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:

«Обробка електричною дугою твердосплавних глазків крутильних машин»

«Electric arc treatment of carbide eyes of twisting mechines»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ОТ-21 М 1,4
спеціальності 131
«Прикладна механіка»,
_____ Сивий А. В.
1 грудня 2022 р.

Керівник проекту
канд. техн. наук, доцент
_____ Олег СІСА
1 грудня 2022 р.

Рецензент
канд. техн. наук, доцент
_____ Віктор ПУКАЛОВ
26 грудня 2022 р.

м. Кропивницький

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
26 серпня 2022 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
Сивому Антону Валерійовичу

1. Тема роботи: «Обробка електричною дугою твердосплавних глазків крутильних машин».
2. Керівник роботи: Сіса Олег Федорович, к. т. н., доцент.
3. Строк подання роботи до захисту: 1 грудня 2022 р.
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи.
Мета: удосконалення технології чорнової обробки твердосплавних глазків крутильних машин за рахунок виявлення взаємозв'язку технологічних характеристик процесу РОД з електричними і гідродинамічними режимами обробки та геометричними параметрами зовнішньої бічної поверхні, що обробляється, для їх прогнозування та оптимізації режиму обробки.
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. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
№ 5 «Економічна частина»	Савеленко Г. В., к. т. н., ст. викл.	3.09.2022 р.	24.11.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	15.09.2022 р.	
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу	3.10.2022 р.	
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові	15.11.2022 р.	
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту	1.12.2022 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	23.12.2022 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	26.12.2022 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	27.12.2022 р.	

Дата видачі завдання
29 серпня 2022 р.

Підпис керівника
_____ Сіса О. Ф.

Завдання прийнято до виконання
29 серпня 2022 р.

Підпис здобувача
_____ Сивий А. В.

АНОТАЦІЯ

Сивий А. В. «Обробка електричною дугою твердосплавних глазків крутильних машин», спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Прикладна механіка», Центрально- український національний технічний університет, Кропивницький, 2022 рік.

Метою дослідження є удосконалення технології чорнової обробки твердосплавних глазків за рахунок виявлення взаємозв'язку технологічних характеристик процесу РОД з електричними і гідродинамічними режимами обробки та геометричними параметрами отворів, що обробляється, для їх прогнозування та оптимізації режиму обробки. Удосконалено технологію чорнової обробки твердосплавних глазків за рахунок застосування процесу РОД. Виявлено взаємозв'язок технологічних характеристик процесу РОД з електричними і гідродинамічними режимами обробки та геометричними параметрами отвору, що обробляється. Отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД твердосплавних глазків, які дозволяють прогнозувати їх та оптимізувати режим обробки, також показано, що шорсткість бічної поверхні після РОД твердосплавної заготовки залежить, головним чином, від сили технологічного струму I, причому, із підвищенням сили струму шорсткості збільшується. Шорсткість поверхні – результат накладання одиночних лунок від горіння розрядів. Відомо, що більшої сили струму відповідає більший діаметр лунки. Отже, більшої сили струму відповідає більша шорсткість поверхні після РОД. Запропоновано та випробувано спосіб чорнової обробки електричною дугою при відновлені отворів в зношених глазках крутильних машин, з метою їх подальшого застосування у виробництві. Спосіб дозволяє ефективно 4,1 - 5,2 рази збільшити продуктивність обробки отворів твердосплавних глазків в порівняні з чорновим шліфуванням головками АГЦ на металевій зв'язці, та 4,2 - 6,3 разів порівняно продуктивністю електроімпульсної обробки.

електрична дуга, твердосплавний глазок, технологія, інструмент, обладнання

ANNOTATION

Syviy A. V. "Electric arc processing of carbide eyes of twisting machines", specialty 131 "Applied Mechanics", EP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2022.

The purpose of the study is to improve the technology of rough machining of carbide eyes due to the identification of the relationship between the technological characteristics of the DEA process with the electrical and hydrodynamic modes of processing and the geometric parameters of the holes being processed, for their prediction and optimization of the processing mode.The technology of rough processing of carbide eyes has been improved due to the use of the DEA process. The relationship between the technological characteristics of the DEA process with the electrical and hydrodynamic modes of processing and the geometric parameters of the hole being processed is revealed. Mathematical models of technological characteristics of the DEA process of carbide eyes were obtained, which make it possible to predict them and optimize the processing mode, it is also shown that the roughness of the side surface after DEA of the carbide workpiece depends mainly on the strength of the technological current I, and with increasing current strength, the roughness increases. The roughness of the surface is the result of overlapping single holes from burning discharges. It is known that a larger diameter of the hole corresponds to a higher current strength, therefore, a higher current strength corresponds to a higher surface roughness after DEA. A method of electric arc roughing for the restoration of holes in worn eyelets of twisting machines has been proposed and tested, with the aim of their further application in production. The method makes it possible to effectively increase the performance of machining holes of carbide eyes by 4.1-5.2 times compared to rough grinding with AGC heads on a metal bond, and by 4.2-6.3 times compared to the performance of electric pulse processing.

electric arc, carbide eyelet, technology, tool, equipment

ЗМІСТ

ВСТУП 8

РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ 14

1.1. Аналіз сучасних технологій виготовлення твердосплавних глазків крутильних машин 14

1.2. Про технологічні можливості процесу РОД 22

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ 27

2.1. Обґрунтування технологічної схеми формоутворення твердосплавних глазків крутильних машин 27

2.2. Методика математичного моделювання технологічних характеристик процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин 29

2.3. Експериментальний пристрій 38

2.4. Матеріали, зразки та вимірювальний інструмент 40

2.5 Техніка безпеки при експериментальному дослідженні 42

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД ТВЕРДОСПЛАВНИХ ГЛАЗКІВ КРУТИЛЬНИХ МАШИН 43

3.1. Продуктивність обробки 43

3.2. Питома продуктивність обробки 48

3.3. Питома витрата електроенергії 53

3.4. Висновки 58

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ТА ТОЧНОСТІ ПРЦЕСУ РОД ТВЕРДОСПЛАВНИХ 59
ГЛАЗКІВ КРУТИЛЬНИХ МАШИН 60
4.1. Шорсткість обробленої поверхні 65
4.2. Бічний міжелектродний зазор 70
4.3. Відносний лінійний знос електрода-інструмента 75
4.4. Висновки 76

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА 77
5.1. Розрахунок річного економічного ефекту 77

ВИСНОВКИ 82

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 84

ДОДАТКИ Д1. Довідка про участь у науково-технічній конференції 88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

ЕЕО	-	електроерозійна обробка;
ЕІмО	-	електроімпульсна обробка;
РОД	-	розмірна обробка дугою;
ЕІ	-	електрод-інструмент;
ЕЗ	-	електрод-заготовка;
МЕП	-	міжелектродний проміжок;
МЕЗ	-	міжелектродний зазор;
I	-	сила технологічного струму, А;
U	-	напруга на електродах, В;
U_p	-	робоча напруга, В;
U_{xx}	-	напруга холостого ходу, В;
$U_к$	-	падіння напруги в катодній області дуги, В;
U_a	-	падіння напруги в анодній області дуги, В;
$U_{к+ a}$	-	сумарне значення катодного і анодного падінь напруги, В;
U_c	-	падіння напруги в стовпі дуги, В;
P	-	теплова потужність дуги, Вт
$P_{ст}$	-	статичний тиск робочої рідини на вході потоку в МЕП, МПа;
Re	-	число Рейнольдса;
F	-	площа заготовки в плані, мм^2;
h	-	глибина обробки, мм;
t	-	час обробки, хв.;
M	-	продуктивність обробки, мм^3/хв.;
M_a	-	питома продуктивність обробки, мм^3/А · хв.;
a	-	питома витрата електроенергії, кВт · год/кг;
R_a	-	шорсткість обробленої поверхні, мкм;
δ	-	міжелектродний зазор, мм;
$\delta_б$	-	бічний міжелектродний зазор, мм;
$\delta_т$	-	торцевий міжелектродний зазор, мм;
$\gamma_л$	-	відносний лінійний знос електрода-інструмента, %;
Δ	-	відносна нерівномірність чорнової РОД, %.

ВСТУП

Актуальність теми

Сталеві канати різних конструкцій знаходять у цей час широке застосування практично у всіх галузях, у зв'язку із чим, підвищення їхньої конкурентноздатності на вітчизняних і закордонних ринках є актуальним завданням для метизної галузі чорної металургії України. Особливо це важливо для канатів одинарного й подвійного закручування, які є масовим видом металопродукції. Ефективність використання сталевих канатів визначається факторами, найбільш істотними з яких є: комплекс механічних властивостей, технологія виготовлення, максимальна відповідність типу й конструкційних параметрів каната умовам його експлуатації. Умови роботи каната вимагають певного набору механічних й експлуатаційних властивостей, які залежать не тільки від механічних властивостей вихідного дроту, але й від самої конструкції каната.

Особливістю цих канатів є також і те, що вони експлуатуються в умовах складного напруженого стану, постійно піддаючись одночасній дії розтягання, вигину й крутіння. Це жадає від канатів насамперед високої твердості вигину. У цілому ж працездатність канатів залежить від властивостей дроту, конструктивних і технологічних режимів закручування, способів і режимів силової обробки: преформації, рихтування, витяжки, механікотермічної обробки, пластичного обтиснення. Найбільше широким технологічним прийомом є пластичне обтиснення і наступне їх закручування в канати. Вибір ступеня й інструмента для обтиснення й закручування повинен обумовлюватися умовами експлуатації каната. Досвід виготовлення й застосування пластично обтиснутих канатів одинарного закручування й канатів подвійного закручування із пластично обтиснутих дротів показав, що глибоке пластичне обтиснення раціонально у випадках, коли від каната потрібна висока міцність, зносостійкість при

абразивному зношуванні, поздовжня й поперечна твердість, малі пружні й залишкові подовження – насамперед грозозахисні троси, арматурні канати, прядєдріт.

Для напрямку сталевих ниток у процесі скрутки канатів і металокордів на крутильних машинах застосовуються твердосплавні проводки або глазки.

Глазки з твердих сплавів в десятки разів, а декількох в сотні раз більше стійкі, а ніж сталеві глазки і в багато разів дешевше алмазних глазків. Тверді сплави, які застосовуються для заготовок глазків, складаються з найдовших зерен карбідів різних тугоплавких металів з цементованих металом – зв´язкою кобальтом, але проблема обробки такого матеріалу ще більш загострюється і потребує застосування ефективних технологій обробки.

Найбільш розповсюдженими методами, які застосовуються для обробки глазків окрім слюсарно-механічної є: алмазне шліфування, електрохімічна і електроерозійна обробка. Однак, застосування алмазного шліфування для складнофасонної поверхні глазка не завжди можливо у силу кінетичних особливостей метода і конструкції інструмента. Слюсарно-механічний метод малопродуктивен і вимагає значних витрат високо кваліфікованої ручної праці.

Електрохімічна обробка [7,8] застосовується для обробки твердосплавного матеріалу, вона характеризується високою продуктивністю зніманням металу з поверхонь складної форми і малої жорсткості (за рахунок відсутності високих тисків на заготовку), високою точністю і низькою шорсткістю, відсутністю змін фізико механічних властивостей поверхневого шару , можливістю застосування багатократного застосування електрода-інструмента.

Для виготовлення отворів глазків широко використовується спосіб електроімпульсного прошивання, який забезпечує потрібну якість та точність обробки. Даний спосіб застосовує для руйнування матеріалу електричну енергію у вигляді не стаціонарних форм електричних розрядів, зокрема

імпульсних розрядів. Тому процес обробки супроводжується паузами,які негативно впливають на продуктивність обробки.

За роботами Носуленка В.І. [2,3] відомий спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), якому енергія підводиться в зону обробки безперервно. Завдяки цьому, а також тому, що спосіб дозволяє вводити в зону обробки великі потужності електричного струму, даний спосіб володіє високою продуктивністю обробки.

Перші спроби застосування способу РОД для обробки отворів відомі за роботами [5,6,7,8]. В них показана принципова можливість їх отримання та наведенні деякі досягнуті технологічні характеристики та режими РОД, що їм відповідають. Так, за даними роботи [6] продуктивність обробки круглого отвору в матеріалі ВК8 при сила струму A досягає 322 $^{мм^3}/_{хв}$, що приблизно 23 рази перевищує продуктивність електроімпульсної обробки.

Однак, впровадження у виробництво процесу РОД твердосплавних волок стримується відсутністю експериментальних даних про, взаємозв'язок технологічних характеристик даного процесу електричним і електродинамічним режимами обробки та геометричними параметрами отворів, які обробляються.

В роботі, на підставі експериментальних досліджень, отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД твердосплавних заготовок , які дозволяють прогнозувати їх та оптимізувати режим обробки .

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота пов'язана з напрямком досліджень кафедри «Машинобудування, мехатроніка і робототехніка» Центральноукраїнського національного технічного університету, за науково-дослідною роботою

«Розмірна обробка електричною дугою твердосплавних інструментів» (№ державної реєстрації 0118U006200).

Мета і задачі дослідження

Удосконалення технології чорнової обробки твердосплавних глазків крутильних машин за рахунок виявлення взаємозв'язку технологічних характеристик процесу РОД з електричними і гідродинамічними режимами обробки та геометричними параметрами отворів, що обробляється, для їх прогнозування та оптимізації режиму обробки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- обґрунтувати технологічну схему формоутворення отворів твердосплавних глазків;
- розробити методику моделювання технологічних характеристик процесу РОД твердосплавних глазків;
- виконати експериментальні дослідження продуктивності процесу РОД твердосплавних глазків;
- виконати експериментальні дослідження якості та точності процесу РОД твердосплавних глазків.

Об'єкт дослідження – особливості чорнової обробки твердосплавного інструменту способом РОД.

Предмет дослідження – твердосплавні глазки для крутильного обладнання.

Методи дослідження

Дослідження базувалися на основних положеннях розмірної обробки металів електричною дугою, обробки матеріалів за спецтехнологіями, автоматизації інженерних розрахунків в машинобудуванні, технології фізико-технічної обробки матеріалів, обладнанні для обробки матеріалів за

спецтехнологіями, просторового комп'ютерного моделювання та проектування систем ОМТ, теоретичних основ наукових досліджень, технології конструкційних матеріалів, а також розробки технології та експериментального пристрою для обробки твердосплавних глазків способом РОД на верстаті Дуга – 8Г.

Наукова новизна отриманих результатів

Удосконалено технологію обробки твердосплавних глазків крутильного обладнання за рахунок застосування процесу розмірної обробки електричною дугою. Виявлено взаємозв'язок технологічних характеристик процесу розмірної обробки електричною дугою твердосплавних глазків з електричними та гідродинамічними режимами обробки, а також геометричними параметрами зовнішньої бічної робочої поверхні, що обробляється. Останнє розширює інформацію про фізичну картину формоутворення калібруючого отвора твердосплавного глазка електричною дугою в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини.

Практичне значення отриманих результатів

Отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу розмірної обробки електричною дугою твердосплавних глазків, а саме продуктивність обробки, питомої витрати електроенергії, шорсткості бічної робочої поверхні, бічного міжелектродного зазору та відносного лінійного зносу графітового електрода-інструмента, які дозволяють прогнозувати їх, та оптимізувати режими обробки.

Показано, що застосування процесу розмірної обробки електричною дугою для виготовлення твердосплавних глазків збільшує продуктивність в 4,1-5,2 разів порівняно з продуктивністю механічної обробки – алмазним

шліфуванням, та 4,2-6,3 разів порівняно з продуктивністю електроімпульсної обробки.

Особистий внесок здобувача

Наукові результати магістерської роботи одержані автором самостійно. У публікації, яка виконана, магістру належить технологічна схема формоутворення за принципом копіювання.

Апробація результатів магістерської роботи

Основні положення та результати магістерської роботи повідомлені і обговорені на LVI науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти приуроченій Дню науки – 2022 р. в ЦНТУ з доповіддю на тему: «Обробка електричною дугою твердосплавних глазків крутильних машин».

Публікації

За темою магістерської роботи опубліковано 1 друковану роботу у збірнику тез доповідей «Наука виробництву, 2022».

Структура та обсяг роботи

Магістерська робота складається зі вступу, п’яти розділів, списку використаних джерел із 30 найменувань та додатку. Повний обсяг магістерьокої роботи становить 89 сторінки, включаючи 21 рисунки, 11 таблиць. Список використаних джерел та додаток займають 6 сторінок.

Розділ 1

ОБРГУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз сучасних технологій виготовлення твердосплавних глазків крутильних машин

В сучасному машинобудуванні для виготовлення твердосплавних глазків (рис. 1.1). використовуватися наступні методи обробки:

- механічна обробка – алмазно-образивна обробка;
- електрохімічна обробка;
- електроерозійна.



Рисунок 1.1. Твердосплавні проводки і глазки

Механічна обробка отворів твердосплавних заготовок виконується на стадіях кінцевих операція за допомогою алмазнообразивних інструментів. Виконання кінцевих операцій при обробки твердих сплавів за допомогою абразивних інструментів не забезпечує задовільних результатів, за рахунок низької продуктивності,підвищеного зносу кругів, хімічної взаємодії образива з матеріалом , який обробляється, високих температур в зоні шліфування, яка від´ємно впливають на якість поверхні яка обробляється.

Жорсткі вимоги до точності розмірів і шорсткості поверхні глазка забезпечується шліфуванням алмазним інструментом на етапі чорнової

обробки отворів [1], з продуктивністю Q = 7- 25 мм³/хв. сплаву ВК8 при шліфуванні головками АГЦ на металевій зв'язці М5-2 з зернистістю 125/100 при глибині шліфування t від 0.005 до 0,02 мм. Така інтенсифікація алмазного шліфування обумовлена головною умовою − не допущення появи мікро тріщин при питомому навантаженні інструмента на твердосплавну заготовку. Однак таким способом малопродуктивний, особливо на стадіях переточування отворів твердосплавних глазків і потребує значних витрат висококваліфікованої ручної праці.

