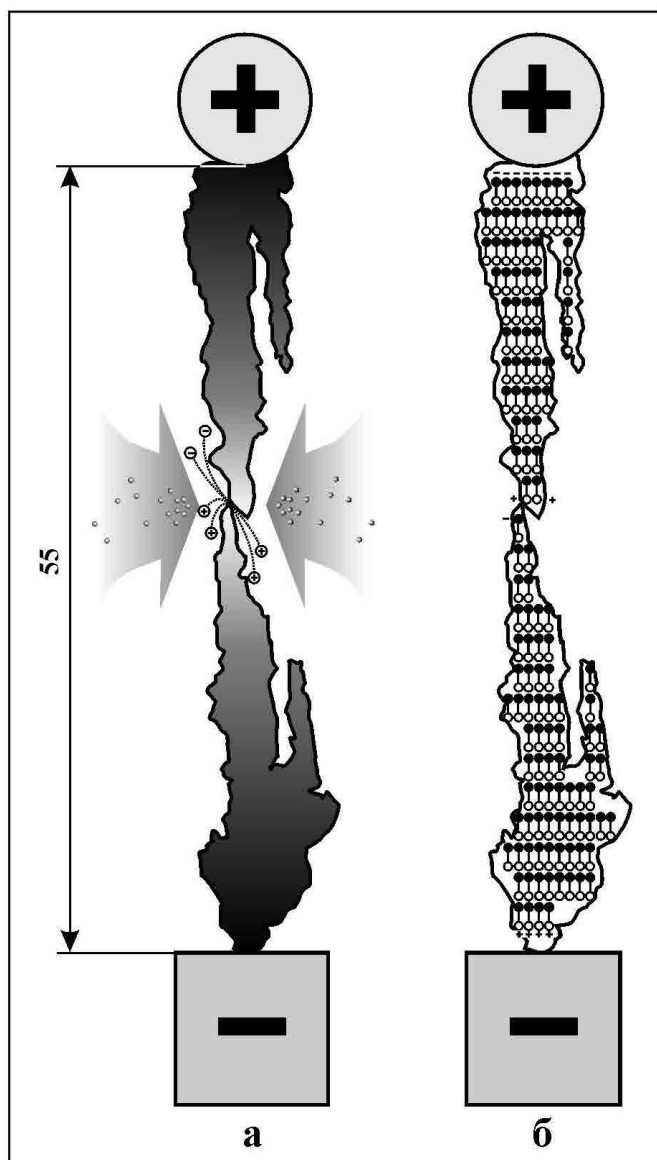


Рис. 3.5. Забруднена робоча рідина після відстою: а – рідина після експерименту; б – один тиждень; в – два тижня; г – три тижня; д – чотири тижня



частки (рис. 3.6).

Рис. 3.6. Фізичний механізм утворення на аноді та на катоді бурулькоподібних наростів: а – схема явища загальна; б – схема поляризації наростів

Даний нарiст проявляє властивiсть напiвпровiдника, де при перебуваннi в електричному полi, спостерiгається струмопровiднiсть. Такий ефект у нових 3D-технологiях може бути застосований для «вирощування» деталей.

Частки, які електролізуються в електричному полі біля катода, притягуються катодом, а частки, що електролізуються в електричному полі біля анода, притягуються анодом. Цей процес [15] *поляризація діелектрика*, тобто зміщення в протилежні боки різнойменних зв'язаних зарядів, що входять у склад атомів та молекул речовини. В умовах експерименту частки набувають наступних властивостей: проводять струм малої сили, утворюють разом з електродами електричне поле та притягують із рідини інші

3.2. Питома продуктивність різання

3.2.1. Розрахунок дисперсії досліду

Розрахунок дисперсії досліду здійснювали за формулою (2.6). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Дані для розрахунку дисперсії досліду

Номер дубля	y_{0q}	$\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	Δy^2
1	4,07	0,12	0,0144
2	4,27	0,32	0,1924
3	3,93	0,02	0,0004
4	3,53	0,42	0,1764
	$\bar{y}_0 = 3,95$		$\sum \Delta y^2 = 0,2936$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,2936}{3} = 0,0979,$$

відповідно

$$S_y = 0,313.$$

3.2.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.8):

$$b_0 = \frac{1}{4}(3,00 + 3,10 + 5,25 + 3,90) = 3,81;$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(3,00 - 3,10 + 5,25 - 3,90) = 0,31;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(3,00 + 3,10 - 5,25 - 3,90) = -0,76.$$

3.2.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.9):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,0979}{4} = 0,0244,$$

відповідно середньо квадратична помилка $S_{b_i} = 0,156$.

3.2.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.10):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,156 = 0,496.$$

В даному випадку вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ не виконується для коефіцієнта регресії b_1 . Тому його слід визнати статистично не значимим.

