

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра обробки металів тиском та спецтехнологій

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри ОМТ та СТ

канд. техн. наук, доцент

_____ Віталій ШМЕЛЬОВ

21 грудня 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

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

**«Удосконалення технології та обладнання розмірної обробки
електричною дугою з використанням електроерозійних головок»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи ОТ-20 М 1,4

спеціальності 131

«Прикладна механіка»,

_____ Черніченко К. С.

7 грудня 2021 р.

Керівник проекту

канд. техн. наук, доцент

_____ Віталій ШМЕЛЬОВ

7 грудня 2021 р.

Рецензент

канд. техн. наук, доцент

_____ Віталій МАЖАРА

21 грудня 2021 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет: Механіко-технологічний

Кафедра: Обробки металів тиском та спецтехнологій

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ОМТ та СТ

канд. техн. наук, доцент

_____ Віталій ШМЕЛЬОВ

01 вересня 2021 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ
Черніченка Кирила Сергійовича**

1. Тема роботи: «Удосконалення технології та обладнання розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок».

2. Керівник роботи: Шмельов Віталій Миколайович, канд. техн. наук, доцент.

3. Строк подання роботи до захисту: 21 грудня 2021 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.

Мета: дослідження технологічних характеристик процесу розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.

Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методику експериментальних досліджень; виконати експериментальні дослідження та провести аналіз отриманих результатів; розробити конструкцію установки для РОД з використанням електроерозійних головок; 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.	01.09.2021 р.	01.12.2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	15.09.2021 р.	
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу	01.10.2021 р.	
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові	15.10.2021 р.	
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту	01.11.2021 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	07.12.2021 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	21.12.2021 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	29.12.2021 р.	

Дата видачі завдання

01 вересня 2021 р.

Підпис керівника

_____ Шмельов В. М.

Завдання прийнято до виконання

01 вересня 2021 р.

Підпис здобувача

_____ Черніченко К. С.

АНОТАЦІЯ

Черніченко К.С. «Удосконалення технології та обладнання розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок», спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП - «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2021 рік.

Метою роботи є розробка технології та обладнання для реалізації способу розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.

Запропоновано конструкцію установки для розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок, що відрізняється низькою економічною собівартістю порівняно з традиційним електроерозійними верстатами.

Описано технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок при обробці графітовим та металевим електродів-інструментів, а саме його електричні і гідродинамічні характеристики, та отримано математичні моделі продуктивності процесу обробки, шорсткості обробленої поверхні, об'ємного знос електрода-інструмента та міжелектродного зазору.

розмірна обробка електричною дугою, електроерозійна головка, електрод-інструмент, технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою

ANNOTATION

Chernichenko K. "Improvement of the technology and equipment of dimensional processing by electric arc using spark-erosion heads", specialty 131 "Applied Mechanics", EP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2021.

The aim of the work is to develop technology and equipment for the implementation of the method of dimensional processing by electric arc using EDM heads as a highly effective alternative to traditional methods of metalworking.

The design for equipment of dimensional processing by electric arc using EDM heads, which has a low economic cost compared to traditional EDM machines, is proposed.

Described technological characteristics of the process of dimensional processing by electric arc using spark-erosion heads in the processing of graphite and metal electrode-tools, namely its electrical and hydrodynamic characteristics, and mathematical models of processing process productivity, surface roughness, volume wear electrode-tool and interelectrode gap.

dimensional processing by electric arc, spark-erosion head, electrode-tool, technological characteristics of process of dimensional processing by electric arc.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ШЛІЦЬОВИХ ТА ШПОНКОВИХ З'ЄДНАНЬ.....	9
1.1. Виготовлення шліцевих валів механічними способами.....	9
1.2. Обробка шліцевих отворів.....	13
1.3. Виготовлення шпонкового з'єднання на валах.....	24
1.4 Електроерозійна обробка шліцевих та шпонкових валів.....	15
1.5 РОД як високоефективна альтернатива традиційним технологіям.....	18
1.6. Висновки.....	21
РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	22
2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень.....	22
2.2. Обладнання, пристрої, апаратура.....	24
2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів.....	27
2.4 Охорона праці при роботі на верстатах РОД.....	31
2.4. Висновки.....	32
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК	33
3.1. Визначення технологічних характеристик РОД графітовим ЕІ з використанням електроерозійних головок.....	33
3.2. Визначення технологічних характеристик РОД металевим ЕІ з використанням електроерозійних головок.....	40
3.3. Висновки.....	47
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК.....	48
4.1. Станція робочої рідини	48
4.2. Висновки.....	52
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК.....	53
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61
ДОДАТКИ.....	64

Вступ

В сільськогосподарському машинобудуванні все більш широко застосовують деталі обертання, що мають складний профіль. Наприклад, шліцьовий вал та різні вали зі шпоночним з'єднанням. Шліцьовий вал - деталь охоплювана поверхня якої з'єднується з отвором маточини за допомогою паралельних до осі вала шліців і пазів рівномірно розміщених на їх циліндричних поверхнях. Такі деталі можуть бути виготовлені із високолегованих жароміцних, неіржавіючих сталей, твердих сплавів та інших важкооброблюваних матеріалів. Прямокутні і евольвентні з'єднання можуть бути рухомими або нерухомими. З'єднання з евольвентним профілем зубців більш технологічні і здатні передавати більші навантаження.