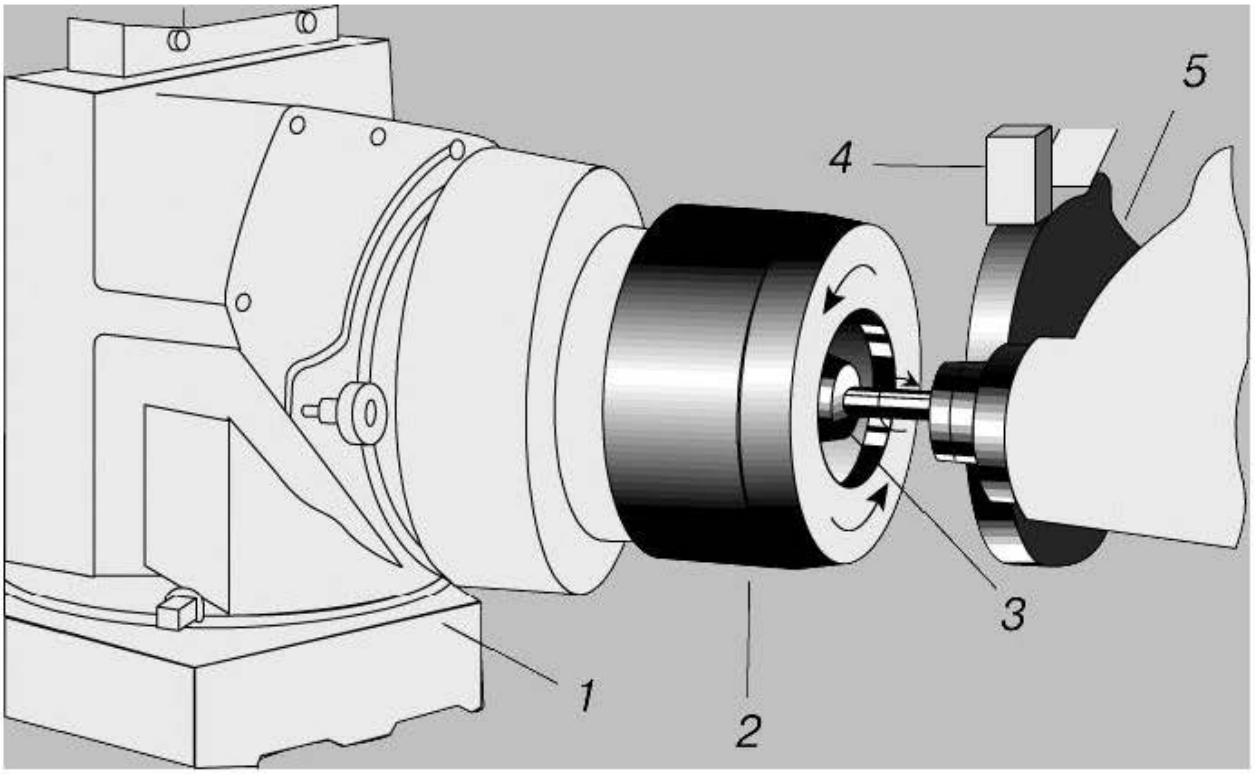


Рисунок 1.2. Принципова схема шліфування:1 - станина з шліфувальною головкою; 2 - заготовка; 3 - головка АГЦ; 4 - всмоктувач; 5 - абразивний круг

Електрохімічна обробка (ЕХО) твердосплавних глазків [7] заснована на принципі анодного розчину металу заготовки, яка обробляється , а отримані неметалеві з'єднання і зносяться з зони обробки в результаті переміщення електрода – інструмента і прокатуванні електрода через електродний проміжок. Електрохімічна обробка характеризується лінійною розчинністю і

не залежить від фізичних властивостей металів і сплавів такі , як твердість, в'язкість і міцність теплостійкість,визначаючих продуктивність звичайних металів різання.

Процес відбувається при густині струму в катоді 40 – 15 А/мм^2 здійснюється металевим катодом зі щілинами, крізь які нагнітається електроліт у між електродами проміжок . Однак , точність формоутворення отвору твердосплавного глазка низька та характеризується підвищеними ухилами стінок, підвищеними радіусами округленнями стінки з калібруючим поясом, що пояснюється небажаним розчиненням електролітом матеріалу матриць на цих ділянках. Крім того, не досягання оптимального гідродинамічного режиму прокачування електроліту крізь електродний зазор. Може привести до такого негативного явища, як струміневість потоку. Негативний вплив на якість поверхні яка обробляється оказує разтравлення по межах зерен, які є результатом нерівномірності процесів анодної розчинності. При розтравленні знижуються механічні властивості виробів з твердого сплаву в середньому 5 – 15% . Останнє негативно впливає на якість поверхні після ЕХО

Електроімпульсна обробка [8] заснована на використанні електричних розрядів, що ідуть з малою шпаруватістю, при зменшеному відношенні амплітуди розрядного струму до тривалості імпульсів. Електрод-інструмент, як правило, включается на зворотну полярність (анод). Потужність — від сотень ватт до декілька десятків кіловат (рис. 1.3). Робочим середовищем електроімпульної обробки є, як правило, органічне середовище: суміш масла та газу у співвідношенні 1:1. Електроди-інструменти виготовляють із термостійких матеріалів, таких, що добре проводять тепло, наприклад, із вуглеграфіту, міді, латуні тощо. Із роботи [8] відомо, що енергія імпульсу струму, яка розподіляється між анодом, катодом та столом розряду, виділяється протягом вельми короткого часу при високій густині, що визначає специфіку фізичних процесів. Як наслідок цього відбувається вилучення металу із заготовки, що обробляється, зміна структури та

властивостей поверхневого шару, утворення внутрішніх напружень, знос електрода-інструмента, розкладання робочої рідини та інші фізичні явища.

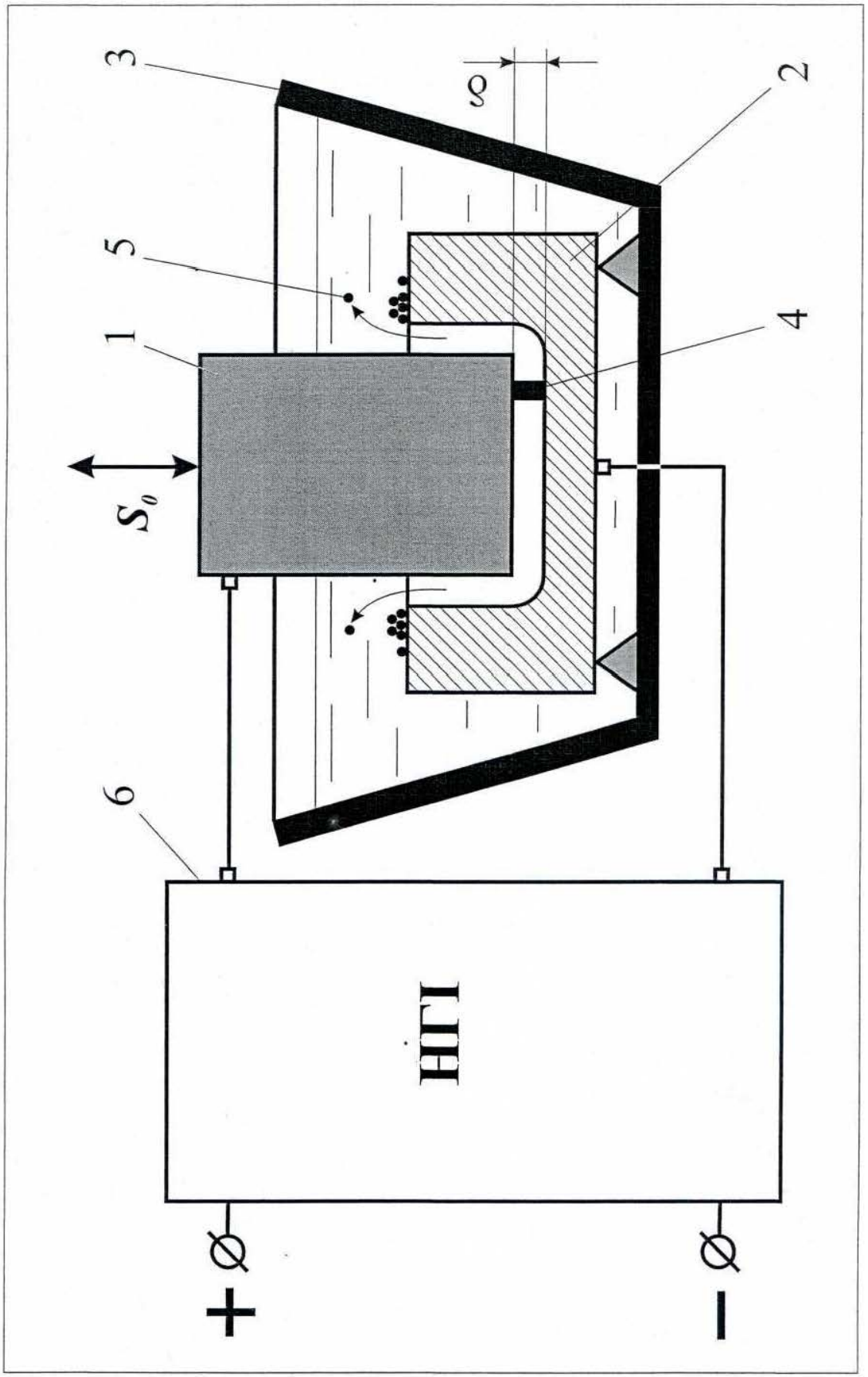


Рисунок 1.3. Принципова схема електроімпульсної обробки: 1 – електрод – інструмент; 2 – електрод – заготовка; 3 – ванна з робочою рідиною; 4 – електричний розряд (імпульс); 5 – продукти ерозії; 6 – незалежний генератор імпульсів

Протягом імпульсу метал аноду та катоду в основному вилучається в рідкому та пароподібному станах. При коротких імпульсах доля металу, що випарена, доходить до 90 %, і з ростом тривалості імпульсу г, поступово зменшується до 5 % при t_i = 1000 мкс. Робоча рідина, що оточує канал розряду, випаровується, утворюючи газову порожнину. В початковий момент швидкість руху межі газової порожнини досягає 200 м/с, а тиск у порожнині - десятків МПа. Внаслідок цього метал, що оброблюється, випробовує значний механічний, але локальний, тиск. Після закінчення імпульсу струму газова порожнина продовжує за інерцією розширюватися, що разом з конденсацією парів металу приводить до швидкого падіння тиску в ній, аж до тиску, який нижче атмосферного. В момент, коли розміри газової порожнини наближаються до найбільших, а тиск у них - до найменшого, перегрітий метал, який знаходиться в лунці, що утворилася, закипає та викидається із неї. Реактивним струменем парів металу, що залишився в лунці, рідкий метал витискується із неї, застигає та утворює валик, що облямовує. Викид цієї додаткової порції металу відбувається через (3...5)г, після імпульсу струму (рис 1 4). а далі охолоджена поверхонь лунки приймає ос і точну форму. Фізика розглянутих явищ досліджена Б. М Золотих [1 5, 16].

За роботою [9] відомі дві обставини, які дозволяють в умовах обробки при малої напрузі отримати місцеві напруження електричного поля, що приводять до пробою. По-перше, цьому сприяє шорсткість поверхні електродів: випадковий розподіл місцевих мікронерівностей може зменшити найкоротшу відстань між електродами. До того ж, поблизу гострих виступів на поверхні місцева напруженість електричного поля дуже велика. По-друге, пробивна напруга значно знижується, оскільки робоче середовище містить дрібні газові, тверді та рідкі частки. Наприклад, якщо в робочому середовищі є електропровідні частки стружки, то напруженість електричного поля у самому діелектрику робиться більшою, ніж при таких ж умовах в ідеально чистому середовищу. Слід відмітити і більш низьку електричну міцність на

межі між газом та рідиною.

Обробка отворів твердосплавних глазків може повністю відбуватися на електроімпульних верстатах або частково в сполученні з попереднім фрезеруванням, що має мету вилучення із порожнини можливо більшу кількість металу і тим самим знижуючи загальну трудомісткість обробки. Основну масу металу при електроімпульній обробки вилу чають на чорнових режимах, а далі, поступово знижуючи електричний режим, обробляють поверхонь. Обробка здійснюється електродами-інструментами із вуглецево-графітового матеріалу ЭЭПГ або МПГ-7, при чорновій обробці іноді застосовують електроди-інструменти із ливарних сплавів алюмінію.

Електроімпульсна обробка твердосплавних глазків може здійснюватися після загартування, завдяки чому усувається її викривлення в наслідок термообробки.

При електроімпульсній обробки твердосплавних глазків доцільно досягати шорсткості обробленої поверхні R_a4-8 мкм. Подальше зниження шорсткості поверхні, якщо в цьому є необхідність, більш продуктивніше отримувати шліфуванням.

За даними робіт [8, 9] твердосплавних заготовок після електроімпульної обробки формоутворюючої поверхні до рівня шорсткості R_a4-8 мкм зношуються більш рівномірно порівняно з матрицями, які оброблені слюсарно-механічним методом. Випробування їх показали, що деталі або напівфабрикати вилучалися з них достатньо легко. Цей інструмент показав підвищену стійкість, в середньому на 30-40 %. В деякий випадках їх стійкість збільшувалася до двох разів. Наприклад, замість 5000-6000 деталей отримали 10000-12000.

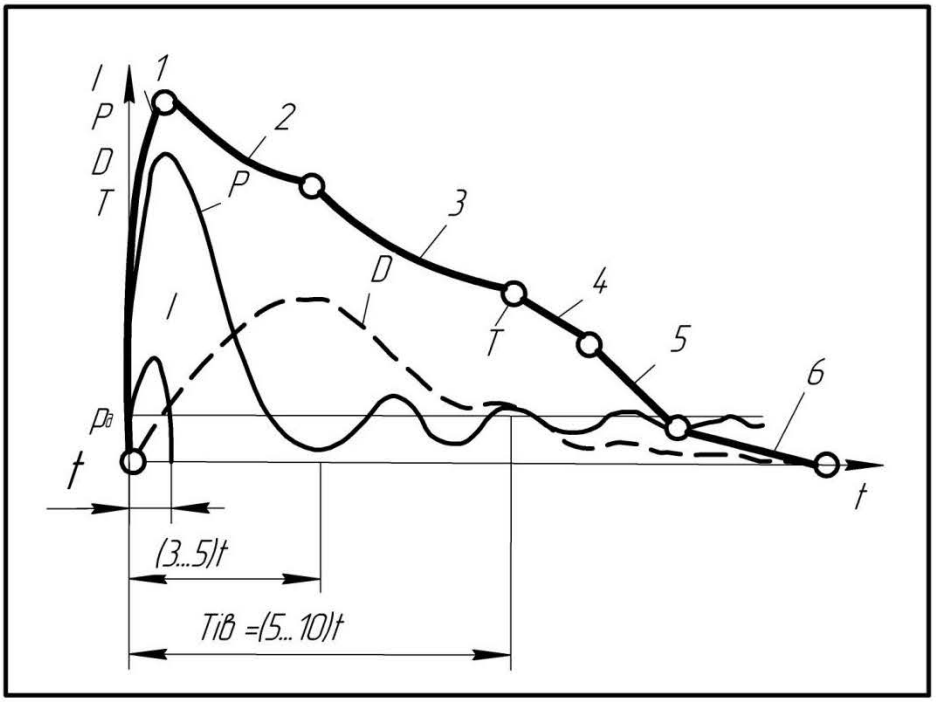


Рисунок 1.4. Зміна сили струму *I*, тиску *p* в газовій порожнині, її діаметр D та температура *T* поверхні лунки процесф електроімпульсної обробки [14]

Трудомісткість електроімпульної обробки порівняно з слюсарно-механічним методом знижується в 1,5-2 рази, на 30-40 % і більше скорочується слюсарна доробка.

При електроімпульсній обробки отворів твердосплавних глазків виготовляють з використанням технологічної схеми формоутворення за принципом прошивання, що реалізується при нерухомій заготовці та поступальному русі електрода-інструмента, який переміщується в слідкуючому режимі за торцевим міжелектродним зазором.

За даними роботи [12, с. 29-30] відомо, що при електроімпульсній обробки з підвищенням сили струму швидкості знімання та евакуації продуктів ерозії будуть зростати спочатку' приблизно пропорційно. При деякому значенні сили струму (для заданих значінь площі та глибини) об'єм паро-газової фази суттєво зростає і в цьому об'ємі починає зростати кількість так званих «фіктивних» розрядів, що не виробляють корисного знімання металу. При цьому швидкість знімання, тобто продуктивність обробки, почне сповільнюватися (рис. 1.5). При надвеликій (для даної

площі) енергії паро- газова фаза може зовсім витиснути робочу рідину із міжелектродного зазору , а швидкість знімання буде прямувати до нуля. Одночасно припиниться і подальше зростання паро-газової фази, знову почнеться знімання, та показаний цикл повториться. Отже, при надмірних енергіях (струмах) та малих площах збуджуються автоколивання, що характеризуються циклічною зміною швидкості знімання при різкому зниженні її середнього значення. Саме тому, електроімпульна обробка висадочних матриць з площею торцевої поверхні до 500 мм^2 за даними роботи [11, с. 10-11] здійснюється з використанням сили технологічного струму до 5 А. Даному струму відповідає продуктивність обробки до 5 мм^3/хв. при задовільному значенню шорсткості обробленої поверхні.

Як бачимо, продуктивність електоімпульсній обробки твердосплавних заготовок дуже низька. Крім того, процес обробки на малій силі технологічного струму супроводжується підвищеним відносним лінійним зносом графітового електрода-інструмента, який для даних умов досягає 50 %, що негативно впливає на точність формоутворення твердосплавних глазків. Тому, для підвищення точності, обробку здійснюють послідовно декількома електродами-інструментами, що негативно впливає на собівартість електроімпульсної обробки.

Спосіб електроімпульсної обробки твердосплавних глазків застосовує для руйнування матеріалу електричну енергію у вигляді нестаціонарних форм електричних розрядів, зокрема імпульсних розрядів. Тому процес обробки супроводжується паузами, які негативно впливають на продуктивність обробки.

За роботами Носуленка В. І. [3,18] відомий спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), в якому енергія підводиться в зону обробки безперервно. Завдяки цьому, а також тому, що спосіб дозволяє вводити в зону обробки виликі потужності електричного струму, він

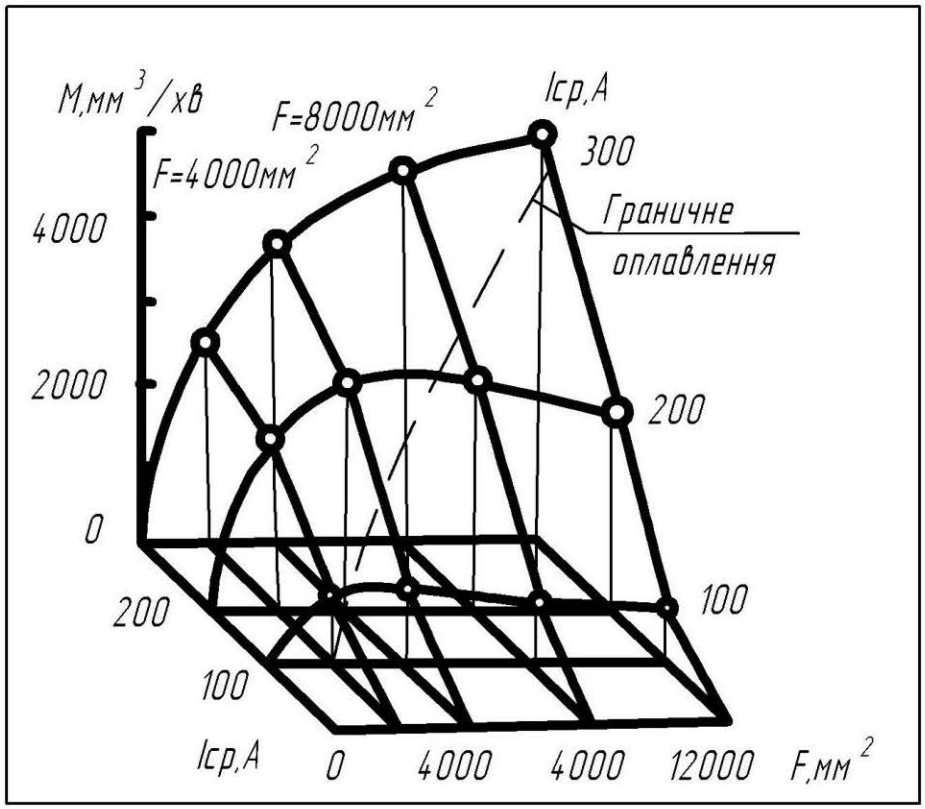


Рисунок 1.5. Просторова діаграмма «струм – площа – продуктивність» процесу електроімпульсної обробки [14]

володіє високою продуктивністю обробки.

Спосіб РОД є об'єктом подальшого дослідження в даній роботі на предмет обробки твердосплавних глазків.