3.2.5. Будування математичної моделі питомої продуктивності різання

Рівняння регресії, або математична модель питомої продуктивності електродугового різання металів дрововими електродами-інструментами з

використанням зворотного прокачування органічного середовища M_a набуде вигляду:

$$y_2 = 3,81 - 0,76x_2.$$

(3.2)

3.2.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.12):

$$t^{розр} = \frac{|3,81 - 3,95|\sqrt{4}}{0,313} = 0,90.$$

Оскільки $0,90 < 3,18$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.2.7. Аналіз моделі

Із математичної моделі питомої продуктивності електродугового різання металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища (3.2) витікає, що M_a залежить тільки від статичного тиску робочої рідини на вході в торцевий МЕЗ P_{cm} , із зменшенням якого M_a збільшується (рис. 3.7, а). Таким чином, статичний тиск робочої рідини на вході в торцевий МЕЗ P_{cm} є головний керуючий фактор.

Графік залежності $M_a = f(P_{cm})$ демонструється на рис. 3.7, б.

В умовах експерименту питома продуктивність процесу електродугового різання змінювалася у межах від 3,0 до 5,25 мм³/А·хв.

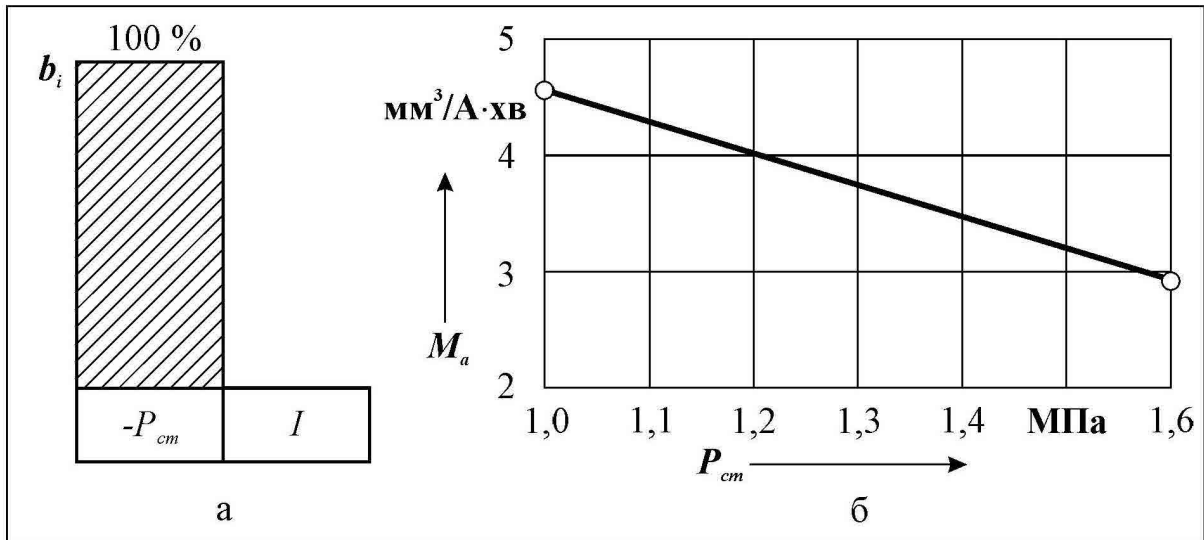


Рис. 3.7. Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої продуктивності електродугового різання M_a від $P_{ст}$ (б)

3.3. Питома витрата електроенергії

3.3.1. Розрахунок дисперсії дослідів

Розрахунок дисперсії дослідів здійснювали за формулою (2.6). 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	15,56	0,61	0,3721
2	14,93	1,24	1,5376
3	16,19	0,02	0,0004
4	18,02	1,85	3,4225
	$\bar{y}_0 = 16,17$		$\sum \Delta y^2 = 5,3326$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{5,3326}{3} = 1,777,$$

ВІДПОВІДНО

$$S_y = 1,333.$$

3.3.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.8):

$$b_0 = \frac{1}{4}(21,61 + 21,32 + 12,00 + 17,81) = 18,19;$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(21,61 - 21,32 + 12,00 - 17,81) = -1,38;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(21,61 + 21,32 - 12,00 - 17,81) = 3,28.$$

3.3.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.9):

$$S_{b_i}^2 = \frac{1,777}{4} = 0,444,$$

ВІДПОВІДНО

$$S_{b_i} = 0,666.$$

3.3.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.10):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,666 = 2,12.$$

У даному випадку для коефіцієнта регресії b_1 не виконується вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

3.3.5. Будування математичної моделі питомої витрати електроенергії

Рівняння регресії, або математична модель питомої витрати електроенергії a процесу електродугового різання металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища набуде вигляду:

$$y_3 = 18,19 + 3,28x_2.$$

(3.3)

3.3.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.12):

$$t^{розр} = \frac{|18,19 - 16,17| \sqrt{4}}{1,333} = 3,03.$$

Оскільки $3,03 < 3,18$, гіпотеза про адекватність лінійної моделі не відхиляється.