Традиційним методом виготовлення таких деталей є механічна обробка. Проте виготовлення шліцьового валу достатньо трудомісткий процес, що вимагає наявності дорогого інструменту. До того ж виникають складності у забезпеченні рівномірного ексцентриситетного зазору.

Широкого застосування, при виготовленні складних деталей, набули процеси електроіскрової (електроімпульсної) обробки. Що забезпечують значно вищу ефективність одержання таких деталей без подальшої обробки. Проте процеси електроіскрової обробки забезпечують порівняно невисоку продуктивність обробки.

З робіт Носуленко В.І. відомо, що альтернативою таким процесам є спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД), який, порівняно з електроіскровою обробкою, дозволяє підвищити продуктивність в 5-10 разів [1] і може дозволити отримати шліцьовий вал з високими показниками економічної ефективності.

Але, для застосування процесу РОД при виготовленні шліцьового валу необхідно виявлення закономірностей між технологічними характеристиками процесу РОД та якісними показниками поверхні робочих деталей шліців.

Мета роботи: розробка технології та обладнання для реалізації способу РОД з використанням електроерозійних головок як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.

Задачі дослідження:

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД з використанням електроерозійних головок та визначення меж його раціонального застосування;
2. Удосконалення обладнання розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок;
3. Визначення впливу фізико-технологічних характеристик процесу РОД, на його кількісні та якісні показники.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Описано електричні і гідродинамічні характеристики процесу РОД з використанням електроерозійних головок, що дозволить отримувати деталі заданих розмірів з необхідною якістю обробленої поверхні.
2. Запропоновано конструкцію станції робочої рідини для РОД з використанням електроерозійних головок, що дозволить отримати компактну установку і знизити собівартість її виготовлення.

Практичне значення отриманих результатів

Досліджено та описано вплив технологічних характеристик процесу РОД на його якісні та кількісні показники, що дозволить отримувати деталі заданих розмірів з необхідною якістю обробленої поверхні.

Удосконалено існуючу та запропоновано нову конструкцію станції робочої рідини для реалізації способу РОД з використанням електроерозійних головок, що дозволить отримати компактну установку і знизити собівартість її виготовлення.

Особистий внесок здобувача

Постановка мети і задач досліджень; розробка концепції компоновки обладнання, гідрачлічних та приципових схем; експериментальні дослідження технологічних характеристик процесу РОД, та аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів та публікації.

Брав участь у LV науково-технічна конференція здобувачів вищої освіти за результатами якої опубліковано 1 тези у збірнику тез доповідей здобувачів вищої освіти LV науково-технічної конференції «Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2021» 14 травня 2021 року.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ВИГОТОВЛЕННЯ ШЛІЦЬОВИХ ТА ШПОНКОВИХ З'ЄДНАНЬ

1.1. Виготовлення шліцьових валів механічними способами

В конструкціях машин все більш широко використовуються деталі обертання. Такі деталі як шліцьовий та шпонковий вал володіють високими технологічними характеристиками. Такі деталі можуть бути виготовлені із високолегованих жароміцних, неіржавіючих сталей, твердих сплавів та інших важкооброблюваних матеріалів. Прямокутні і евольвентні з'єднання можуть бути рухомими або нерухомими [2].

Шліцьові з'єднання широко застосовуються в навантажених механізмах. Перевагами шліцьового з'єднання є краща центрування деталей на шліцьових валах і більш висока міцності шліцьових валів в порівнянні зі шпонковими, особливо при динамічних навантаженнях. Недоліком є велика складність виготовлення шліцьового з'єднання в порівнянні з шпонковим.

Шліцьові з'єднання в залежності від профілю зубів поділяються на прямобічні, евольвентні і трикутні.

Недоліком шліцьових з'єднань слід вважати:

- 1) складність виготовлення шліцьових валів;
- 2) збільшення концентраторів напружень.

Шліци зазвичай виготовляють фрезеруванням, струганням, протягуванням і холодним накочуванням (в основному евольвентні шліци). Технологічний процес обробки шліців залежить від методу центрування шліцьового з'єднання і термічної обробки [3].