1.2. Про технологічні можливості процесу РОД

Фізична суть процесу РОД полягає в тому, що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою, яка горить поміж електродом-інструментом і електродом-заготовкою в потоці рідини при динамічному тиску потоку в зоні обробки не менше 1 ...2 кПа (що відповідає швидкості потоку приблизно 1,5...2 м/с) [17]. Звичайно РОД здійснюють дуговим розрядом, що горить у поперечному, по суті, потоці робочої рідини (рис. 1.6). Одержаний таким чином дуговий розряд має високі енергетичні характеристики, і переміщується по поверхні електродів. При цьому

відбувається інтенсивне локальне руйнування металу за рахунок випаровування й крапельного викидання розплаву, а потік рідини видаляє із зони обробки отримані продукти ерозії. Усе це в сукупності забезпечує оптимальне протікання процесу розмірної обробки. Типова осцилограма струму й напруги дуги при РОД (рис. 1.7) принципово не відрізняється від типової осцилограми струму і напруги звичайної стаціонарної дуги типу зварювальної чи плазмової дуги для різання металу.

В умовах РОД енергетичні характеристики розряду (густина струму, напруженість електричного поля) регулюються легко, плавно й у широких межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку й при збільшенні (зменшенні) останнього збільшуються (зменшуються), що треба розглядати як результат саморегулювання енергетичних характеристик розряду у функції динамічного тиску потоку .

Як наслідок, в умовах такого процесу можна легко керувати якістю процесу обробки незалежно від струму за рахунок зміни динамічного тиску потоку, здійснюючи обробку в широкому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення й аж до переважаючого тонкого розмірного випаровування. Таким чином, динамічний тиск потоку робочої рідини в умовах РОД є основним параметром процесу, що визначає, у кінцевому підсумку, можливість та якісну сторону процесу обробки

Робочою рідиною є рідини-діелектрики, наприклад, нафтопродукти, вода, розчини, емульсії та суспензії. Звичайно, що в умовах РОД можуть бути ефективно використані також різноманітні гази, перш за все повітря. Проте рідини-діелектрики, принаймні зараз, мають перевагу з точки зору технологічних та експлуатаційних характеристик і тому РОД звичайно реалізують із застосуванням середовищ-рідин.

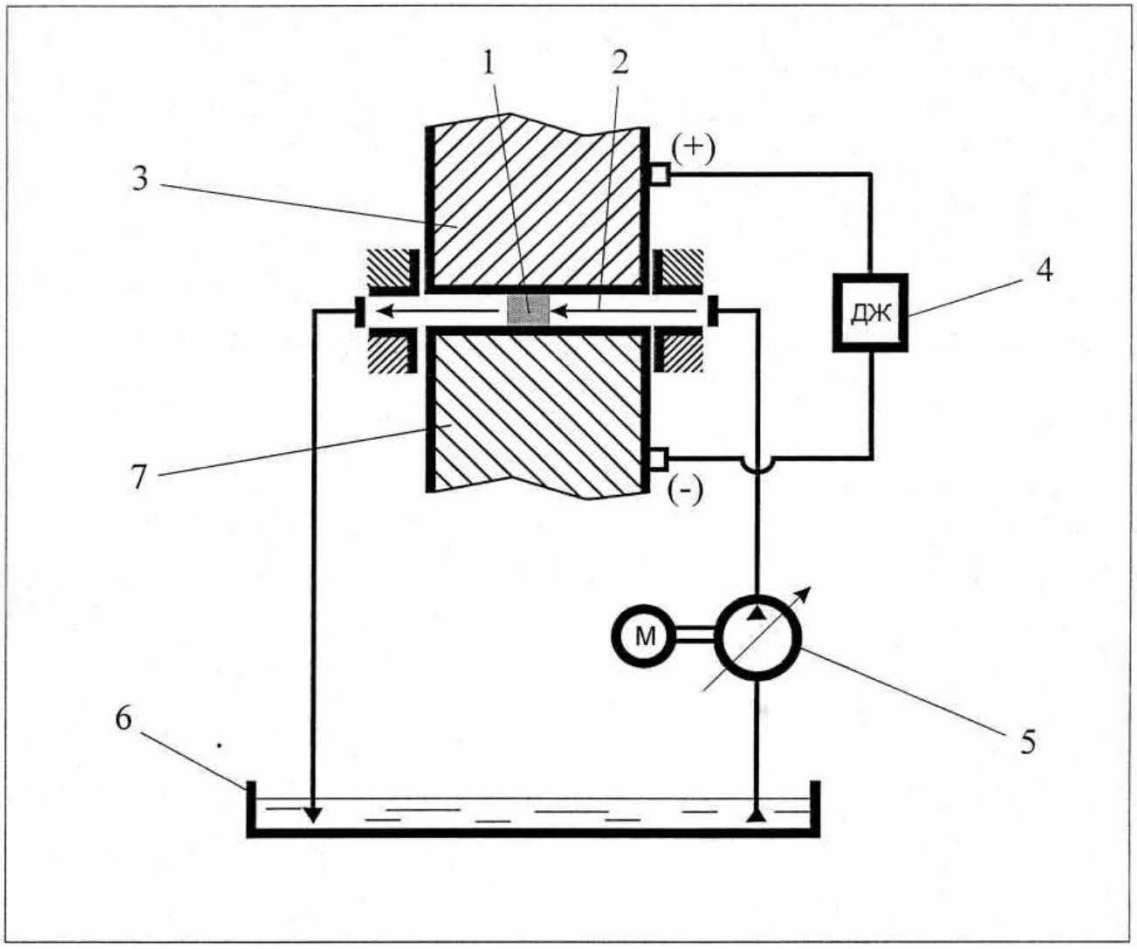


Рисунок 1.6. Принципова схема способу РОД [3]: 1. електричиа дуга; 2. поперечині потік робочої ридини; 3. електрод-інструмент; 4. джерело живлення постійним струмом; 5. насос робочої рідини; 6. бак з робочою рідиною; 7 - електрод-заготовка

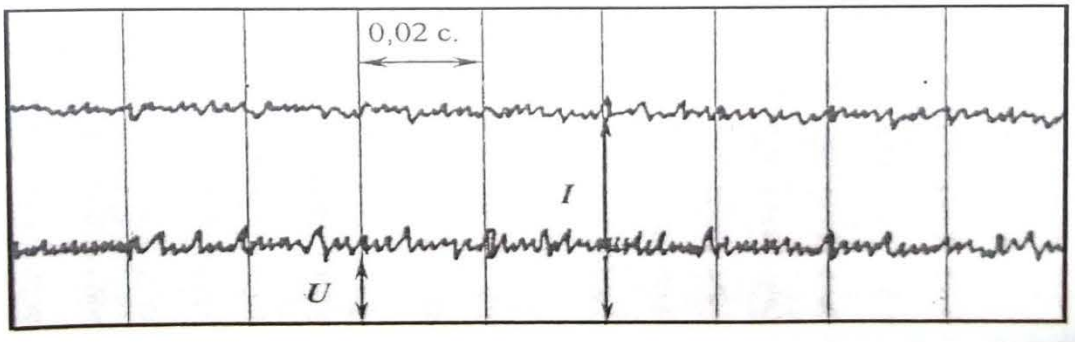


Рисунок 1.7. Типова осцилограма сили струму *I* та напруги *U* при РОД[3]

Електроди-інструменти можуть бути плавкими, наприклад, сталевими, і неплавкими, наприклад, вольфрамовими, профільованими, і не профільованими. Вони виготовляються з тих же матеріалів і мають

приблизно таку ж ерозійну стійкість, як і при відомих способах електроерозійної обробки. Так, високу стійкість забезпечують електроди-інструменти із графіту при застосуванні робочої рідини І нафтопродуктів.

Дуга при РОД може живитися як постійним, так і змінним струмом. При живленні дуги змінним струмом стабільність процесу гірша, а продуктивність помітно знижується. У цьому зв'язку, а також із метою використання ефекту полярності електричної ерозії, який дозволяв забезпечиш максимальну продуктивність обробки едекгрода-заготовки й мінімальний знос електрода-інструмента, дугу РОД звичайно живлять постійним струмом. Джерелом живлення струмом є зварювальні випрямлячі або генератори із зовнішньою падаючою характеристикою. Напруга робочого ходу джерел живлення визначається особливостями реалізації технологічних схем формоутворення й коливається в межах 20...50 В і більше. Напруга холостого ходу коливається в межах 50... 100 В і більше. Потужність джерел живлення струмом визначає продуктивність обробки й може досягати десятків і сотень кВт.

Якщо змінювати типорозміри електродів, і надавати їм відповідні рухи подачі, можна при використанні відповідних технологічних прийомів здійснити зазначені закономірності процесу РОД і, таким чином, реалізувати практично всі відомі технологічні схеми формоутворення.

Якість обробленої поверхні. яка визначається її шорсткістю та глибиною зони термічного впливу, є головним чином, функцією динамічного тиску потоку робочої рідини й, менше сили робочого струму покращується при збільшенні динамічного тиску потоку та зменшенні сили струму й, у цілому. не поступається досягнутій при відомих способах електроерозійної обробки. Глибина, структура й твердість зони термічного впливу легко регулюється за рахунок зміни динамічного тиску потоку, і при збільшенні останнього до відповідних значень незалежно від сили струму ця зона може бути практично відсутньою.

Оптимальна величина міжелектродних зазорів коливається в межах 0,1...0,2 мм. Точність обробки, яка визначається перш за все зносом електрода-інструмента та

коливанням величини міжелектродного зазору, у цілому не поступаються досягнутій при відомих способах електроерозійної обробки.

Порівняльна оброблюваність матеріалів в умовах РОД оцінюються аналогічно, як і при відомих способах електроероийної обробки. Продуктивність обробки прямо пропорційна силі струму, яка може сягати декількох тисяч ампер, і в багато разів перевищує продуктивність елентроскрової обробки. Наприклад, при силі струму 1000 А продуктивність при обробці сталей досягає 30 000 мм хв при R_a 6,3 мкм та глибині зони термічного впливу в межах декількох сотих часток міліметра Типові витрати електроенергії в залежності від режимів обробки складають для сталей 3...10кВт год/кг.

Перші спроби застосування способу РОД для обробки порожнин не круглої форми відомі за роботами [3, 4, 5. 6]. В них показана принципом можливість їх отримання та наведено деякі досягнуті технологічні характеристики ті режими РОД що їм відповідають.

Розділ 2

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Обґрунтування технологічної схеми формоутворення твердосплавних глазків крутильних машин

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин використовували технологічну схему формоутворення за принципом прошивання з об'ємнім копіюванням форми електрода – інструмента, що має поступальних рух, з прокачуванням робочої рідини в торцевому зазорі за напрямком від периферії до центру отвора заготовки.

Відомо [2], що при реалізації процесу РОД енергетичний стан електричної дуги визначає динамічний тиск робочої рідини. Із підвищенням динамічного тиску,який пропорційний швидкості потоку в міжелектродному зазорі, електрична дуга стискується в енергетичному та геометричному відношенні, діаметр елементарної лунки зменшується, що приводить до зменшення шорсткості обробленої поверхні

Як показанов роботі [5], технологічна схема формоутворення, що використовується (рис. 2.1, а), порівняно з іншими схемами, дозволяє керувати рівномірністю розподілу швидкостей потоку в торцевому між-електродному зазорі. Так, в бічному між електродному зазорі швидкость потоку підтримується на постійному рівні у зв'язку з тим, що бічний зазор впроцесі РОД нам'якому режимі(рис.2.1,в) торцевий зазор радіальному напрямку практично не змінюється, а площа потоку зменшується. Останнє призводить до збільшення швидкості потоку в радіальному напрямку. При реалізації процесу РОД на жорсткому режимі (рис. 2.1, д) торцевий зазор в радіальному напрямку інтенсивно зростає, а площа потоку збільшується. В наслідок цього швидкість потоку в радіальному напрямку зменшується. Встановлено, що між м'яким та жорстким режимами РОД є такий режим

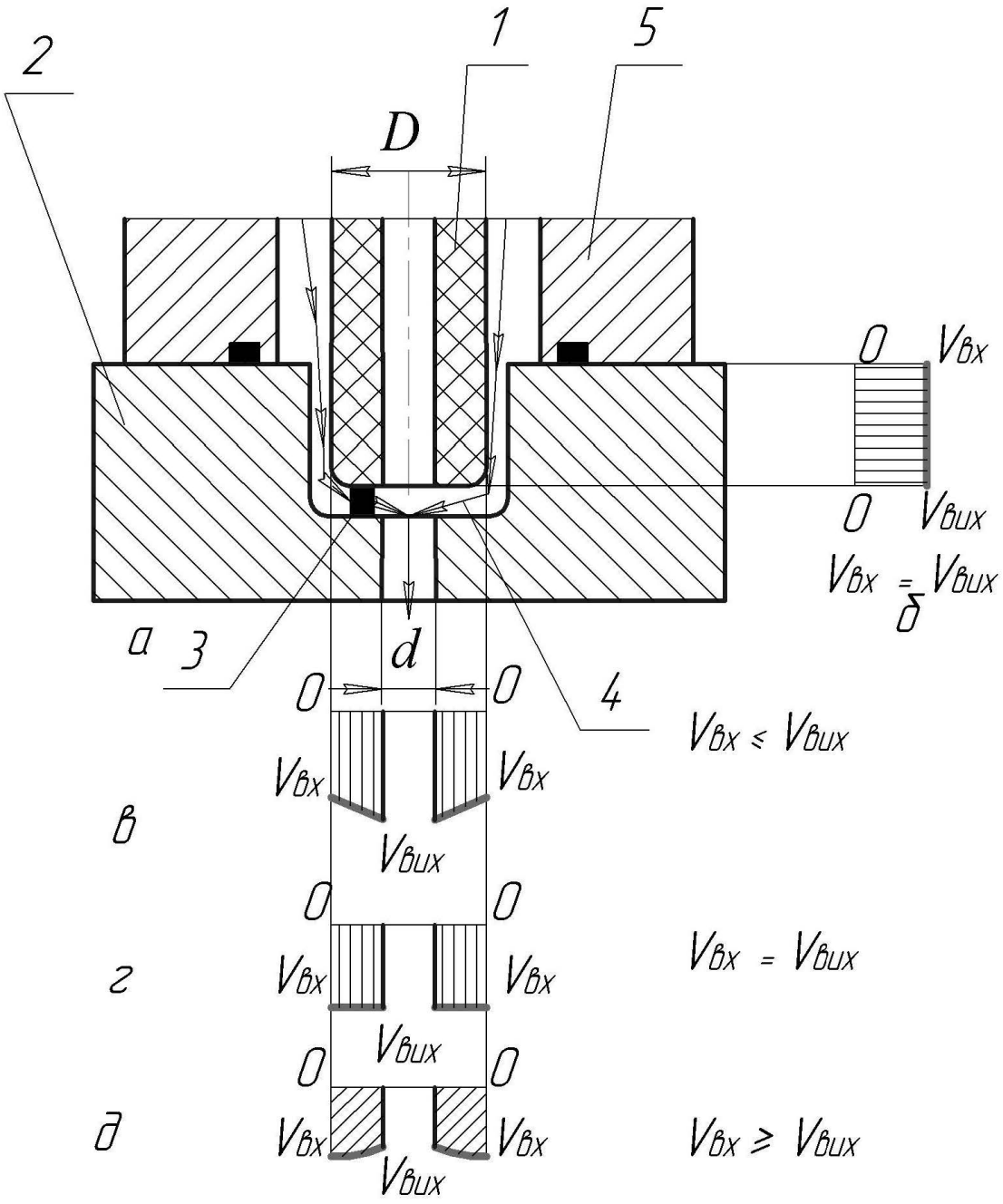
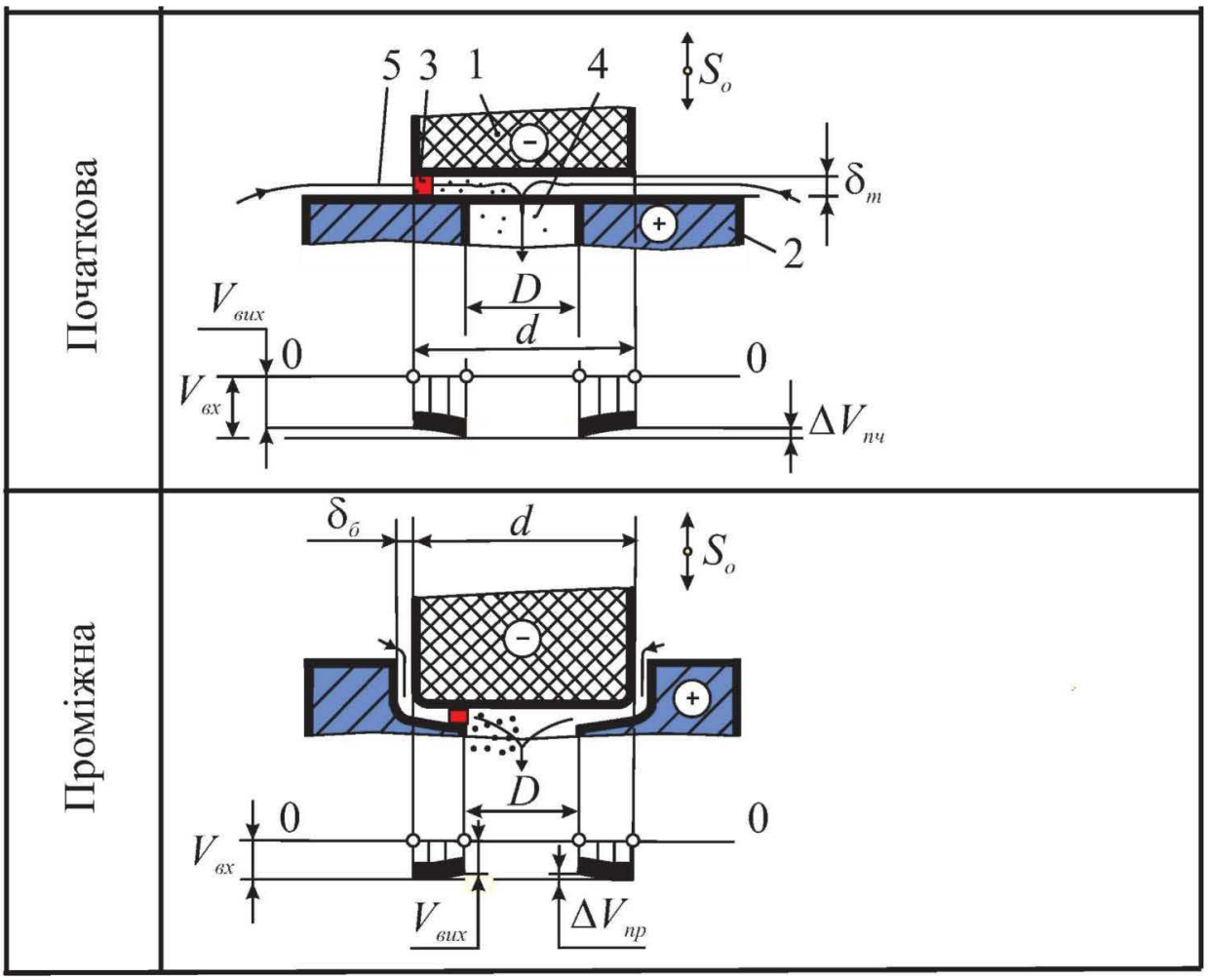


Рисунок 2.1. Технологічна схема формоутворення твердосплавних глазків крутильних машин: а – схема; б – епюра швидкості потоку в бічному міжелектродному зазорі; в,г,д – епюри швидкості потоку в торцевому між електродному зазорі, відповідно, на м'якому, спеціальному та жорсткому режимі РОД; 1- електрод – інструмент; 2 – твердосплавна волока; 3- електрична дуга; 4- гідродинамічний потік робочої рідини; 5 – герметизована камера

Таблиця 2.1

Технологічна схема формоутворення та епюри швидкостей потоку в торцевому МЕЗ



Примітка: 1 – графітовий ЕІ; 2 – заготовка; 3 – електрична дуга; 4 – продукти ерозії; 5 – гідродинамічний потік

(спеціальний, рис.2.1,г) при якому швидкість потоку в радіальному напрямку підтримується на постійному рівні. Саме тому, такому режиму відповідає рівномірна шорсткість обробленої торцевої поверхні.