3.3.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів на питому витрату електроенергії a при електродуговому різанню металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища показано на рис. 3.8, а.

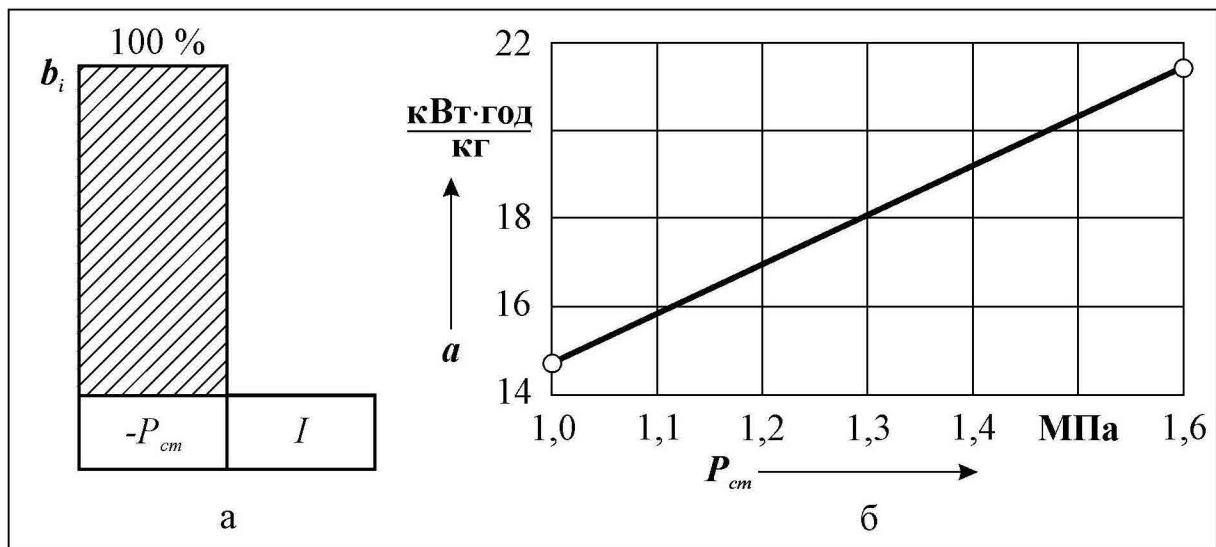


Рис. 3.8. Ступінь впливу факторів (а) та залежність питомої витрати електроенергії електродугового різання a від P_{cm} (б)

Як бачимо, на питому витрату електроенергії a впливає лише один фактор – статичний тиск робочої рідини на вході в торцевий між-електродний зазор P_{cm} , із підвищенням якого a збільшується. Саме тому P_{cm} слід розглядати як головний керуючий фактор.

Збільшення питомої витрати електроенергії при підвищенні P_{cm} з фізичної точки зору пояснюється тим, що зростає швидкість потоку, а отже тепла енергія, яка відводиться потоком від електричної дуги.

Залежність $a = f(P_{cm})$ демонструється на рис. 3.8, б.

В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД змінювалася у межах від 12,0 до 21,61 $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$.

Розділ 4

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА
ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РІЗАННЯ МЕТАЛІВ ДРОТОВИМ
ЕЛЕКТРОД-ІНСТРУМЕНТОМ З ВИКОРИСТАННЯМ
ЗВОРОТНОГО ПРОКАЧУВАННЯ ОРГАНІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА**

4.1. Бічний міжелектродний зазор**4.1.1. Розрахунок дисперсії досліду**

Розрахунок дисперсії досліду здійснювали за формулою (2.6). 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	0,23	0,015	0,000225
2	0,22	0,005	0,000025
3	0,22	0,005	0,000025
4	0,19	0,025	0,000625
	$\bar{y}_0 = 0,215$		$\sum \Delta y^2 = 0,0009$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,0009}{3} = 0,0003,$$

відповідно

$$S_y = 0,0173.$$

4.1.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.8):

$$b_0 = \frac{1}{4}(0,26 + 0,12 + 0,29 + 0,14) = 0,203;$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(0,26 - 0,12 + 0,29 - 0,14) = 0,07;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(0,26 + 0,12 - 0,29 - 0,14) = -0,013.$$

4.1.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.9):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,0003}{4} = 0,000075,$$

відповідно

$$S_{b_i} = 0,00866.$$

4.1.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.10):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,00866 = 0,0275.$$

У даному випадку для коефіцієнта регресії b_2 та b_3 не виконується вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

4.1.5. Будування математичної моделі бічного міжелектродного зазору

Рівняння регресії, або математична модель бічного міжелектродного зазору δ_6 процесу електродугового різання металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища набуде вигляду:

$$y_4 = 0,203 + 0,07x_1. \quad (4.1)$$

4.1.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стюдента за формулою (2.12):

$$t^{розр} = \frac{|0,215 - 0,203| \sqrt{4}}{0,0173} = 1,39.$$

Оскільки $1,39 < 3,18$, гіпотеза про адекватність лінійної моделі не відхиляється.