На валах нарізати шліци можна двома методами:

- 1) фрезеруванням за методом обкатки спеціальними черв'ячними фрезами (рис.1.1) на шліцефрезерних або звичайних зубофрезерних верстатах;
- 2) фрезеруванням дисковими або фасонними фрезами на горизонтально-фрезерних верстатах.

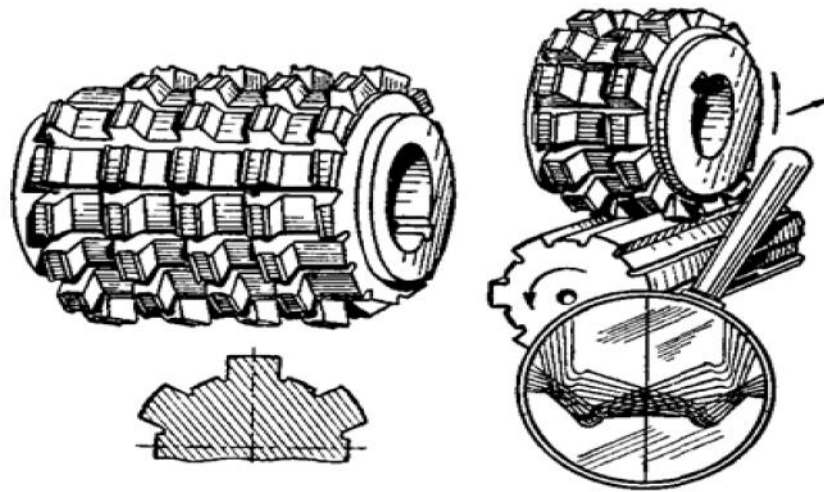


Рис.1.1. Схема фрезерування шліцевого вала черв'ячної-шліцевої фрезою [3].

В серійному виробництві зазвичай нарізають шліци черв'ячною фрезою методом обкатки. Цей метод досить трудомісткий. Виготовити шліци можна за один або два робочих ходи в залежності від необхідної точності. Для збільшення продуктивності обробки можна застосовувати багатозахідну черв'ячну фрезу для чорнового фрезерування.

Чорнове фрезерування шліців іноді виконують фасонними дисковими фрезами з використанням ділильної головки.

Фрезерування дисковими фрезами не забезпечує достатню точність по кроку і ширині шліців.

Попереднє фрезерування бічних поверхонь шліців може проводитися на горизонтально-фрезерних верстатах двома дисковими швидкорізальними або твердосплавними фрезами з подальшою обробкою профілю западини дискової профільної фрезою. При цьому вставляється припуск на шліфування. Фрезерування западин в одну операцію виконують дисковою фасонною фрезою.

У дрібносерійному і одиничному виробництві фрезерування ведеться двома дисковими фасонними фрезами, що обробляють одночасно бічні сторони і западини (рис. 1.2,в) [3].

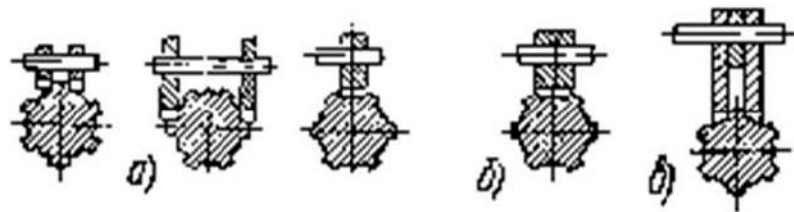


Рис.1.2. Схеми фрезерування шліців [3].

Можна також нарізування прямобочних шліців виконувати попереднім фрезеруванням фасонними дисковими фрезами і чистовим фрезеруванням бічних поверхонь шліців торцевими фрезами, оснащеними пластинами з твердого сплаву (рисунок 1.3) [3].

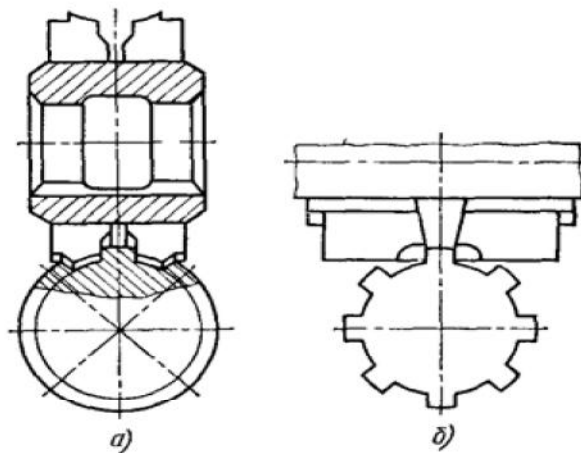


Рис.1.3. Схема фрезерування шліців фасонними фрезами [3]:

а – попередня обробка; б – чистова обробка бічних поверхонь шліців.