2.2. Методика математического моделювання технологічних характеристик процессу РОД твердосплавних глазків крутильних машин

2.2.1 Прийняття рішень перед планування експерименту [21]

На підставі апріорної інформації було вибрано чотири фактора, які повинні впливати на технологічні характеристики процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин (табл. 2.2)

- сила технологічного струму I(X_1), А;

- статичний тиск робочої рідини на вході в зазор $P_{ст}$(X_2), МПа;

- площа обробки F(X_3), $мм^3$

- глибина обробки h (X_4), мм

Усі вибрані фактори задовольняють умови керованості, операціональності та однозначності.

Інші параметри процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин були зафіксовані на таких постійних рівняннях:

- Склад робочої рідини

  Масло «Індустріальне І-20А» ГОСТ 20790-75 – 50%

  Гас освітлювальний ГОСТ 4953-68 – 50%

- Полярність обробки вибирається з умов досягання найменшого відносного зносу графітового електрода – інструмента при обробці твердого сплаву. В роботі [17] показано, що такою полярністю при РОД твердого сплаву є пряма.

Після експерименту розраховувалися або вимірялися такі техноголічні характеристики процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин , як:

- продуктивність обробки M, $мм^3/_{хв}$

- питома продуктивність обробки M_a, $мм^3/_{А}$ хв.;

- питома витрата електроенергії a, кВт $год/_{кг}$;

Таблиця 2.2

Матриця плану 2^{4-1} експериментального дослідження фізико-технологічних характеристик процесу чорнової РОД бічної поверхні зразка за формулою «графітовий ЕІ – твердий сплав ВК8» з використанням способу зворотного прокачування

Фактори				I, А	P_{cm}, МПа	F, мм²	h, мм	Технологічні характеристики					
Основний рівень (X_{i0})				35	1,25	125	2	M, мм³/хв	M_a, мм³/А·хв	a, кВт·год/кг	Ra, мкм	δ, мм	γ, %
Інтервали варіювання (ΔX_i)				15	0,25	25	1						
Верхній рівень (x_i = +1)				50	1,5	150	3						
Нижній рівень (x_i = -1)				20	1,0	100	1						
Код				x_1	x_2	x_3	x_4	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6
Номер досліду	1	Порядок реалізації	9	+	+	+	+	131,34	2,63	10,72	12	0,03	16
	2		2	-	+	+	-	85,85	4,3	6,56	8,5	0,005	12,90
	3		7	+	-	+	-	56,84	1,14	24,77	12,5	0,035	10,64
	4		1	-	-	+	+	31,20	1,56	18,05	10	0,020	8,27
	5		13	+	+	-	-	153,15	3,06	9,2	11.5	0,020	4,48
	6		14	-	+	-	+	51,60	2,58	10,91	8	0,005	3,13
	7		3	+	-	-	+	193.24	3,86	7,28	11	0,035	16,15
	8		6	-	-	-	-	94,60	4,73	5,95	9	0,015	17,36
Досліди у центрі плану		1		0	0	0	0	99.6	2.85	9.89	10	0,020	12.23
		2		0	0	0	0	94.1	2.69	10.47	11.5	0,015	10.5
		3		0	0	0	0	99.5	2.84	9.9	10	0,020	11.9
		4		0	0	0	0	75.5	2.16	13.05	11.5	0,010	9.8

- бічний між електродний $\delta_Б$, мм;

- лінійний відносний знос електрода – інструмента γ, %.

- шорсткість бічної поверхні R_a, мкм;

2.2.2 Побудова матриці планування експерименту

Значення факторів на основному , верхньому та нижньому рівнях, а також інтервали варіювання наведено в таблиці 2.2.

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

$$x_1 = \frac{X_1 - 35}{15}, \tag{2.1}$$

$$x_2 = \frac{X_2 - 1{,}25}{0{,}25}, \tag{2.2}$$

$$x_3 = \frac{X_3 - 125}{25}, \tag{2.3}$$

$$x_4 = \frac{X_4 - 2}{1}, \tag{2.4}$$

Повній факторний експеримент для п´яти факторів *(k) і* двох рівних *(P)* повинен включити в себе таку кількість дослідів:

$$N = P^k = 2^4 = 16, \tag{2.5}$$

Задача зводиться до побудування лінійної математичної моделі вигляду:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{S} b_1 x_{1i}, \tag{2.6}$$

де b_0, b_1 – коефіцієнти регресії моделі.

Відповідно до вибраного плану (2^{4-1}) було проведено 8 дослідів, причому кожний дослід виконувався тільки 1 раз. Крім того, для оцінки дисперсії провели чотири досліди в центрі плану.

2.2.3. Послідовність побудови математичної моделі технологічної характеристики процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин:

- розраховуємо дисперсію досліду за формулою [21]

$$S_y^2 = \frac{\sum (y_{0q} - y_0)^2}{f_1}, \tag{2.7}$$

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

y_0 – середнє арифметичнезначення усіх n_0 дублів центрального досліду;

f_1 - число ступенів свободи

$$f_1 = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3, \tag{2.8}$$

- розраховуємо коефіцієнти регресії моделі за формулою [21,с.14]

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^{N} X_{iu}}{N}, i = 0,1,2,3,..., \tag{2.9}$$

де N – число дослідів. N = 8;

- перевіряємо статистичну значимість коефіцієнтів регресії.

Перевірка містить розрахунок дисперсії оцінок, який виконуємо з використанням формули [21,с.14]

$$S_{bi}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \tag{2.10}$$

Відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{bi} = \sqrt{S_{bi,}^2} \tag{2.11}$$

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

Довічний інтервал коефіцієнтів регресії буде

$$\Delta b_i = t_{a,f} S_{bi}, \tag{2.12}$$

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

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

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_{4,} \tag{2.13}$$

- станцію гідроприводу 3 для живлення гідроциліндрів електрогідравлічного приводу подачі електрода – інструмента та переміщення інструментальної головки;

- джерело живлення технологічним струмом 4 два зварювальних випрямляча ВДУ-504;

- пульт електрокерування верстатом.

Основні дані верстата «Дуга – 8Г»

Розміри стола (довжина *x* ширина), мм	400 *x* 300
Найбільша маса ЕІ, кг	35
Найбільша маса заготовки, кг	100
Найбільший розмір оброблювальної порожнини в плані, мм	150
Найбільша відстань від торцевої поверхні електродотримача До робочої поверхні стола, мм	325
Робочій хід шпинделя, мм	200
Установче 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	22000
- по титановому сплаву ВТ3-1	30000
Найменша шорсткість поверхні після РОД по ГОСТ 2789-73, *Ra*, мкм	3,2
Габарит верстата (довжина *x* ширина *x* висота), мм	1000 *x* 1000 *x* 2740
Маса верстата, кг	2100

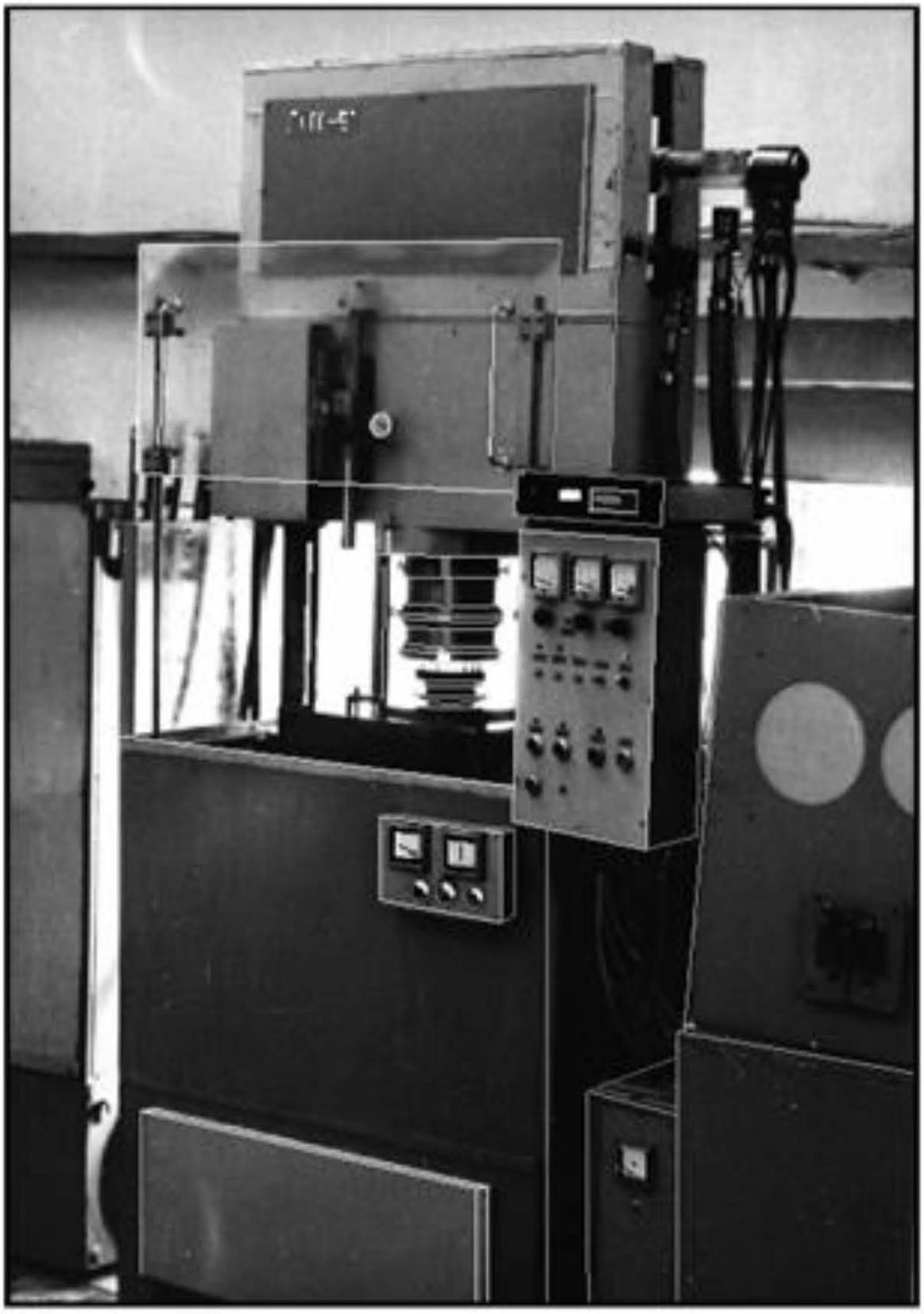


Рисунок 2.2. Експериментальний електро - ерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «Дуга -8Г»

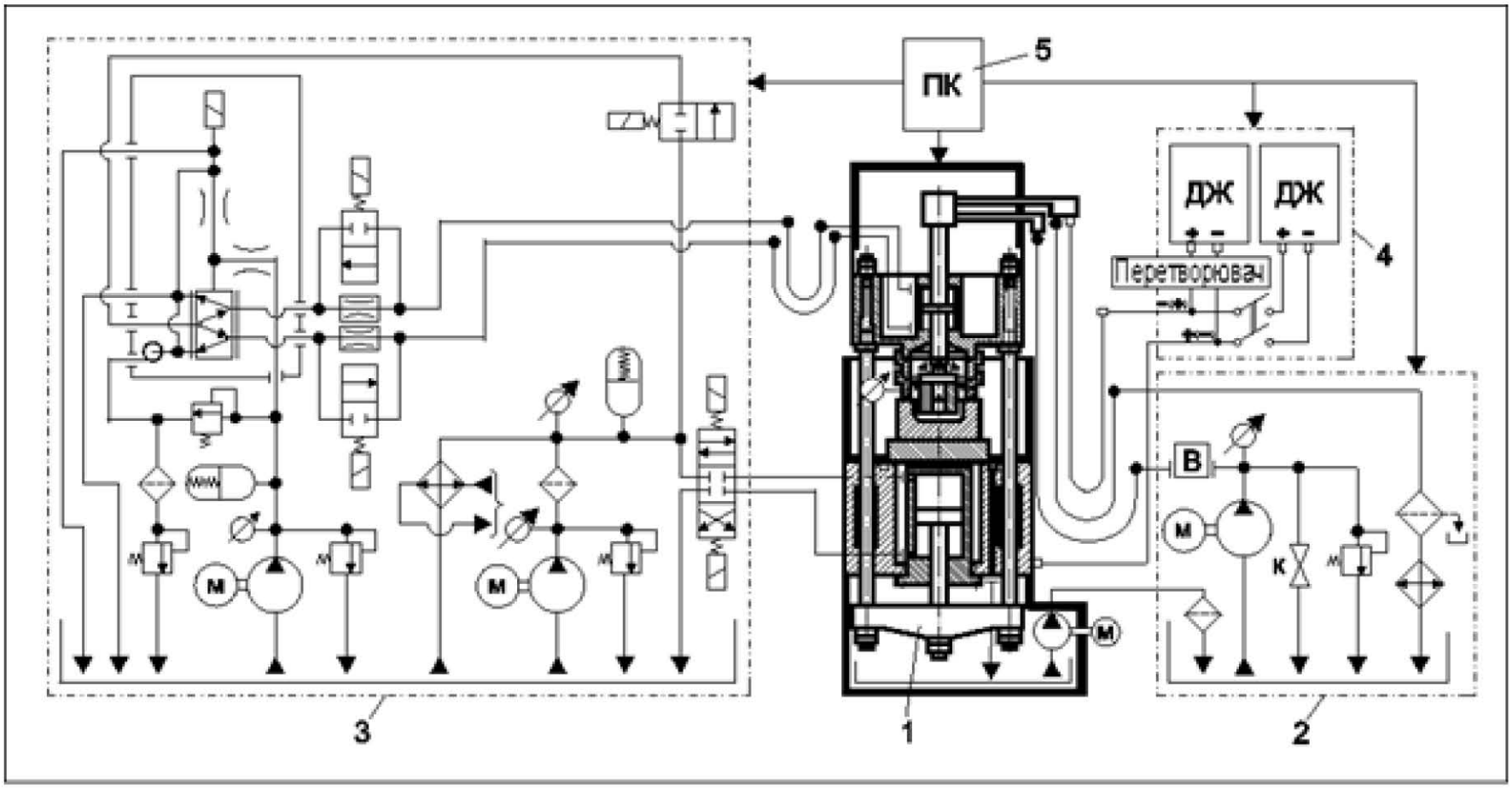


Рисунок 2.3. Електрогідрокинематична схема експериментального копіювально – прошивного верстата моделі «Дуга – 8Г»

2.3. Експериментальний пристрій

Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин застосовано пристрій (рис 2.4) до електроерозійного верстата «Дуга – 8Г»

Пристрій включає в себе наступні основні деталі:

- комплект електродів – інструментів 7 для формування отвору
- комплект електродів – заготовок 4;
- тримач 2 для кріплення електрода – заготовки;
- електродотримач 3 для кріплення рухомої частини пристрою до шпиндельної плити верстату ;
- плиту верхню 1 для приєднання рухомої частини пристрою до шпиндельної плити верстату;
- стійку нижню 6 для закріплення нерухомої частини пристрою відносно стола верстата.

Пристрій працює таким чином. Перед початком роботи один із електродів – інструментів 7 встановлюють у електродотримач 3 та закріплюють останній чотирма болтами М10 відносно плити 1, а електрод – заготовку 4 нерухомо закріплюють накидною гайкою 5 відносно стійки 6. Позиціювання електрод – заготовки відносно електрода – інструмента здійснюється за рахунок переміщення нижньої плити . Далі закривають герметизовану камеру, вмикають електродвигун насосу робочої рідини , зварювальної випрямляч і ведуть процес РОД твердосплавних зразків в електроді – заготовці, яка моделює твердосплавну волоку, з використанням показаної на рис. 2.1 технологічної схеми формоутворення. При цьому електрична дуга горить у між електродному зазорі в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини, який відповідальний за стиснення дуги та за вилучення продуктів ерозії з робочої зони пристрою та верстата

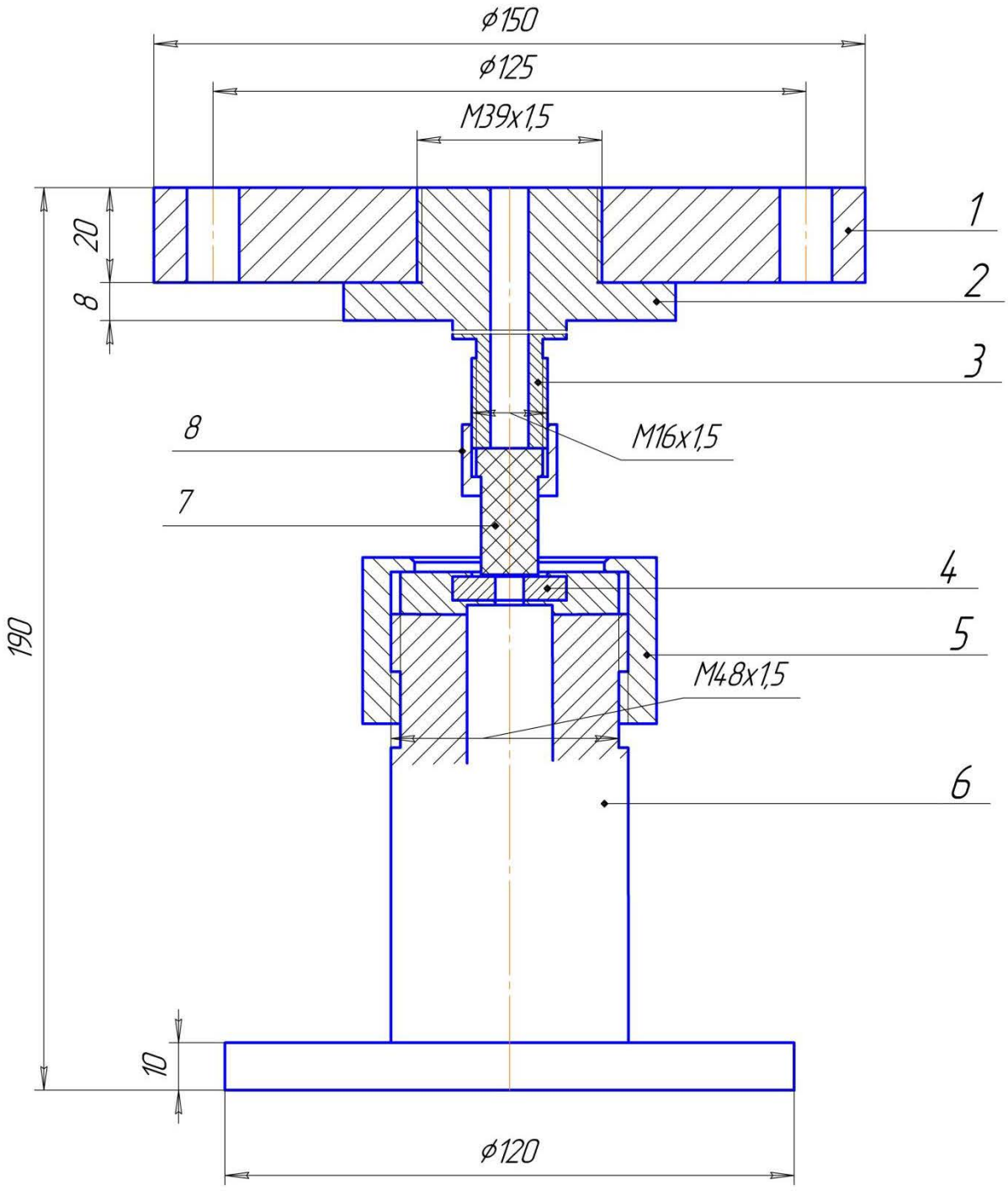


Рисунок 2.4. Експериментальний пристрій

1 - плита; 2 – тримач; 3 – графіт: 4 – твердосплавний зразок;
5 – накидна гайка; 6 – стійка; 7 – графітовий електрод; 8 – гайка

2.4. Матеріали, зразки та вимірювальний інструмент

В якості матеріалу електрода – інструмента 1 (рис. 2.4) використовувався електроерозійний графіт МПГ – 7 (внутрішній шар) та свинець (зовнішній шар).