4.1.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів на бічний міжелектродний зазор δ_δ процесу електродугового різання металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища показано на рис. 4.1, а.

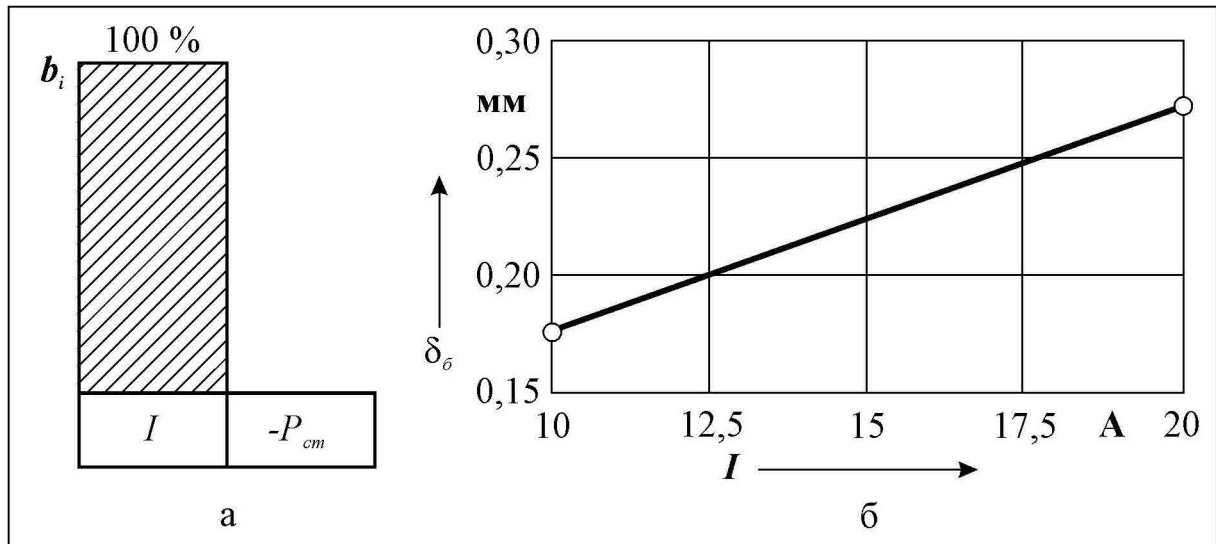


Рис. 4.1. Ступінь впливу факторів (а) та залежність бічного міжелектродного зазору δ_δ від I (б)

Як бачимо, на бічний міжелектродний зазор δ_δ впливає лише один фактор – сила струму I , із підвищенням якого δ_δ збільшується. Саме тому I слід розглядати як головний керуючий фактор.

Залежність $\delta_\delta = f(I)$ демонструється на рис. 4.1, б.

В умовах експерименту бічний міжелектродний зазор δ_δ процесу різання металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища змінювався у межах від 0,12 до 0,29 мм (рис. 4.2). Оскільки продукти ерозії γ вилучалися із торцевого міжелектродного зазору крізь центральний канал між дротами 2, 3, процес різання відбувався при постійному бічному міжелектродному зазорі δ_δ без утворення похилої поверхні різі. Крім того, на електроді-заготовці 1 спостерігалася гостра кромка на вході потоку в бічний між-

електродний зазор. Більш того, технологічний виступ на електроді-заготовці 1 між дротами 2, 3 не утворюється.

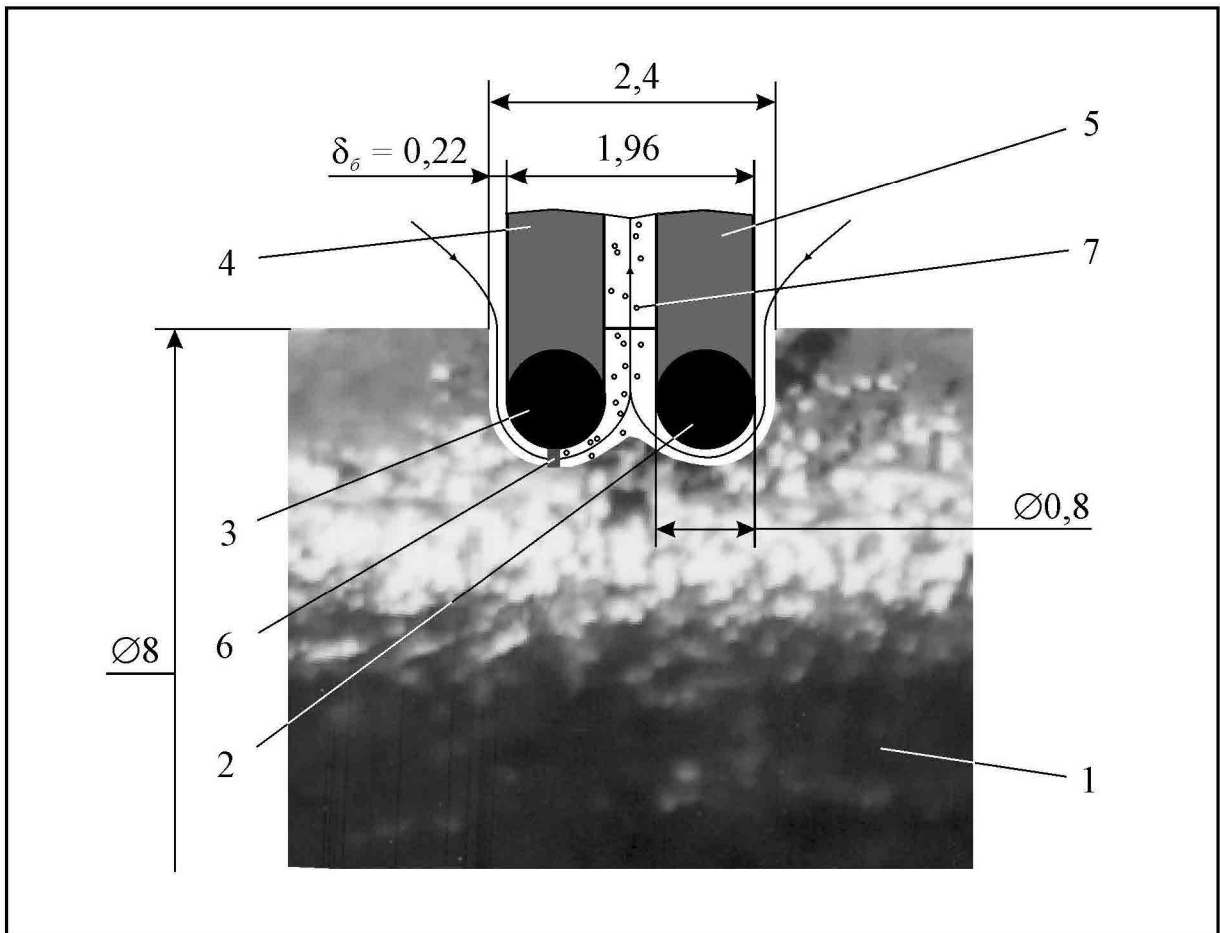


Рис. 4.2. Визначення бічного міжелектродного зазору δ_δ : 1 – електрод-заготовка (фото); 2, 3 – дріт; 4, 5 – електродотримач; 6 – електрична дуга; 7 – продукти ерозії

4.2. Шорсткість поверхні різу

4.2.1. Розрахунок дисперсії досліду

Розрахунок дисперсії досліду здійснювали за формулою (2.6). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Дані для розрахунку дисперсії дослідів

Номер дубля	y_{0q}	$\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$	Δy^2
1	7	0,25	0,0625
2	8	0,75	0,5625
3	7	0,25	0,0625
4	7	0,25	0,0625
	$\bar{y}_0 = 7,25$		$\sum \Delta y^2 = 0,75$

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,75}{3} = 0,25,$$

відповідно

$$S_y = 0,5.$$

4.2.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.8):

$$b_0 = \frac{1}{4}(8 + 5 + 11 + 7) = 7,75;$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(8 - 5 + 11 - 7) = 1,75;$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(8 + 5 - 11 - 7) = -1,25.$$

4.2.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.9):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,25}{4} = 0,0625,$$

відповідно

$$S_{b_i} = 0,25.$$

4.2.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.10):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,25 = 0,795.$$

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

4.2.5. Будівництво математичної моделі шорсткості поверхні різання металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища

Рівняння регресії, або математична модель шорсткості поверхні різання набуде вигляду:

$$y_5 = 7,75 + 1,75x_1.$$

(4.2)

4.2.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стюдента за формулою (2.12):

$$t^{розр} = \frac{|7,75 - 7,25| \sqrt{4}}{0,5} = 2.$$

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

4.2.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів на шорсткість поверхні різь Ra металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища показано на рис. 4.3, а.