Зразки твердосплавні, електрод – інструмент (рис.2.5)

В якості контрольно – вимірювальних приборів та інструмента застосовувалися.

- для керування силою струму: кіло амперметр типу М367;
- для контролю напруги: вольтметр типу М4200;
- для керування статичним тиском робочої рідини на вході в між електродний зазор: манометру типу М1 – 2 – 2;
- для вимірювання часу обробки: секундомір із ціною поділки 0,05с;
- для вимірювання геометричних параметрів електрода – інструмента та електрода заготовки: мікрометру типу МК ГОСТ 6407 – 78 із ціною поділки 0,01 мм;штангенциркуль типу ШЦ – 11 ГОСТ 166-80 із ціною поділки 0,05мм;
- для вимірювання лінійного переміщення шпинделя подачі електрода – інструмента: індикатор годинникового типу ИЧ – 25;
- для вимірювання шорсткості поверхні після РОД: еталони електроерозійної шорсткості.

Крім того, в роботі здійснювалося:

- осцилографування електротехнологічних характеристик процесу (сили струму, напруги на дузі, статичного тиску робочої рідини на вході потоку в торцевий МЕЗ) з використанням плати АЦП m-DAQ14 із частотою перетворення 100 кГц, яка під'єднується до ПК через USB-інтерфейс (USB 2,0 Higt Speed);
- вивчення та вимірювання результатів металографічних досліджень за допомогою металографічного мікроскопу МИМ-8;

- вивчення фрактографії продуктів ерозії твердого сплаву ВК-8, що отримано на растровому електронному мікроскопі моделі РЕМ-106И виробництва Сумського ВАТ «SELMI» .

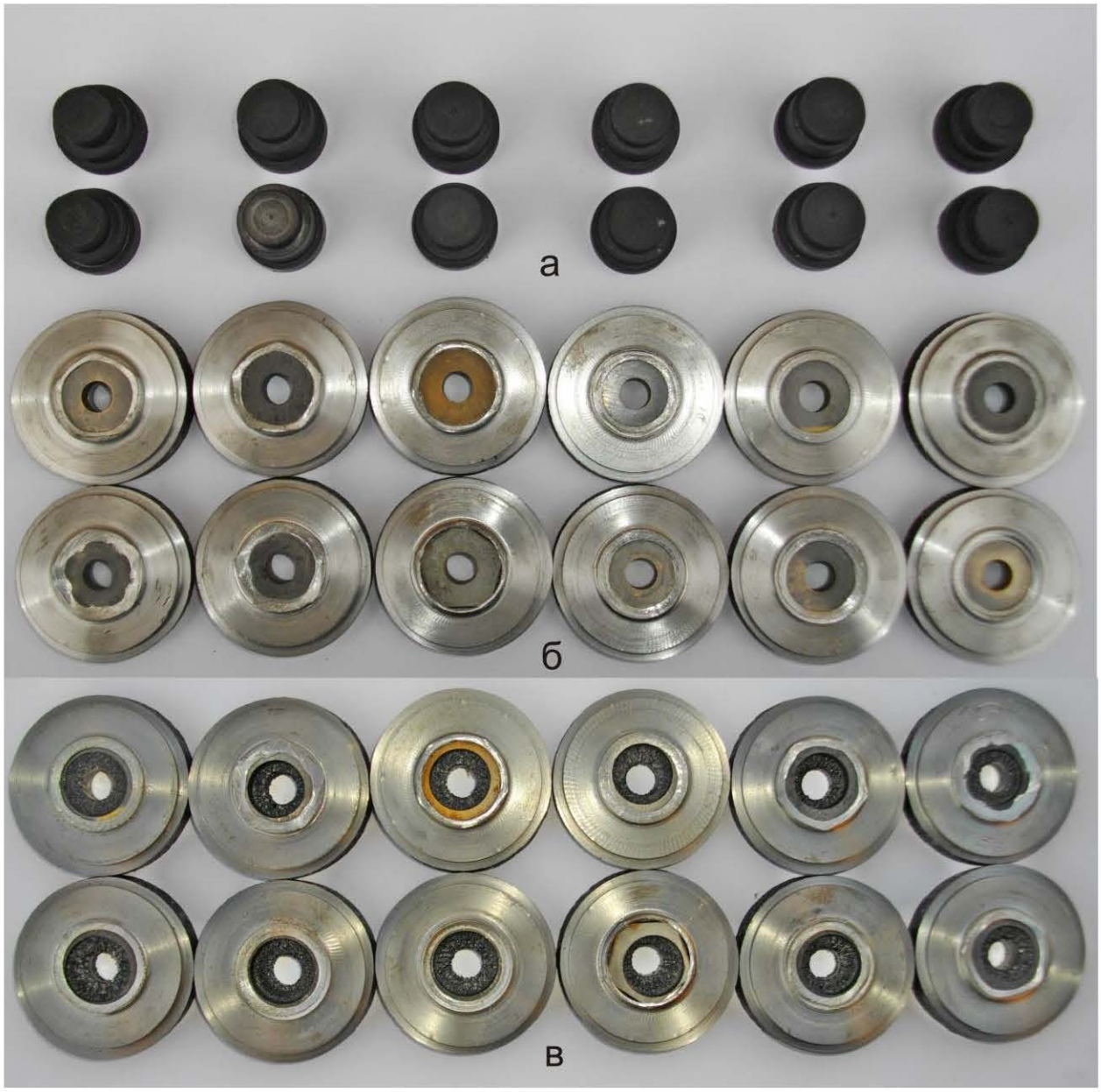


Рисунок 2.5. Дослідні матеріали: а - електрод - інструмент; б - заготовка до обробки РОД ; в - заготовка після обробки РОД

2.5. Техніка безпеки при експериментальному дослідженні

При обробці твердосплавних глазків крутильних машин необхідно враховувати умови їх експлуатації з тим, щоб при дії на них вологи, сонячної радіації, механічних коливань, високих та низьких тисків і температур, агресивних речовин і т. ін. обладнання не ставало небезпечним.

Перед початком експериментальної роботи необхідно оглянути складові частини виробничого обладнання (приводи, трубопроводи, кабелі тощо) на наявність пошкоджень. Рухомі частини обладнання обов'язково повинні мати огородження і відповідати вимогам безпеки.

Заготовки твердосплавних глазків, з якими може контактувати дослідник не повинні мати гострих країв, кутів, нерівних гарячих чи переохолоджених поверхонь. Конструкція електроерозійного обладнання повинна забезпечувати регламентований рівнів шуму, ультразвуку, інфразвуку, вібрації та різноманітних випромінювань. Обладнання повинне забезпечувати захист людини від ураження електричним струмом, а також запобігати накопиченню зарядів статичної електрики в небезпечних кількостях та оснащене засобами автоматичної зупинки, гальмування та вимкнення від джерел енергії.

Дослідник перед початком робіт повинен одягнений в спеціальний одяг, який нормований засобами захисту. Встановлювати технологічне оснащення і заготовки обережно, щоб випадково не травмуватися, кріпити спеціальним інструментом і налагоджувати при цьому контрольно-вимірювальний інструмент. Коли відповідні роботи підготування виконані, тоді обережно вмикати обладнання, джерела струму електричної напруги і починати процес обробки. Після завершення обробки, вимкнути джерела технологічного струму, підняти робочу робочу камеру у гору, вимкнути обладнання і зняти оброблену заготовку.

Розділ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД ТВЕРДОСПЛАВНИХ ГЛАЗКІВ КРУТИЛЬНИХ МАШИН

3.1. Продуктивність обробки

3.1.1. Розрахунок дисперсії

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

Таблиця 3.1

Дані для розрахунку дисперсії досліду

Номер Дубля	y_{0_q}	$\Delta y = \left(y_{0_q} - y_0\right)$	Δy^2
1	99,6	7.42	55.06
2	94.1	1.92	3.69
3	99,5	7.32	53.58
4	75.5	16.68	278.22
	92,18		390.54

Тоді

$$S_y^2 = \frac{390.54}{3} = 130.18$$

і відповідно

$$S_y = 11.41$$

3.1.2. Розахунок коефіцієнтів регресії

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14)

$$b_0 = \frac{1}{8}(131{,}34 + 85{,}85 + 56{,}84 + 31{,}20 + 153{,}15 + 51{,}60 + 193{,}24 + 94{,}60) = 99{,}73$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(131{,}34 - 85{,}85 + 56{,}84 - 31{,}2 + 153{,}15 - 51{,}6 + 193{,}24 - 94{,}6) = 33{,}92$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(131{,}34 + 85{,}85 - 56{,}84 - 31{,}2 + 153{,}15 + 51{,}6 - 193{,}24 - 94{,}6) = 5{,}76$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(131{,}34 + 85{,}85 + 56{,}84 + 31{,}2 - 153{,}15 - 51{,}6 - 193{,}24 - 94{,}6) = -23{,}42$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(131{,}34 - 85{,}85 - 56{,}84 + 31{,}2 - 153{,}15 + 51{,}6 + 193{,}24 - 94{,}6) = 2{,}12$$

3.1.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою(2,15)

$$S_{b_j}^2 = \frac{130.18}{8} = 16.28$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_j} = 4.03$$

3.1.4. Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії

Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії здійснювали за формулою(2,16)

$$\Delta b_i = 3{,}18 \cdot 4.03 = 12.82$$

Уданому випадку для коефіцієнтів регресії b_2, b_4 не виконується вимога

$|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

3.1.5. Будування математичної моделі продуктивності обробки

Рівняння регресії, або математична модель продуктивності обробки твердосплавної заготовки набуде вигляду

$$y_1 = 99{,}73 + 33{,}92\, x_1 - 23.42\, x_3 \qquad (3.1)$$

3.1.6. Перевірка гіпотези про адекватність моделі

Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t - критерієм Стьюдента за формулою(2,18):

$$t^{\text{розр}} = \frac{(99{,}73 - 92{,}18)\sqrt{8}}{11.41} = 1{,}87$$

Оскільки $1.87 < 3{,}18$ гіпоеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.1.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів на продуктивність процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин *М* показано на рис. 3.1, а.

Як бачимо. наибільший впли в на М виявляє сила технологічного струму І, із підвищенням якої продуктивність обробки збільшується.

Останнє підтверджує теплову природу РОД Таким чином, силу технологічного струму треба розглядати як основний керуючий фактор.

Вплив площі обробки F на M значно менший, але має суттєве значення. З його підвищенням продуктивність збільшується.

На рис.3.1, представлена залежність $M = f(I, F)$, яка демонструє вплив факторів на продуктивність процесу РОД у вибраному факторному просторі їх зміни.

В рамках експерименту продуктивність процесу РОД твердосплавних заготовок змінювалася у межах від 31,20 до 193,24 мм3/хв., що приблизно в 4-5 разів перевищує продуктивність електроімпульсної обробки [12. с. 248]

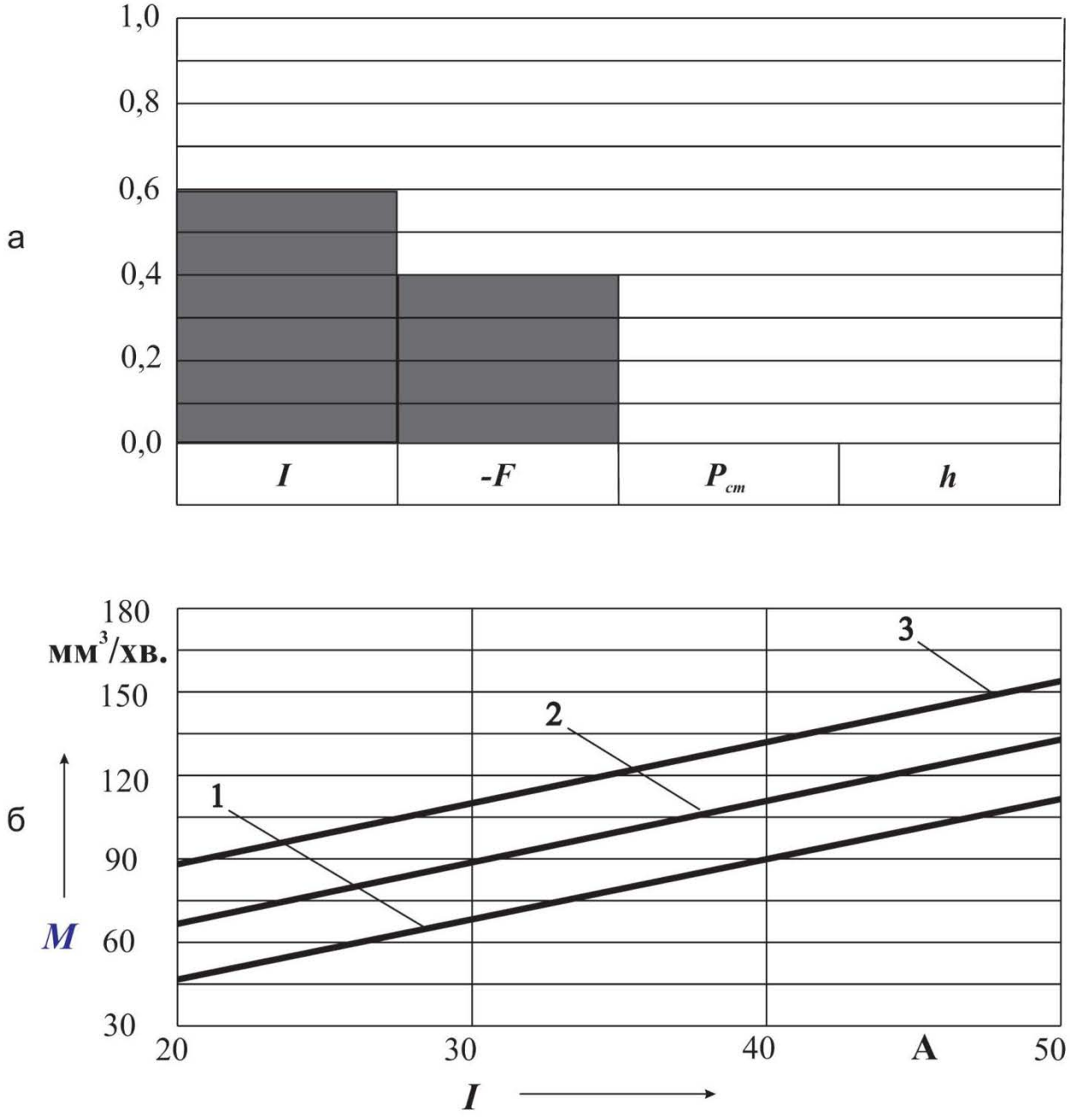


Рисунок 3.1 Продуктивність М чорнової РОД бічної поверхні зразка за формулою “графітовий ЕІ- твердий сплав ВК8” з використанням способу зворотного прокачування: а − ступінь впливу змінних факторів; б − залежність M від F; 1 − P_{cm} = 1,5 МПа; 1 − P_{cm} = 1,25 МПа; 1 − P_{cm} = 1,0 МПа

3.2. Питома продуктивність обробки

3.2.1. Розрахунок дисперсії досліду

Розрахунок дисперсії досліду здійснювали за формулою(2,12).Дані проміжкового розрахунку наведемо в таблиці 3.2

Таблиця 3.2

Дані для розрахунку дисперсії досліду

Номер Дубля	y_{0_q}	$\Delta y = \left(y_{0_q} - y_0\right)$	Δy^2
1	2,85	0.21	0.044
2	2,69	0.05	0.003
3	2,84	0.2	0.04
4	2,16	0.48	0.23
	2,64		0.317

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0.317}{3} = 0.106$$

і відповідно

$$S_y = 0,326$$

3.2.2. Розахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14)

$$b_0 = \frac{1}{8}(2{,}63 + 4{,}3 + 1{,}14 + 1{,}56 + 3{,}06 + 2{,}58 + 3{,}86 + 4{,}73) = 2{,}98$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(2{,}63 - 4{,}3 + 1{,}14 - 1{,}56 + 3{,}06 - 2{,}58 + 3{,}86 - 4{,}73) = -0{,}31$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(2{,}63 + 4{,}3 - 1{,}14 - 1{,}56 + 3{,}06 + 2{,}58 - 3{,}86 - 4{,}73) = 0{,}16$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(2{,}63 + 4{,}3 + 1{,}14 + 1{,}56 - 3{,}06 - 2{,}58 - 3{,}86 - 4{,}73) = -0{,}58$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(2{,}63 - 4{,}3 - 1{,}14 + 1{,}56 - 3{,}06 + 2{,}58 + 3{,}86 - 4{,}73) = -0{,}33$$

3.2.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою(2,15)

$$S_{b_j}^2 = \frac{0.106}{8} = 0{,}013$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_j} = 0{,}114$$

3.2.4. Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії

Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії здійснювали за формулою(2,16)

$$\Delta b_i = 3{,}18 \cdot 0{,}114 = 0{,}363$$

Уданому випадку для коефіцієнтів регресії b_1, b_2, b_4 не виконується вимога

$|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

3.2.5. Будування математичної моделі питомої продуктивності обробки

Рівняння регресії, або математична модель продуктивності обробки твердосплавної заготовки набуде вигляду

$$y_2 = 2{,}98 - 0.58_{X_3} \qquad (3.2)$$

3.2.6. Перевірка гіпотези про адекватність моделі

Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t - критерієм Стьюдента за формулою(2,18):

$$t^{\text{розр}} = \frac{(2{,}98 - 2{,}64)\sqrt{8}}{0{,}326} = 2.95$$

Оскільки $2{,}95 < 3{,}18$ гіпоеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.2.7. Аналіз моделі

Із математичної моделі питомої продуктивності обробки твердосплавних волок (рис.3.2) витікає, що M_a головним чином залежить від

площі обробки F, із підвищенням якого M_a зменшується (рис.3.2). Таким чином, площі обробки F є головним керуючий фактор.