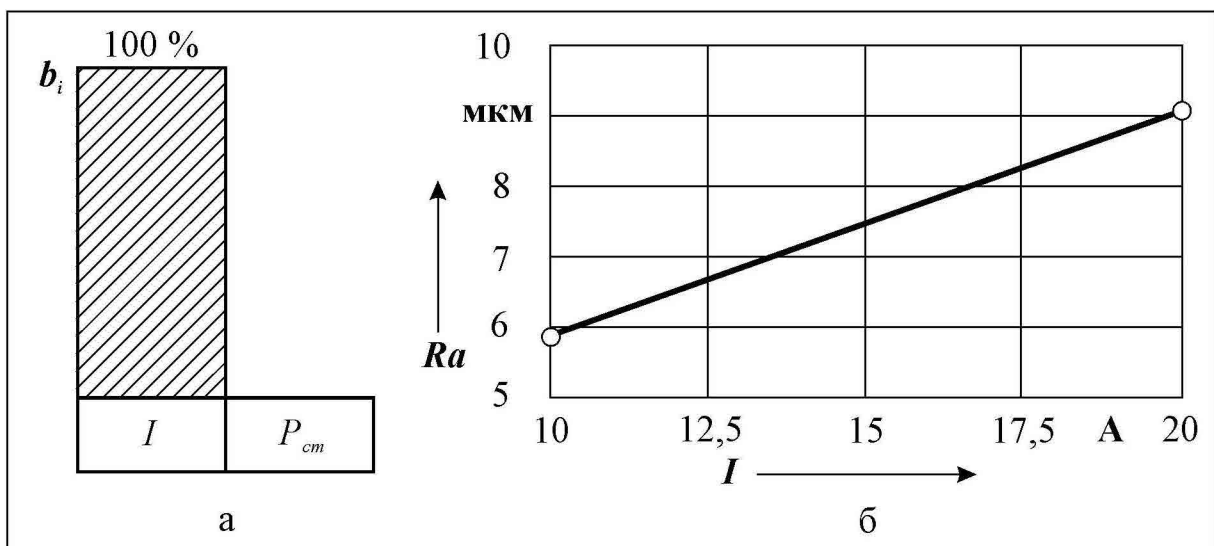


Рис. 4.3. Ступінь впливу факторів (а) та залежність шорсткості поверхні різь Ra від I (б)

Як бачимо, найбільший вплив на шорсткість поверхні різку оказує сила струму I , із підвищенням якої Ra збільшується. Саме тому I слід розглядати як головний керуючий фактор.

Виявлено, що статичний тиск робочої рідини на вході в МЕЗ $P_{ст}$ на шорсткість поверхні різку Ra не впливає.

Залежність $Ra = f(I)$ демонструється на рис. 4.3, б.

В умовах експерименту шорсткість поверхні різку Ra металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища змінювалася у межах від 5 до 11 мкм.

Розділ 5

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА**5.1. Розрахунок річного економічного ефекту.**

Розрахунок очікуваного річного економічного ефекту [18,19,20] від впровадження у виробництво способу різання дротовим електрод-інструментом при розмірній обробці дугою базується на наступних умовах:

- за базовий варіант прийнято найбільш розповсюджений сучасний метод різання абразивними кругами трубчатої заготовки яка наплавлена релітом на мірні заготовки. За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ», м. Бровари, Київської області, час різання заготовки яка наплавлена релітом на мірні заготовки 0,42 годин з середньою продуктивністю $M_{баз} = 20 \text{ мм}^3/\text{хв.}$;

- за проектний варіант прийнято спосіб різання дротовим електрод-інструментом при розмірній обробці дугою середньою продуктивністю обробки $M_{пр} = 106 \text{ мм}^3/\text{хв.}$, що відповідає силі технологічного струму $I = 20 \text{ А}$;

- за даними роботи [4] річний об'єм виробництва заготовок, які наплавлені релітом в Україні на науково-виробничому товаристві ТОВ «ІНТЕРВІТ» складає 3 т. У перерахунку на кількість заготовок, що обробляються, це становить 12000 шт/рік.