Вплив сили I технологічного струму майже не впливає на питому продуктивність M_a. В умовах експерименту питома продуктивність процесу РОД твердосплавних заготовок змінювалась у межах від 1,14 до 4,73 $мм^3/_{А \cdot хв}$

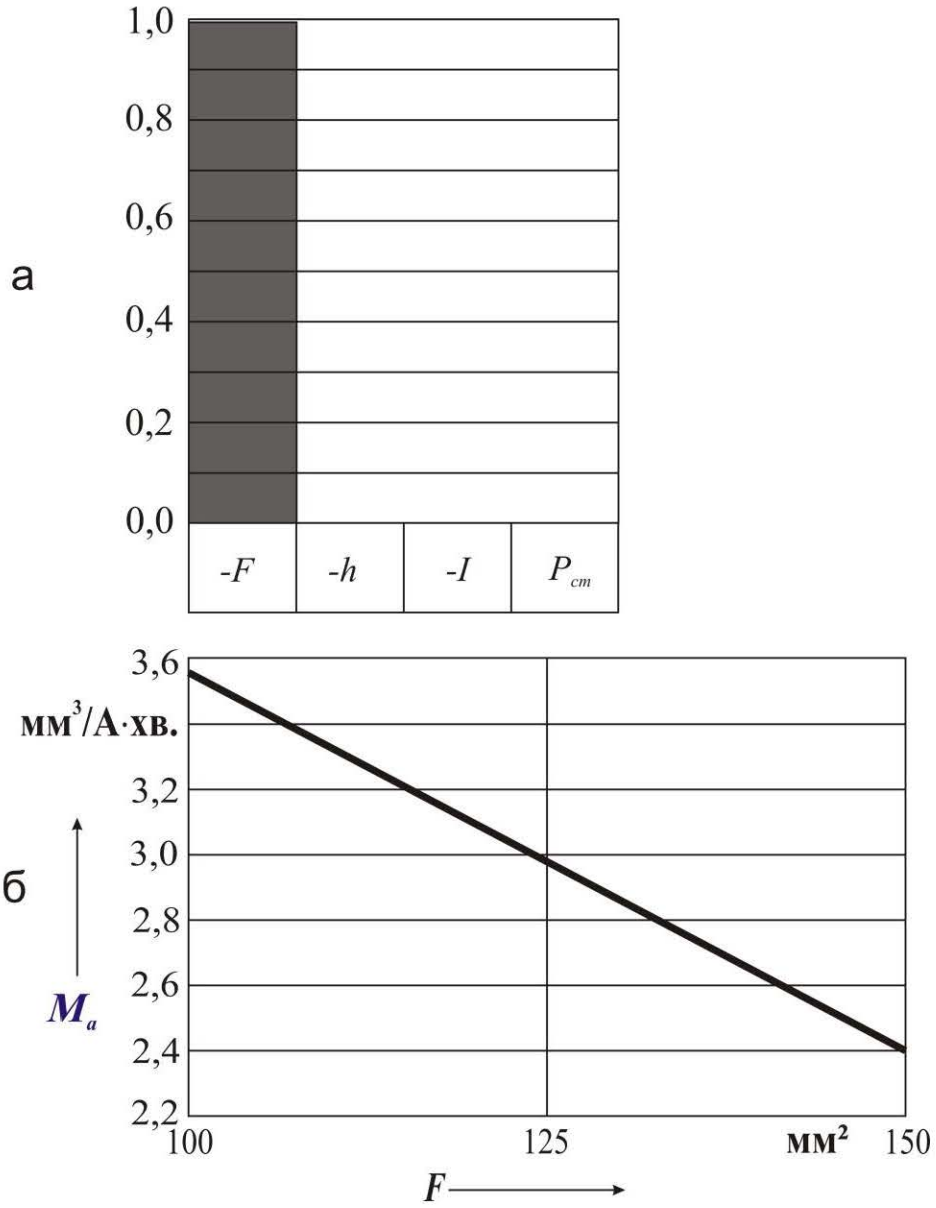


Рисунок 3.2 Питома продуктивність M_a, чорнової РОД бічної поверхні зразка за формулою "графітовий ЕІ- твердий сплав ВК8" з використанням способу зворотного прокачування: а − ступінь впливу змінних факторів; б − залежність M_a, від F

3.3 Питома витрата електроенергії

3.3.1. Розрахунок дисперсії

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

Таблиця 3.3

Дані для розрахунку дисперсії досліду

Номер Дубля	y_{0_q}	$\Delta y = \left(y_{0_q} - y_0\right)$	Δy^2
1	9.89	0.94	0.88
2	10.47	0.36	0.13
3	9.9	0.93	0.86
4	13.05	2.22	4.93
	10.83		6.8

Тоді

$$S_y^2 = \frac{6.8}{3} = 2.27$$

і відповідно

$$S_y = 1.51$$

3.3.2. Розахунок коефіцієнтів регресії

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14)

$$b_0 = \frac{1}{8}(10{,}72 + 6{,}56 + 24{,}77 + 18{,}05 + 9{,}2 + 10{,}91 + 7{,}28 + 5{,}95) = 11{,}68$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(10{,}72 - 6{,}56 + 24{,}77 - 18{,}05 + 9{,}2 - 10{,}91 + 7{,}28 - 5{,}95) = 1{,}31$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(10{,}72 + 6{,}56 - 24{,}77 - 18{,}05 + 9{,}2 + 10{,}91 - 7{,}28 - 5{,}95) = -2{,}33$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(10{,}72 + 6{,}56 + 24{,}77 + 18{,}05 - 9{,}2 - 10{,}91 - 7{,}28 - 5{,}95) = 3{,}35$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(10{,}72 - 6{,}56 - 24{,}77 + 18{,}05 - 9{,}2 + 10{,}91 + 7{,}28 - 5{,}95) = 0{,}06$$

3.3.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою(2,15)

$$S_{b_j}^2 = \frac{2.27}{8} = 0{,}284$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_j} = 0{,}533$$

3.3.4. Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії

Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії здійснювали за формулою(2,16)

$$\Delta b_i = 3{,}18 \cdot 0{,}533 = 1.69$$

Уданому випадку для коефіцієнтів регресії b_1 і b_4 не виконується вимога

$|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

3.3.5. Будування математичної моделі питомої витрати елекроенергії

Рівняння регресії, або математична модель продуктивності обробки твердосплавних заготовкок набуде вигляду

$$y_з = 11{,}68 + 3{,}35\,x_з - 2{,}33\,x_2 \qquad (3.3)$$

3.3.6. Перевірка гіпотези про адекватність моделі

Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t - критерієм Стьюдента за формулою(2,18):

$$t^{\text{розр}} = \frac{(11{,}68 - 10.83)\sqrt{8}}{1.51} = 1.59$$

Оскільки $1{,}59 < 3{,}18$ гіпоеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.3.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів питому витрату електроенергії a на рис. 3.3, а. Як бачимо, що на питому витрату електроенергії a впливає площа обробки F і статичний тиск $P_{ст}$ на вході потоку у міжелектродний зазор.З підвищенням площі обробки F, питома витрата електроенергії a збільшується . Саме тому F, слід розглядати, як головним керуючий фактор. Більш ніж у півтори рази з меншою силою на питому продуктивність впливає статичний тиск $P_{ст}$ на вході потоку у міжелектродний зазор, причому, із підвищенням $P_{ст}$ питома витрата електроенергії зменшується. Залежність $a = f(F, P_{cm})$, демонструється на рис. 3.3, б.

В умовах експерименту питома втрата електроенергії промесу РОД твердосплавної заготовки змінювалася у межах від 5.95 до 24.77 (кВт·год)/кг

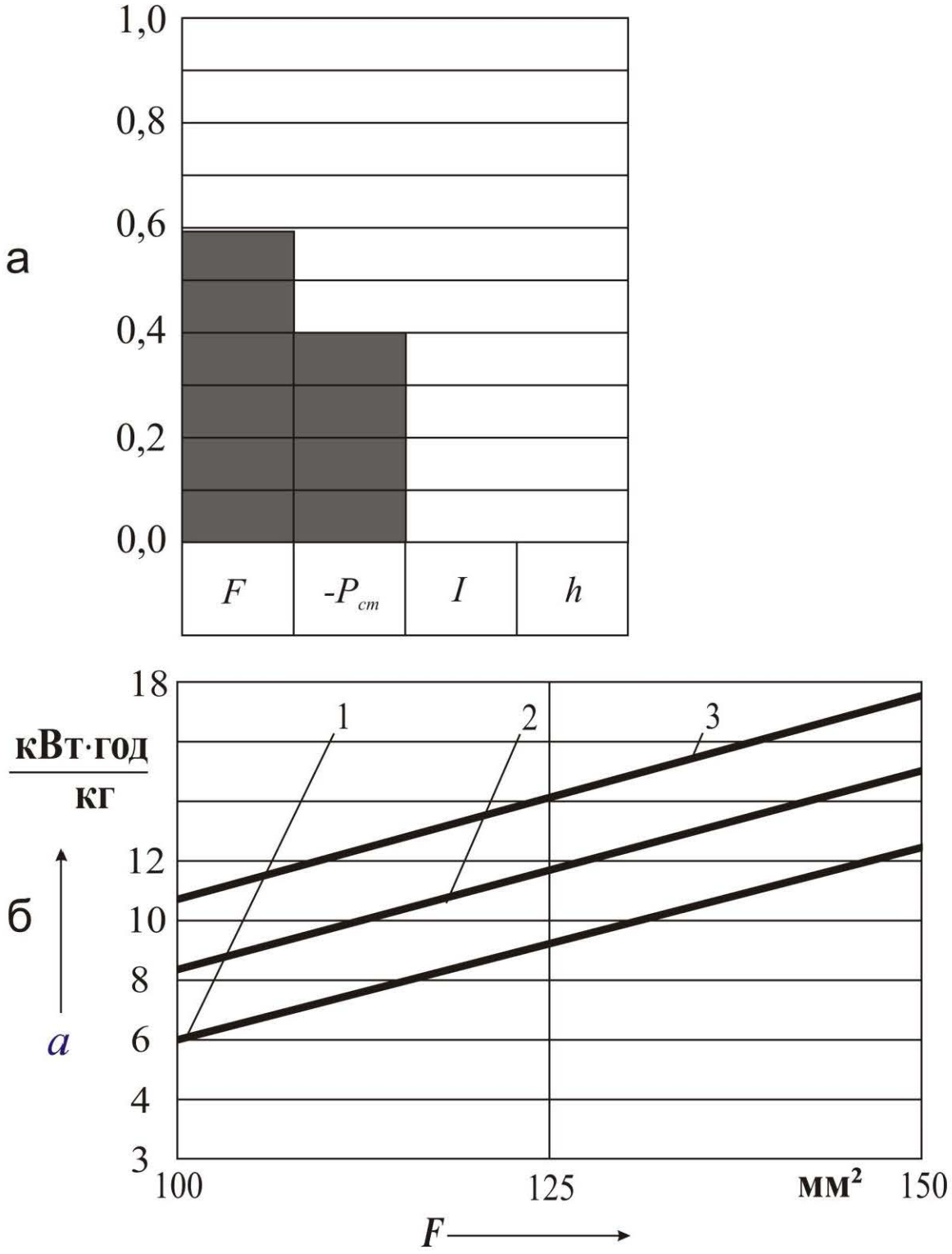


Рисунок 3.3 Питома витрата електроенергії *а* чорнової РОД бічної поверхні зразка за формулою "графітовий ЕІ- твердий сплав ВК8" з використанням способу зворотного прокачування: а − ступінь впливу змінних факторів; б − залежність *а* від *F* та $P_{ст}$; 1 − $P_{ст}$ = 1,5МПа; 1 − $P_{ст}$ = 1,25 МПа; 1 − $P_{ст}$ = 1,0 МПа

3.4. Висновки

I. Отримано математичну модель продуктивності процесу РОД заготовок твердосплавних глазків крутильних машин. Показано, що найбільший вплив на M виявляє сила технологічного струму I, із підвищенням якої продуктивність обробки збільшується. Останнє підтверджує теплову природу РОД. Таким чином,силу технологічного струму треба розглядати як основний керуючий фактор. Вплив площі обробки F на M значно менший, але має суттєве значення. З його підвищенням продуктивність збільшується. В рамках експерименту продуктивність процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин змінювалась у межах від 31,20 до 193,24 мм³/хв,_ що приблизно в 4,2 – 6,3 разів перевищує продуктивність електроімпульсної обробки.

II. Отримано математичну модель питомої продуктивності $\mathbf{M_a}$ процесу РОД твердосплавних заготовок твердосплавних глазків крутильних машин. Показано, що $\mathbf{M_a}$ головним чином залежить від площі обробки F, із підвищенням якого вона збільшується. Таким чином, площа обробки F є головний керуючий фактор. Вплив сили технологічного струму I майже не впливає на питому продуктивність $\mathbf{M_a}$ обробки в рамках е експерименту . Із підвищенням F питома продуктивність обробки збільшується.

III. Отримано математичну модель питомої витрати електроенергії a. Виявлено що усі 2 фактора(площа обробки, статичний тиск на вході потоку у між електродний зазор) впливають на питому витрату електроенергії a приблизно однаково. В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД порожнини змінювалася у межах від 5.95. до 24.77 $(кВт \cdot год)/кг$

Розділ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТИ ТА ТОЧНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД ТВЕРДОСПЛАВНИХ ГЛАЗКІВ КРУТИЛЬНИХ МАШИН

4. Експериментальне дослідження якості та точності процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин

4.1. Шорсткість обробленої поверхні

4.1.1. Розрахунок дисперсії

Розрахунок дисперсії досліду здійснюємо за формулою (2.12). Дані для Розрахунку вносимо в таблицю 4.1

Таблиця 4.1

Дані для розрахунку дисперсії досліду

Номер Дубля	y_{0_q}	$\Delta y = \left(y_{0_q} - y_0\right)$	Δy^2
1	10	0.88	0.77
2	11.5	0,62	0.38
3	10	0.88	0.77
4	11.5	0,62	0.38
	10.88		2.3

Тоді

$$S_y^2 = \frac{2.3}{3} = 0.77$$

і відповідно

$$S_y = 0.88$$

4.1.2. Розахунок коефіцієнтів регресії

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14)

$$b_0 = \frac{1}{8}(12 + 8.5 + 12{,}5 + 10 + 11.5 + 8 + 11 + 9) = 10.31$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(12 - 8.5 + 12{,}5 - 10 + 11.5 - 8 + 11 - 9) = 1.44$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(12 + 8.5 - 12{,}5 - 10 + 11.5 + 8 - 11 - 9) = -0.31$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(12 + 8.5 + 12{,}5 + 10 - 11.5 - 8 - 11 - 9) = 0.44$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(12 - 8.5 - 12{,}5 + 10 - 11.5 + 8 + 11 - 9) = -0.06$$

4.1.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою(2,15)

$$S_{b_j}^2 = \frac{0.77}{8} = 0,1$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_j} = 0,32$$

4.1.4. Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії

Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії здійснювали за формулою(2,16)

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,32 = 1.02$$

Уданому випадку для коефіцієнтів регресії b_2, b_3 і b_4 не виконується вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

4.1.5. Будування математичної моделі шорсткості

Рівняння регресії, або математична модель продуктивності обробки твердосплавної заготовки набуде вигляду

$$y_4 = 10.31 + 1,44_{X_1} \qquad (4.1)$$

4.1.6. Перевірка гіпотези про адекватність моделі

Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі (4.1) здійснювали за t - критерієм Стьюдента за формулою(2,18):

$$t^{\text{розр}} = \frac{|10.31 - 10.88|\sqrt{8}}{0.88} = 1.83$$

Оскільки $1.83 < 3,18$ гіпоеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.1.7. Аналіз моделі

З математичної моделі шорсткості бічної поверхні твердосплавних заготовок волок виходить, що остання залежить, головним чином від сили технологічного струму I (рис. 4.1), при чому , із підвищенням сили струму шорсткість збільшується. Шорсткість поверхні результат накладання одиночних лунок або «доріжок» від горіння розрядів залежність $R_a = f(I)$ представлена на рисунку 4.1

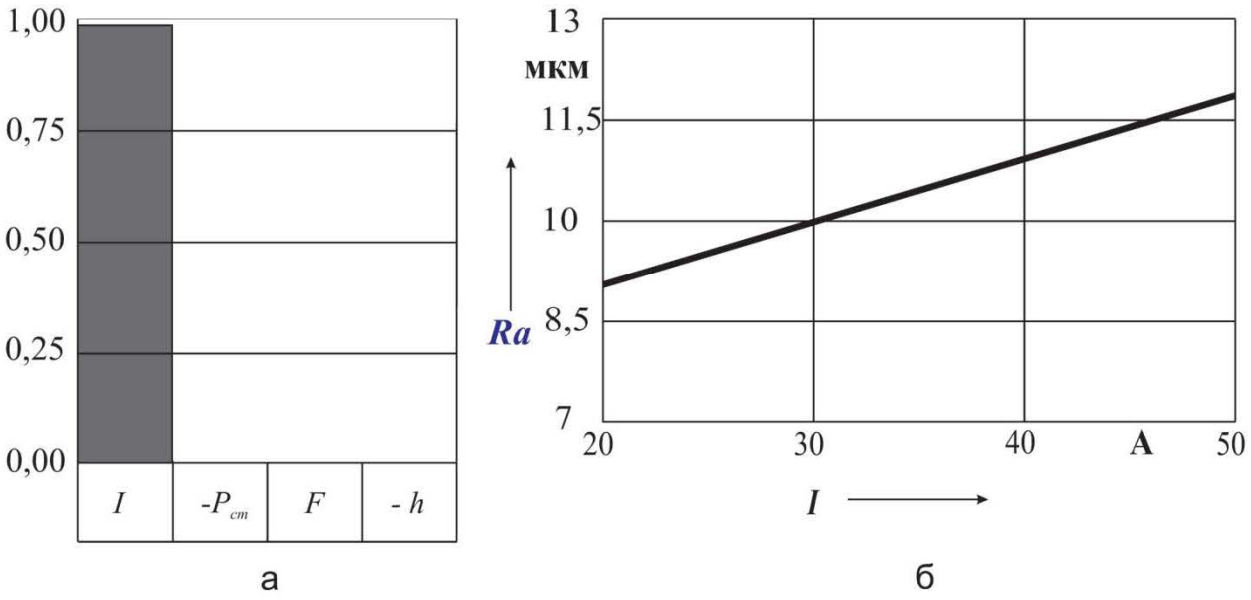


Рисунок 4.1 Шорсткість обробленої поверхні *Ra* чорнової РОД бічної поверхні зразка за формулою “графітовий ЕІ- твердий сплав ВК8” з використанням способу зворотного прокачування: а − ступінь впливу змінних факторів; б − залежність *Ra* від *I*

Відомо, що більшої сили струму відповідає більший діаметр лунки. Отже, більшої сили струму відповідає більша шорсткість поверхні після РОД. Таким чином, фактор І треба розглядати як головний, керуючий.

В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні фасонної порожнини змінювалася у межах від R_a 8 до . R_a 12,5

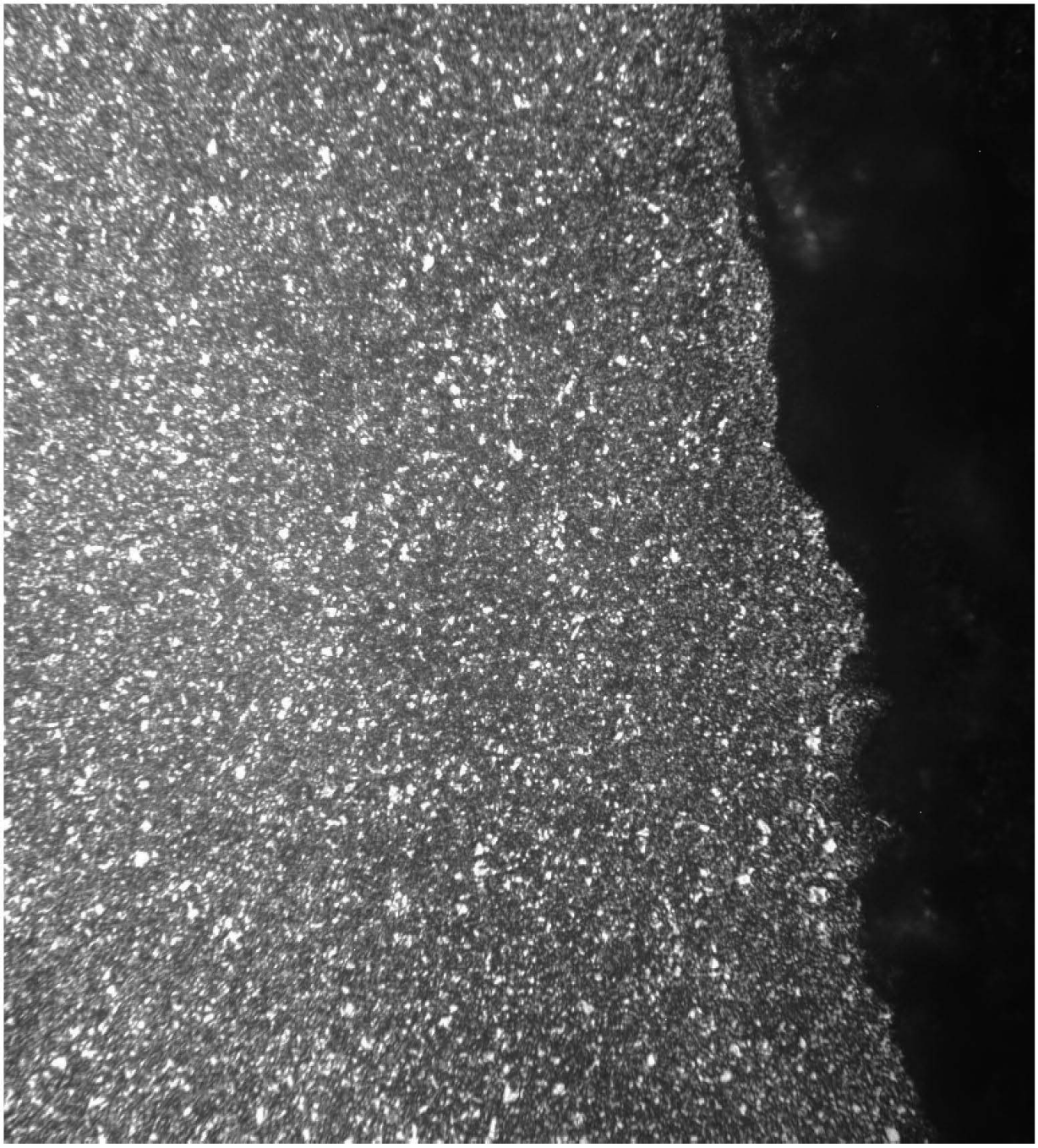


Рисунок 4.2. Мікроструктура (х500) поверхневого шару сплаву ВК8 після РОД бічної поверхні зразка графітовим ЕІ (I = 50 А, P_{cm} = 1,5 МПа, F = 150 мм^2 , h = 3 мм

4.2. Бічний міжелектродний зазор

4.2.1. Розрахунок дисперсії досліду

Розрахунок дисперсії досліду здійснювали за формулою(2.12).Дані проміжкового розрахунку наведемо в таблиці 4.2

Таблиця 4.2

Дані для розрахунку дисперсії досліду

Номер дубля	y_{0_q}	$\Delta y = \left(y_{0_q} - y_0\right)$	Δy^2
1	0,02	0,004	0,000016
2	0,015	0,001	0,000001
3	0,02	0,004	0,000016
4	0,1	0,006	0,000036
	0,016		0,000069

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,000069}{3} = 0,000023$$

і відповідно

$$S_y = 0,005$$

4.2.2. Розахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14)

$$b_0 = \frac{1}{8}(0{,}03 + 0{,}005 + 0{,}035 + 0{,}015 + 0{,}025 + 0{,}005 + 0{,}02 + 0{,}01) = 0{,}018$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(0{,}03 - 0{,}005 + 0{,}035 - 0{,}015 + 0{,}025 - 0{,}005 + 0{,}02 - 0{,}01) = 0{,}009$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(0{,}03 + 0{,}005 - 0{,}035 - 0{,}015 + 0{,}025 + 0{,}005 - 0{,}02 - 0{,}01) = -0{,}002$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(0{,}01 + 0{,}005 + 0{,}035 + 0{,}015 - 0{,}025 - 0{,}005 - 0{,}02 - 0{,}01) = 0.0006$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(0{,}01 - 0{,}005 - 0{,}035 + 0{,}015 - 0{,}025 + 0{,}005 + 0{,}02 - 0{,}01) = 0.003$$

4.2.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою(2,15)

$$S_{b_j}^2 = \frac{0{,}000023}{8} = 0{,}000003$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_j} = 0{,}00173$$

4.2.4. Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії

Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії здійснювали за формулою(2,16)

$$\Delta b_i = 3{,}18 \cdot 0{,}00173 = 0{,}0055$$

Уданому випадку для коефіцієнтів регресії b_2, b_3, b_4 не виконується вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

4.2.5. Будування математичної моделі бічного між електродний зазор

Рівняння регресії, або математична моделі бічного між електродного зазору $\delta_Б$ набуде вигляду

$$y_5 = 0{,}021 + 0.0094x_1 \qquad (4.2)$$

4.2.6. Перевірка гіпотези про адекватність моделі

Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі(4.2) здійснювали за t - критерієм Стьюдента за формулою(2,18):

$$t^{розр} = \frac{|0.021 - 0.016|\sqrt{8}}{0{,}005} = 2.83$$

Оскільки $2.83 \leq 3{,}18$ гіпоеза про адекватність моделі не відхиляється.

4.2.7. Аналіз моделі

Математичної моделі бічного між електродного зазору $\delta_Б$ виходить, що головним фактором є сила технологічного струму I, усі інші фактори у вибраному факторному просторі не впливають на $\delta_Б$, а сам зазор при реалізації процесу РОД твердосплавних заготовок глазків підтпримується на

постійному рівні, який складає 0,035 ± 0,005 мм (рис. 4.2). більш точніше визначення цієї залежності пов'язано з проблемою статистичної помилки, що виникає при вимірюванні зазору.

В умовах експерименту бічний між електродний зазор $\delta_Б$ змінювався в межах від 0,005 до 0,035 мм.

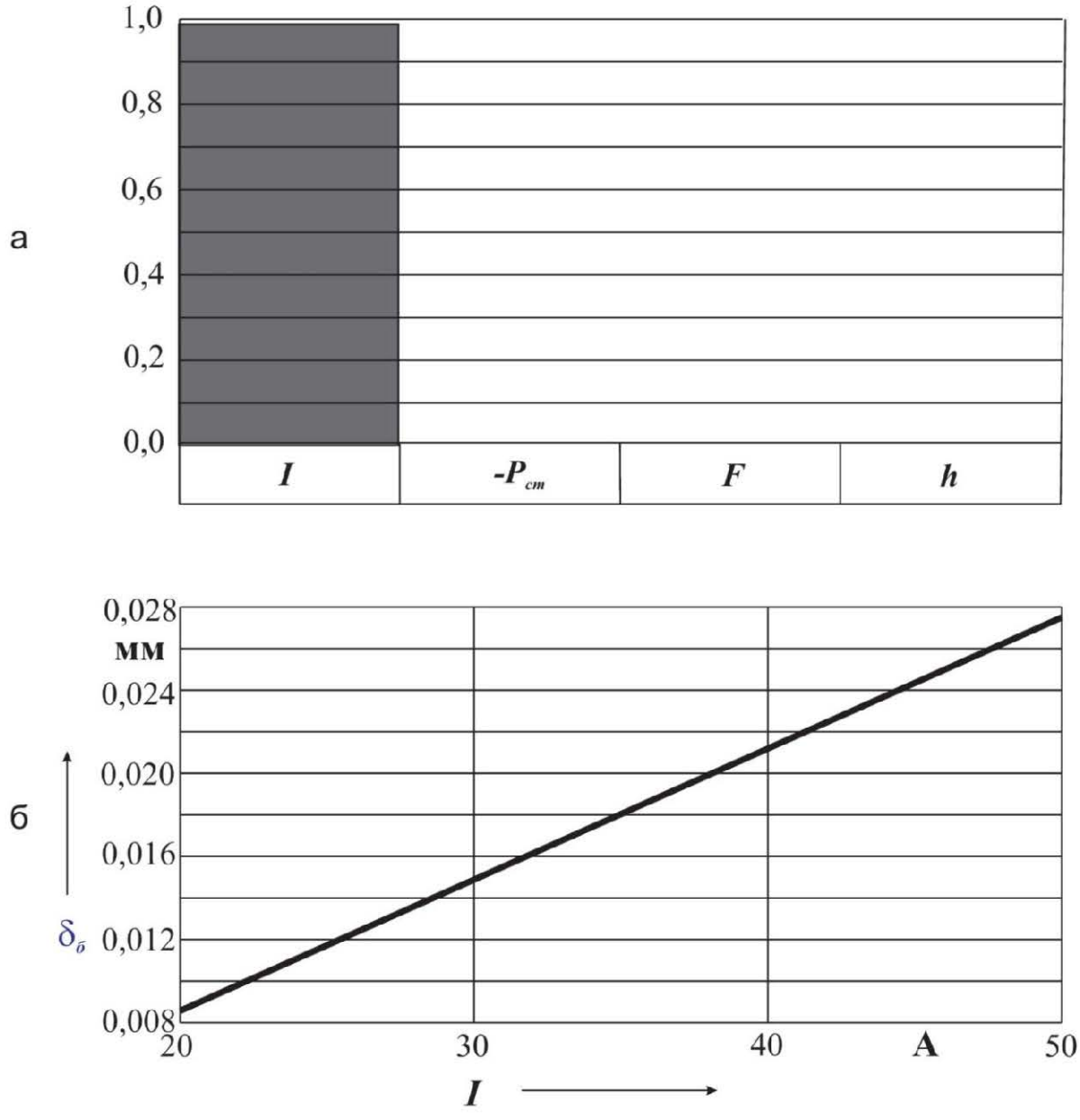


Рисунок 4.3 Бічний міжелектродний зазор $\delta_б$ чорнової РОД бічної поверхні зразка за формулою "графітовий ЕІ- твердий сплав ВК8" з використанням способу зворотного прокачування: а − ступінь впливу змінних факторів; б − залежність $\delta_б$ від I

4.3 Відносний лінійний знос електрода – інструмента

4.3.1. Розрахунок дисперсії

Розрахунок дисперсії досліду здійснюємо за формулою (2.12). Дані для Розрахунку вносимо в таблицю 4.3

Таблиця 4.3

Дані для розрахунку дисперсії досліду

Номер дубля	y_{0_q}	$\Delta y = \left(y_{0_q} - y_0\right)$	Δy^2
1	12.23	1.12	1.254
2	10.5	0.61	0.372
3	11.9	0.79	0.624
4	9.8	1.31	1.716
	11.11		3.966

Тоді

$$S_y^2 = \frac{3.922}{3} = 1.322$$

і відповідно

$$S_y = 0{,}15$$

4.3.2. Розахунок коефіцієнтів регресії

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.14)

$$b_0 = \frac{1}{8}(16 + 12{,}9 + 10{,}64 + 8{,}27 + 4{,}48 + 3{,}13 + 16{,}15 + 17{,}36) = 11{,}12$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(16 - 12{,}9 + 10{,}64 - 8{,}27 + 4{,}48 - 3{,}13 + 16{,}15 - 17{,}36) = 0{,}7$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(16 + 12{,}9 - 10{,}64 - 8{,}27 + 4{,}48 + 3{,}13 - 16{,}15 - 17{,}36) = -1{,}99$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(16 + 12{,}9 + 10{,}64 + 8{,}27 - 4{,}48 - 3{,}13 - 16{,}15 - 17{,}36) = 0{,}84$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(16 - 12{,}9 - 10{,}64 + 8{,}27 - 4{,}48 + 3{,}13 + 16{,}15 + 17{,}36) = 4.11$$

4.3.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою(2,15)

$$S_{b_j}^2 = \frac{1.322}{8} = 0{,}165$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_j} = 0{,}406$$

4.3.4. Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії

Розрахунок довічного інтервалу коефіцієнта регресії здійснювали за формулою(2,16)

$$\Delta b_i = 3{,}18 \cdot 0{,}406 = 1{,}291$$

Уданому випадку для коефіцієнтів регресії b_1, b_3 не виконується вимога

$|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

4.3.5. Будування математичної моделі відносного лінійного зносу

Рівняння регресії, або математична модель відносного лінійного зносу твердосплавних заготовок глазків набуде вигляду

$$y_6 = 11{,}12 + 4{,}11\,x_4 - 1{,}99\,x_2 \qquad (4.3)$$

4.3.6. Перевірка гіпотези про адекватність моделі

Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t - критерієм Стьюдента за формулою(2,18):

$$t^{\text{розр}} = \frac{|11.12 - 11.11|\sqrt{8}}{1.15} = 0.02$$

Оскільки $0.02 < 3{,}18$ гіпоеза про адекватність моделі не відхиляється.

4.3.7. Аналіз моделі

Як бачимо (рис. 4.3, а), найбільший вплив на відносний лінійний знос електрода – інструмента виявляє глибина обробки *h*, із збільшенням якої $\gamma_Л$ збільшується. Таким чином, фактор *h*, треба розглядати як головний, керуючий.

Вплив статичного тиску робочої рідини $P_{ст}$ приблизно у два рази менше, але має істотне значення. З підвищенням $P_{ст}$ лінійний знос збільшується. Останне пояснюється зростанням температури електричної дуги у зв'язку зі стисненням її більш динамічним потоком робочої рідини.

На рис 4.3, б представлена залежність $\gamma_Л = f(\mathbf{h}, \boldsymbol{P_{ст}})$, підтверджує вплив факторів на лінійний знос електрода інструмента.

В умовах експерименту відносний лінійний знос графітного електрода інструмента змінювався у межах від 17,36 до 3,13%, що свідчать про доцільність використання процесу РОД для точного формоутворення твердосплавних заготовок.

Таким чином, в наслідок експериментальних досліджень, отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД твердосплавних заготовок глазків крутильних машин, рис. 4.3 , які дозволяють прогнозувати їх та оптимізувати режими обробки.

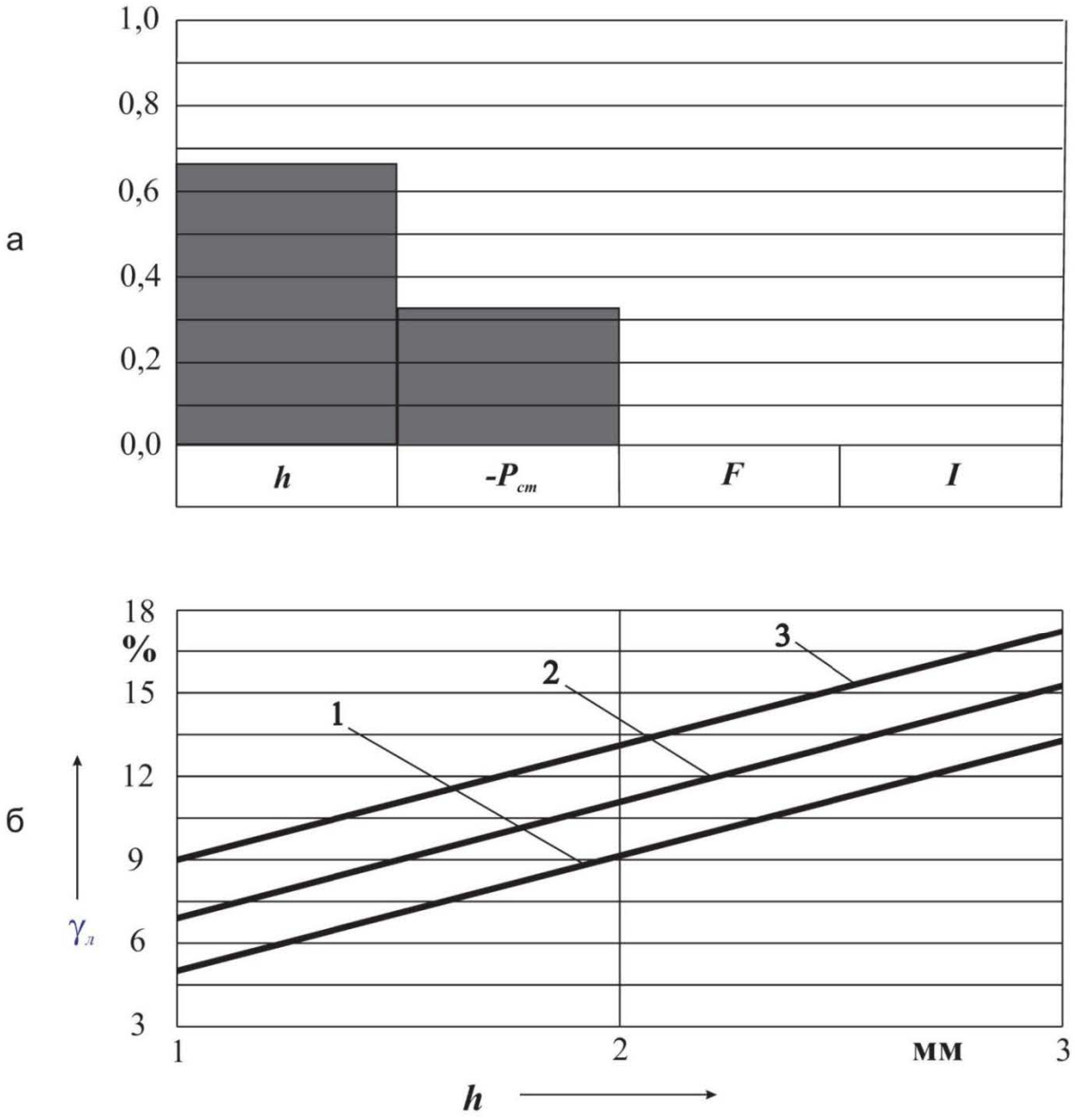


Рисунок 4.4 Відносний лінійний знос ЕІ $\gamma_л$ чорнової РОД бічної поверхні зразка за формулою “графітовий ЕІ- твердий сплав ВК8” з використанням способу зворотного прокачування: а − ступінь впливу змінних факторів; б − залежність $\gamma_л$ від h та $P_{ст}$; 1 − $P_{ст}$ = 1,5 МПа; 1 − $P_{ст}$ = 1,25 МПа; 1 − $P_{ст}$ = 1,0 МПа

4.4 Висновки

1. Отримано математичну модель шорсткості бічної поверхні після РОД твердосплавних заготовок глазків крупильних машин. Показано,що шорсткість залежить, головним чином, від сили технологічного струму *I*, причому, із підвищенням сили струму шорсткості збільшується. Шорсткість поверхні – результат накладання одиночних лунок від горіння розрядів. Відомо, що більшої сили струму відповідає більший діаметр лунки. Отже, більшої сили струму відповідає більша шорсткість поверхні після РОД. Таким чином, фактор *I*, треба розглядати як головний, керуючий. В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні заготовки глазка змінювалася у межах від *Ra* 8 до *Ra* 12,5.

2. Отримано математичну модель бічного між електродного зазору. Показано, що усі фактори у вибраному факторному просторі не впливають на між електродний зазор, а сам зазор при реалізації процесу РОД твердосплавної заготовки глазка підтримується на постійному рівні, який складає 0,035 ± 0,005 мм. Більш точне визначення цієї залежності пов´язано з проблемою статичної помилки, що виникає при вимірюванні зазору. В умовах експерименту бічний між електродний зазор змінювався в межах від 0,035 до 0,005 мм.

3. Отримано математичну модель відносного лінійного зносу графітового електрода – інструмента. Найбільший вплив на відносний лінійний знос електрода – інструмента виявляє глибина обробки *h*, із збільшенням якої γ_h збільшується. Таким чином, фактор *h*, треба розглядати як головний, керуючий. Вплив статичного тиску робочої рідини $P_{ст}$ приблизно у два рази менше, але має істотне значення. З підвищенням $P_{ст}$ лінійний знос збільшується. Останнє пояснюється зростанням температури електричної дуги у зв'язку зі стисненням її більш динамічним потоком робочої рідини. В умовах експерименту відносний лінійний знос графічного електрода інструмента змінювався у межах від 3,13 до 17,36%, що свідчить про доцільність використання процесу РОД для точного формоутворення отвору калібруючої циліндричної напрямної твердосплавних заготовок глазків.