Вихідні дані для подальшого розрахунку наведені і табл. 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^2	9	16	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»

Продовження таблиці 5.1

7	Коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу на одну одиницю обладнання	K_{∂}	-	1,1	1,1	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
8	Вартість 1 м ² виробничої площі	C_n	грн/м ²	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	K_{η}	-	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 ураховує додаткову заробітну плату	$K_{\partial z}$	-	1,089	1,089	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
16	Коефіцієнт завантаження обладнання	K_{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 $K_{ен}$. Дані розрахунки наведено нижче в табл. 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	$H_p = \frac{n \cdot t}{F}$ $H_{p(\sigma)} = \frac{12000 \cdot 0,42}{2008} = 2,3$ $H_{p(n)} = \frac{12000 \cdot 0,16}{2008} = 0,9$
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	$K_{об} = K \cdot H_n$ $K_{об(\theta)} = 1440000 \cdot 2 = 2880000$ $K_{об(n)} = 980000 \cdot 1 = 980000$
4	Вартість виробничих приміщень	$K_{вн}$	грн	99000	88000	$K_{вн} = S \cdot \kappa_{\partial} \cdot H_n \cdot Ц_n$ $K_{вн(\theta)} = 9 \cdot 1,1 \cdot 2 \cdot 5000 = 99000$ $K_{вн(n)} = 16 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 5000 = 88000$
5	Загальна сума капітальних вкладень	$K_{кв}$	грн	2979000	106800	$K_{кв} = K_{об} + K_{вн}$ $K_{кв(\theta)} = 2880000 + 99000 = 2979000$ $K_{кв(n)} = 980000 + 88000 = 1068000$

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 площі $C_{пл}$. Дані показники є складовими частинами собівартості одиниці продукції, розрахунок якої наведено у табл. 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	$C_{зн} = n \cdot T \cdot K_{\partial з}$ $C_{зн(\theta)} = 12000 \cdot 45 \cdot 1,089 = 588060$ $C_{зн(n)} = 12000 \cdot 30 \cdot 1,089 = 392040$

Продовження таблиці 5.3

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

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження у виробництво способу різання дротовим електрод-інструментом при розмірній обробці дугою визначаємо за формулою:

$$E_p = [C_{(б)} - C_{(н)}] + E_n [K_{кд(б)} - K_{кд(н)}] \quad (5.1)$$

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

ВИСНОВКИ

Основні результати магістерської роботи полягають в наступному:

1. В сучасному машинобудуванні для різання важко оброблюваних матеріалів застосовуються електрофізикохімічні методи. В більшості випадків продуктивність процесу різання є визначальною при виборі того чи іншого способу різання. За роботами Носуленка В. І. відомий високопродуктивний спосіб РОД. Однак, процес РОД не знайшов застосування для ефективного різання металів в зв'язку з відсутністю оптимальної технологічної схеми формоутворення різку, при якій певним чином компенсується електроерозійний знос електрода-інструмента. В роботі Василенка В. П. запропоновано таку технологічну схему електродугового формоутворення різку, що дозволяє компенсувати знос електрода-інструмента шляхом паралельного протягування в робочій зоні двох дротових електродів-інструментів при прямому прокачуванні робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор. Однак, при прямому прокачуванні створюються умови для концентрації часток в бічному зазорі. Результатом цього явища є виникнення довгих дуг, які, з одного боку утворюють похилу поверхню різку, збільшують час різання, а з другого боку руйнують стінки електродотримачів. Крім того, технічна вода, як робоча рідина, частково проводить електричний струм. За цією причиною частина енергії, що підводиться до електродів, не використовується ефективно. В роботі удосконалено спосіб електродугового різання дротовими електродами-інструментами за рахунок використання зворотного прокачування органічної робочої рідини крізь торцевий міжелектродний зазор, який долає вади відомого. Таким чином, удосконалення способу електродугового різання дротовими електродами-інструментами є актуальним науково-практичним завданням.

2. Виконано узагальнення результатів огляду сучасних способів різання металів та обґрунтовано напрямок досліджень. Запропоновано удосконалити процес електродугового різання дротовими електродами-інструментами за рахунок використання зворотного прокачування органічного середовища. Даний процес не був об'єктом реалізації та дослідження, а тому його технологічні характеристики не відомі.

3. Запропонована нова технологічна схема формоутворення різу при електродуговому різанні металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища, яка забезпечує при задовільній ширині різу наступні переваги: підвищення продуктивності різання шляхом повного використання електричної енергії, що підводиться до електродів; підвищення точності різання за рахунок формування бічного міжелектродного зазору без утворення похилої поверхні різу; підвищення якості різання шляхом ведення процесу без утворення довгих (нетиснутих) дуг в бічному міжелектродному зазорі; ведення процесу без руйнування дугою стінок електродотримача.

4. Отримано математичні моделі технологічних характеристик, що визначають продуктивність електродугового різання металів дротовими електродами-інструментами та дозволяють керувати та прогнозувати їх.

Показано, що найбільший вплив на продуктивність різання впливає сила технологічного струму I , із підвищенням якої вона збільшується. Таким чином, сила технологічного струму є основний керуючий фактор. Вплив статичного тиску P_{cm} менший, але має вагомий вплив. З його підвищенням продуктивність зменшується. В рамках експерименту продуктивність процесу електродугового різання змінювалася у межах від 31 до 105 мм³/хв.