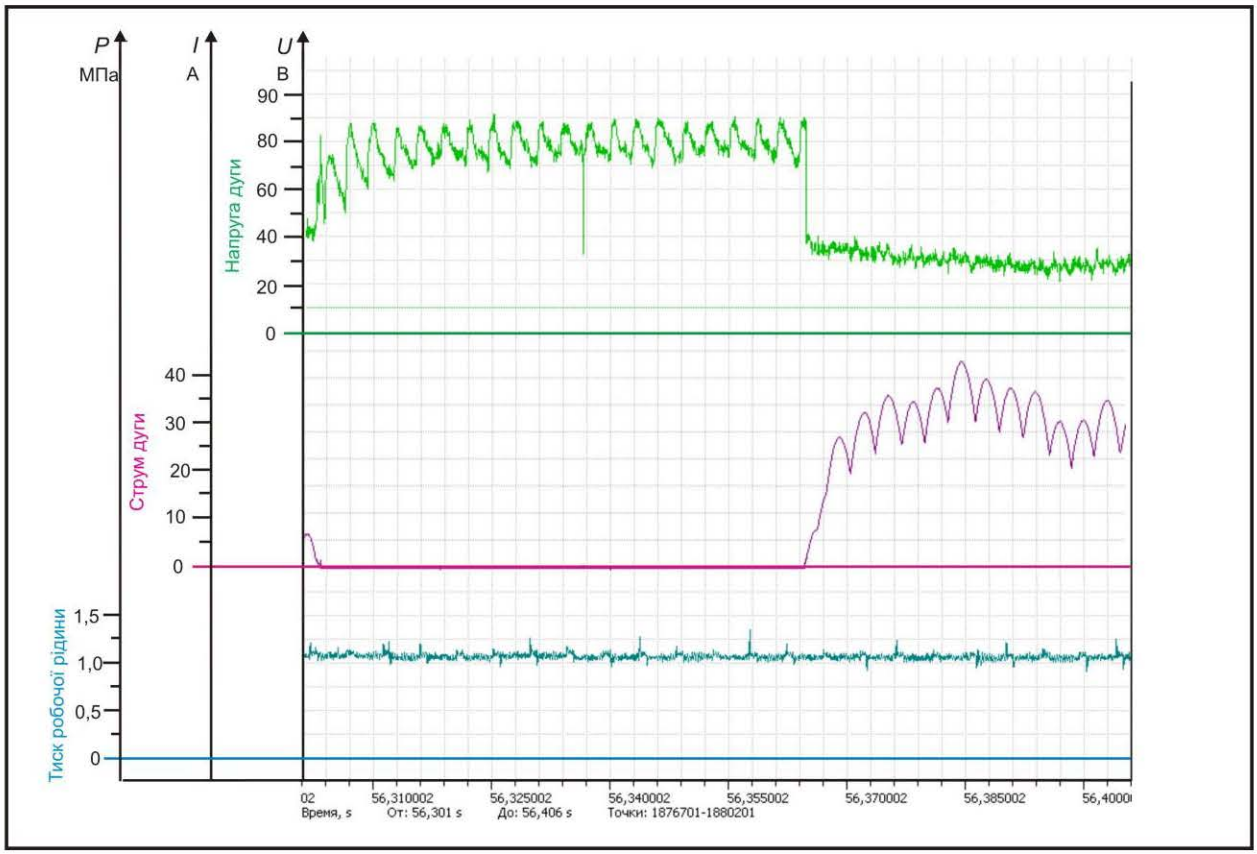


Рисунок 4.5. Осилограма початку процесу РОД твердосплавної заготовки глазка



Рисунок 4.6 Випробування способу РОД твердосплавних заготовок глазка крутильних машин

Твердосплавний глазок крутильної машини після РОД калібруючої циліндричної напрямної графітовим ЕІ (I = 50 А, P_{cm} = 15 МПа, F = 150 мм^2 , h = 3 мм

Розділ 5

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1 Розрахунок річного економічного ефекту.

Розрахунок очікуваного річного економічного ефекту [24,25,26] від впровадження у виробництво способу чорнової РОД твердосплавних глазків крутильних машин базується на наступних умовах:

- за базовий варіант прийнято найбільш розповсюджений сучасний метод чорнового алмазного шліфування глазків із твердого сплаву ВК8 при шліфуванні головками АГЦ на металевій зв'язці М5-2 з зернистістю 125/100 при глибині шліфування t від 0.005 до 0,02 мм. За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ», м. Бровари, Київської області, час обробки твердосплавної валоки складає 0,42 годин з середньою продуктивністю $M_{баз}$ = 20 мм^3/хв.;

- за проектний варіант прийнято спосіб чорнової РОД твердосплавних глазків крутильних машин із сплаву ВК8 з середньою продуктивністю обробки $M_{пр}$ = 52,5 мм^3/хв., що відповідає силі технологічного струму I = 35 А ;

- за даними роботи [4] річний об'єм виробництва твердосплавних глазків крутильних машин в Україні на науково-виробничому товаристві ТОВ «ІНТЕРВІТ» складає 2 т. У перерахунку на кількість твердосплавних глазків, 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 волок, що обробляються)	n	шт/рік	12000	12000	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
2	Середня трудомісткість обробки однієї волоки	t	год/шт	0,42	0,16	Дані випробування
3	Вартість обробки одніє волоки	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	$к_д$	-	1,1	1,1	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
8	Вартість 1 м^2 виробничої площі	$Ц_п$	грн/м^2	4500	4500	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	$к_п$	-	0,9	0,7	Дані випробування
11	Вартість однієї кВт/год електроенергії	$Ц_в$	грн	1,81	1,81	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
12	Річна норма амортизаційних відрахувань	$а_а$	%	11,48	11,48	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
13	Річна норма відрахувань на утримання та поточний ремонт обладнання	$а_у$	%	3,64	3,64	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
14	Річна норма відрахувань на ремонт, амортизацію та утримання виробничої площі	$а_п$	%	2,4	2,4	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
15	Коефіцієнт, що ураховує додаткову заробітну плату	$К_{дз}$	-	1,089	1,089	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»
16	Коефіцієнт завантаження обладнання	$к_{зо}$	-	0,75	0,75	За даними ТОВ «ІНТЕРВІТ»

Для розрахунку суми капітальних вкладень необхідно визначити: розрахункову та прийняту кількість потрібного обладнання для обробки твердосплавних волок за програмою n; вартість всього обладнання $К_{об}$; вартість виробничих приміщень $К_{вп}$. 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	$Н_р$	шт	2,3	0,9	$Н_р = \frac{n \cdot t}{F}$ $Н_{р(б)} = \frac{12000 \cdot 0,42}{2008} = 2,3$ $Н_{р(п)} = \frac{12000 \cdot 0,16}{2008} = 0,9$
2	Прийнята кількість обладнання	$Н_п$	шт	2	1	-

Продовження таблиці 5.2

3	Вартість всього обладнання	$К_{об}$	грн	2 880 000	980 000	$К_{об} = К \cdot Н_п$ $К_{об(б)} = 1440000 \cdot 2 = 2880000$ $К_{об(п)} = 980000 \cdot 1 = 980000$
4	Вартість виробничих приміщень	$К_{вп}$	грн	89100	79200	$К_{вп} = S \cdot к_д \cdot Н_п \cdot Ц_п$ $К_{вп(б)} = 9 \cdot 1{,}1 \cdot 2 \cdot 4500 = 89100$ $К_{вп(п)} = 16 \cdot 1{,}1 \cdot 1 \cdot 4500 = 79200$
5	Загальна сума капітальних вкладень	$К_{кв}$	грн	2969100	1059200	$К_{кв} = К_{об} + К_{вп}$ $К_{кв(б)} = 2880000 + 89100 = 2969100$ $К_{кв(п)} = 980000 + 79200 = 1059200$

Для подальшого розрахунку собівартості одиниці продукції попередньо треба визначитися: з заробітною платою $С_{зп}$; амортизацією, утриманням та ремонтом обладнання $С_{ам}$; вартістю електроенергії $С_е$; ремонтом та утриманням виробничою площі $С_{пл}$. 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	$С_{зп}$	грн	588060	392040	$С_{зп} = п \cdot Т \cdot К_{дз}$ $С_{зп(б)} = 12000 \cdot 45 \cdot 1{,}089 = 588060$ $С_{зп(п)} = 12000 \cdot 30 \cdot 1{,}089 = 392040$

Продовження таблиці 5.3

2	Амортизація, утримання та ремонт обладнання	$C_{ам}$	грн	435456	148176	$C_{ам} = \frac{K \cdot H_n \cdot (a_a + a_y)}{100}$ $C_{ам(б)} = \frac{1440000 \cdot 2 \cdot (11,48 + 3,64)}{100} =$ $= 435456$ $C_{ам(п)} = \frac{980000 \cdot 1 \cdot (11,48 + 3,64)}{100} =$ $= 148176$
3	Вартість електроенергії	$C_е$	грн	57260	57243	$C_е = N \cdot к_п \cdot F \cdot H_п \cdot Ц_е \cdot к_{зо}$ $C_{е(б)} = 11,67 \cdot 0,9 \cdot 2008 \cdot 2 \cdot 1,81 \cdot 0,75 =$ $= 57260$ $C_{е(п)} = 30 \cdot 0,7 \cdot 2008 \cdot 1 \cdot 1,81 \cdot 0,75 =$ $= 57243$
4	Ремонт та утримання виробничої площі	$C_{пл}$	грн	2138	1900	$C_{пл} = \frac{S \cdot к_д \cdot H_п \cdot Ц_п \cdot a_п}{100}$ $C_{пл(б)} = \frac{9 \cdot 1,1 \cdot 2 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 2138$ $C_{пл(п)} = \frac{16 \cdot 1,1 \cdot 1 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 1900$
5	Собівартість випуску продукції	C	грн	1082914	599359	$C = C_{зп} + C_{ам} + C_е + C_{пл}$ $C_{(б)} = 588060 + 435456 + 57260 + 2138 =$ $= 1082914$ $C_{(п)} = 392040 + 148176 + 57243 + 1900 =$ $= 599359$

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження у виробництво способу чорнової РОД твердосплавних глазків крутильних машин визначаємо за формулою:

$$E_р = \left[C_{(б)} - C_{(п)}\right] + E_н \left[K_{кв(б)} - K_{кв(п)}\right] \quad (5.1)$$

$$E_р = (1082914 - 599359) + 0,15(2969100 - 1059200) = 77004 \text{ грн.}$$

ВИСНОВКИ

1. Удосконалено технологію чорнової обробки твердосплавних глазків крутильних машин за рахунок застосування процесу РОД. Виявлено взаємозв'язок технологічних характеристик процесу РОД з електричними і гідродинамічними режимами обробки та геометричними параметрами отвору, що обробляється. Отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин, які дозволяють прогнозувати їх та оптимізувати режим обробки.

2. Отримано математичну модель продуктивності процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин. Показано, що найбільший вплив на М виявляє сила технологічного струму І, із підвищенням якої продуктивності обробки збільшується. Останнє підтверджує теплову природу РОД. Таким чином, силу технологічного струму треба розглядати як основний керуючий фактор. Вплив площі обробки F та М значно менший, але має суттєве значення. З його підвищенням продуктивність збільшується. В рамках експерименту продуктивність процесу РОД твердосплавних глазків крутильних машин змінювалася у межах від 31,20 до 193,24 мм^3/хв, що приблизно в 4,1 – 5, 2 разів перевищує продуктивність електроімпульсної обробки, та в 4,2 – 6,3 разів дозволяє збільшити продуктивність обробки в порівняні чорнового шліфування головками АГЦ на металевій зв'язці отворів твердосплавних глазків крутильних машин.

3. Отримано математичну модель питомої продуктивності M_a процесу РОД твердосплавних заготовок глазків крутильних машин. Показано, що M_a головним чином залежить від площі обробки F, із підвищенням якого вона збільшується. Таким чином, площа обробки F є головний керуючий фактор. Вплив сили технологічного струму І майже не впливає на питому продуктивність M_a обробки в рамках є експерименту . Із підвищенням F питома продуктивність обробки збільшується.

4. Отримано математичну модель питомої витрати електроенергії a. Виявлено що усі 2 фактора (площа обробки, статичний тиск на вході потоку у між електродний зазор) впливають на питому витрату електроенергії a приблизно однаково. В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД змінювалася у межах від 5.95. до 24.77 (кВт·год)/кг

5. Отримано математичну модель шорсткості бічної поверхні після РОД твердосплавних заготовок глазків крутильних машин. Показано,що шорсткість залежить,головним чином, від сили технологічного струму I, причому, із підвищенням сили струму шорсткості збільшується. Шорсткість поверхні – результат накладання одиночних лунок від горіння розрядів. Відомо, що більшої сили струму відповідає більший діаметр лунки. Отже, більшої сили струму відповідає більша шорсткість поверхні після РОД. Таким чином, фактор I, треба розглядати як головний, керуючий. В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні твердосплавної волоки змінювалася у межах від Ra 8 до Ra 12,5.

6. Отримано математичну модель бічного між електродного зазору. Показано, що усі фактори у вибраному факторному просторі не впливають на між електродний зазор, а сам зазор при реалізації процесу РОД твердосплавних заготовок глазків крутильних машин підтримується на постійному рівні, який складає 0,035 ± 0,005 мм. Більш точне визначення цієї залежності пов'язано з проблемою статичної помилки, що виникає при вимірюванні зазору. В умовах експерименту бічний між електродний зазор змінювався в межах від 0,035 до 0,005 мм.

7. Отримано математичну модель відносного лінійного зносу графітового електрода – інструмента. Найбільший вплив на відносний лінійний знос електрода – інструмента виявляє глибина обробки h, із збільшенням якої $\gamma_{Л}$ збільшується. Таким чином, фактор h, треба розглядати як головний, керуючий. Вплив статичного тиску робочої рідини приблизно у два рази менше, але має істотне значення. З підвищенням $P_{ст}$ лінійний знос збільшується. Останнє пояснюється зростанням температури електричної дуги у зв'язку зі стисненням її більш динамічним потоком робочої рідини В умовах експерименту відносний лінійний знос графічного електрода інструмента змінювався у

межах від 3,13 до 17,36%, що свідчить про доцільність використання процесу РОД для точного формоутворення отвору калібруючої циліндричної напрямної твердосплавних заготовок глазків крутильних машин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шлифование сплавов вольфрама (Часть1)[Электронный ресурс] // Центральный металлический портал РФ. – Режим доступа к статье: http://metalluchecki y – portal.ru/articles/obrabotka/wolfram/shlifovanie_ splavov_volframa/1.
2. А.с. 368965 СССР.М.кл. В 23 Р 1/02. Способ электрофизической обработки металлов /В.И. Носуленко, Г.Н. Мещеряков (СССР) - №2138401/08; ; Заявл. 12.06.75; не подлежит в публикацию в открытой печати.
3. Носуленко В.И., Мещеряков Г.Н.Размерная обработка металлов электрической дугой// Электронная обработка материалов. – 1981.- №1. – С.19 – 23.
4. Твердые сплавы в машиностроении // В.С. Раковский, Ф.Ф. Смирнов, Л.А. Рождественский, И.И. Крюков. М.: Машгиз, 1955.
5. Боков В.М. Розмірна обробка електричною дугою деталей із важкооброблюваних матеріалів // Збірник наукових праць КДТУ / технікав сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / - Вип. 13. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – С.191 – 196.
6. Боков В.М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. Кіровоград:Поліграфічно – видавничий центрТОВ «Імекс - ЛДТ», 2002. – 300с.
7. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование, изготовление и применение электродов –

инструментов. Часть 2. Электрохимическая обработка / Под ред. А. Л. Лившица, А. Роша. – М.: НИИмаш, 1980. – 164с.

8. Электрофизические и электрохимические станки. Каталог /Под общ. ред. А.Л. Лившица. – М.: НИИИМАШ, 1978. – 228с.
9. Размерная електрическая обработка металов: Учеб. Пособие для студентов вузов / Б.А. Артамонов, А.Л. Вишницький, Ю.С. Волков ,А.В. Глазков; под. ред.. А.В.Глазкова. – М.: высш.школа, 1978. – 336с.
10. Лившиц А.Л. Электроимпульсная обработка металов. – М.: НИИИМАШ, 1978. – 228с.
11. Материалы и методы для изготовления фасонних электродов – инструментов электроэрозионных копировально – прошивних станков. - М.: НИИмаш, 1975. – 143с.
12. Электроэрозионная и электрохимическая обработка. Расчет, проектирование, изготовление и применение электродов – инструментов. Часть 1. Электроэрозионная обработка / А.Л. Лавшица, А. Роша. - НИИИМАШ, 1980. – 224с.
13. Ковка и штамповка: Справочник. В 4х т/ ред.. совет: Е.И.Семенов (пред.) и др. – М.: машиностроение , 1987 –т.3. холодная объёмная штамповка / Под ред.. Г.А. Навроцкого. 1987. – 384 с., ил.
14. Фетеев Н.К. Технологыя электроэрозионной обработки. – М.: Машиностроение,1980. -184с.,ил.
15. Золотых Б. Н. О физической природе электрофизической обработки металлов. – В кн.: Электоискровая обработка металлов. Вып. 1.- М.: Из – во АН СССР,1957.
16. Золотых Б. Н. О новные вопросы теории электрической эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде. Авторе. Диссер. На соискании ученой степени д-ра техн. наук –М.: МИЭМ, 1968.
17. Носуленко В.І. розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис… д – ра тех.. наук: 05.03.07 / НТУУ « КПІ». – Київ, 1999. – 36 с.

18. НосуленкоВ.І.Розмірна обробка металів електричною дугою: Дис… д-ра техн.. наук: 05.03.07. – Кіровоград, 1998. – 389с.
19. Носуленко В.И., Мещеряков Г.Н. Размерная обработка металлов электрической дугой // Электронная обработка материалов. – 1981. - № 1. – с. 19 – 23.
20. Боков В.М., Мещеряков Г.Н. Технологические аспекти процесса размерной обработки электрической дугой фасонных полостей // Электронная обработка материалов. – 1985. – с. 12 – 14.
21. Новик Ф. С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов . – М.: Машиностроение; София: техника, 1980. – 304 с.
22. А.с.125134 СССР. Способ электрофизической обработки полостей /В.И. Носуленко, В.М. Боков (СССР). – Не подлежит опубликованию в открытой печати.
23. А.с. 902397 СССР. Способ электрофизической обработки электрической дугой / В.И. Носуленко, В.С. Запорожченко, В.М. Боков. - Не подлежит опубликованию в открытой печати.
24. Економічні розрахунки при проектуванні штампувальних цехів: вказівки до курсової роботи та економічної частини дипломного проекту /Укладачі: Скляренко І.В., Муцинова Л.В. – Кіровоград: КДТУ, 2000.
25. Расчёты экономичной эффективности новой техники. Справочник под общ. ред. К.М. Великанова. – Л.: Машиностроение, 1989.
26. Методические указания по дипломному проектированию для студентов спец. 0503 /Сост. В.М. Боков, В.С. Запорожченко и др. под ред. Н.В. Шепельского. – Кировоград: КИСХМ, 1989.
27. Безопасность производственных процессов : справочник / под ред. С. В. Белова. – М. : Машиностроение, 1985. – 448 с.

28. Справочная книга по охране труда в машиностроении / под ред. О. Н. Русака. – Л. : Машиностроение. Ленингр. отд–ние, 1989. – 541 с. – ISBN 5–217–00415–0.

ДОДАТКИ

Д1. Довідка про участь у науково-технічній конференції

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МЕТОДИЧНО-ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ ВІДДІЛ
пр-кт Університетський, 8
м. Кропивницький, Україна, 25006

Довідка №23.6ig 07.11.2022

Видана студенту групи ПМ(ОТ)-21М1,4 А. Сивому про те, що він брав участь у LVI науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти приуроченій Дню науки – 2022 з доповіддю на тему «Обробка електричною дугою твердосплавних глазків крутильних машин» (секція обробки металів тиском та спецтехнологій). За цією темою опубліковані тези доповідей у збірнику «Наука виробництву, 2022», С. 47.

Керівник МОВ Олексій СМІРНОВ