Встановлено, що на питому продуктивність різання M_a впливає тільки статичний тиск робочої рідини на вході в торцевий МЕЗ P_{cm} і є головним керуючим фактором. При експерименті питома продуктивність

процесу електродугового різання змінювалася у межах від 3 до 5,25 мм³/А·хв.

На питому витрату електроенергії a впливає статичний тиск робочої рідини на вході в торцевий міжелектродний зазор P_{cm} , де з підвищенням якого витрата електроенергії збільшується, тому P_{cm} є головний керуючий фактор. Збільшення a при підвищенні P_{cm} є тим, що зростає швидкість потоку, а тепла енергія відводиться потоком від електричної дуги. При дослідженнях питома витрата електроенергії змінювалася у межах від 12 до $21,6 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$.

5. Отримано математичні моделі технологічних характеристик, що визначають точність та якість електродугового різання металів дротовими електродами-інструментами з використанням зворотного прокачування органічного середовища та дозволяють прогнозувати їх.

Показано, що на бічний міжелектродний зазор δ_b впливає сила технологічного струму I , при збільшенні якого бічний міжелектродний зазор збільшується, тому I є головний керуючий фактор. В умовах експерименту бічний міжелектродний зазор δ змінювався у межах від 0,12 до 0,29 мм. На електроді-заготовці спостерігається гостра кромка, а технологічний виступ між дротами не утворюється, процес відбувається без утворення похилої поверхні різі.

Встановлено, що найбільший вплив на шорсткість поверхні різі Ra оказує сила технологічного струму I , де із підвищенням шорсткість поверхні різі Ra збільшується. Тому сила технологічного струму I розглядається як головний керуючий фактор, а статичний тиск робочої рідини на вході в МЕЗ P_{cm} на шорсткість поверхні різі не впливає. В умовах експерименту шорсткість поверхні різі Ra змінювалася у межах від 5 до 11 мкм.

6. Апробація роботи здійснювалася шляхом доповіді на LVII науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти приуроченій «Дню науки – 2023» в ЦНТУ. Тези доповіді на тему «Різання дротовим електродом-інструментом при розмірній обробці дугою» 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. Головин В. А. Технология и оборудование холодной штамповки: учебник / Головин В. А., Ракошиц Г. С., Навроцкий А. Г.. – М.: Машиностроение, 1987. – 352 с.
2. Холодная объёмная штамповка: справочник. Под ред. Г. А. Навроцкого. – М.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
3. Яковлев В. Н. Справочник слесаря-монтажника / В. Н. Яковлев. – М.: Машиностроение, 1975. – 478 с.
4. Артамонов Б. А. Размерная электрическая обработка металлов: Учеб. Пособие для студентов вузов / Б. А. Артамонов, А. Л. Вишницкий, Ю. С. Волков, А. В. Глазков; Под ред. А. В. Глазкова. – М.: Высш. школа, 1978. – 336 с.
5. Электрофизические и электрохимические станки: каталог. – М.: НИИИ по машиностроению, 1978. – 228 с.
6. Оборудование для размерной электрохимической обработки деталей машин. / Под ред. Ф. В. Седыкина. – М.: Машиностроение, 1980. – 277 с.
7. Ставицкий Б. И. Из истории электроискровой обработки материалов / Б. И. Ставицкий. – Харьков: ПРАТ «Полиграфсервис». – 2013. – 104 с.
8. Коваленко В. С. Малоотходные процессы резки лучом лазера / В. С. Коваленко, В. В. Романенко, Л. М. Олещук. – К.: Техніка, 1987. – 112 с.
9. 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.
10. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов электрической дугой / В. И. Носуленко, Г. М. Мещеряков // Электронная обработка материалов. – 1981. – № 1. – С. 19-23.

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

12. Василенко В. П. Електродугове різання дротовими електродами-інструментами / В. П. Василенко // Збірник праць молодих науковців КНТУ, вип. 6. – 2016. – с. 17-26.

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

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

15. Габардин О. Ф. Физика. Справочные материалы: учеб. пособие / О. Ф. Габардин. – 3-е изд. – М.: Просвещение, 1991. – 367 с.

16. [www/refbzd.ru/viewreferat-2595-10.html](http://www.refbzd.ru/viewreferat-2595-10.html).

17. Житецький В. Ц., Джиги рей В. С., Сторожук В. М. та ін. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. В. Ц. Житецького. – Львів, Афіша, 2000. – 352 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 № *207* від *18. 12. 2023 р.*

Видана студенту групи ПМ22-М2-2 Шмакову Віталію 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: «Різання дротом електродом-інструментом при розмірній обробці дугою» (наук. кер.: доц. О.Сіса).

Керівник МОВ

Олексій СМІРНОВ