Така схема обробки забезпечує чистоту поверхні в межах $Ra = 1,6$ мкм і високу точність шліцевого з'єднання.

Деталі, у яких довжина шліцевого ділянки невелика і немає місця для виходу фрези, обробляються довбанням за методом обкатки на зубодовбальних верстатах за допомогою спеціального довбача.

Недоліком методу обкатки є висока трудомісткість в порівнянні з фрезеруванням дисковими фрезами, висока вартість ріжучого інструменту, необхідність спеціальних верстатів.

Достатньо розповсюдженим є метод холодним накочуванням роликів або рейками, а також профільними багатороликовими головками. Для цього використовують набір фасонних різців, що збирають в голівку. Цим методом

можна обробляти як наскрізні, так і ненаскрізні шліци. Параметр шорсткості обробленої поверхні $Ra=2,5...1,25$ мкм.

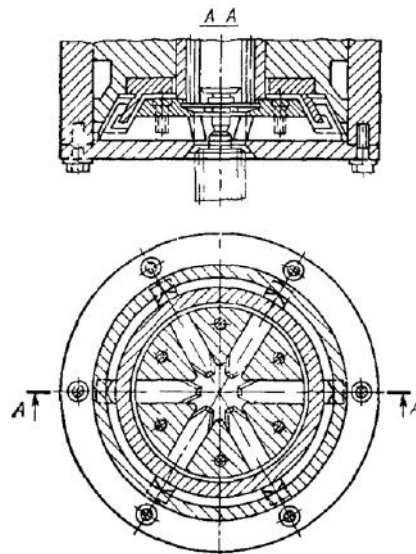


Рис.1.4. Різцева головка шліцестругального верстата [3].

Іншим методом утворення шліців є шліцепротягування [3], яке виконують двома блоковими протяжками (рис.1.5.). Блок протяжки складається з набору різців-зубів, які заточують комплектно і встановлюють в блоки в спеціальному пристосуванні.

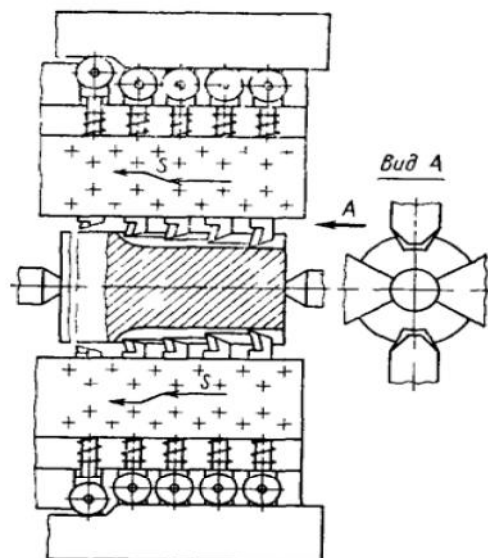


Рис. 1.5. Схема протягування шліців на валах [3].

Перспективним є холодне накручування шліців, при якому шліци утворюються пластичним деформуванням без зняття стружки [3]. Накатка виконується роликами, рейками і багатороликовими профільними головками (рис. 1.6.). Шорсткості поверхні при такій обробці $Ra = 0,63...0,32$ мкм.

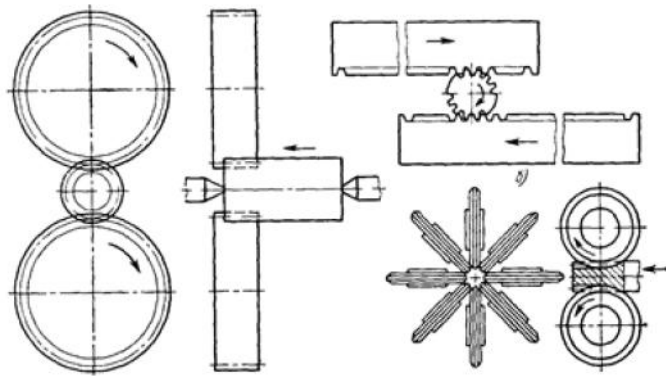


Рисунок 1.6. Схеми накочування шліців [3]:

а – круглими роликами, б – рейками; в – багатороликової головкою.

Холодне накочування багатороликівими профільними головками вимагає особливо точного виготовлення інструменту.

Всі термічно оброблені шліцьові вали після нарізування шліців шліфують профільним кругом.

Шліфування шліців проводиться після термічної обробки і забезпечує отримання чистоти поверхні до $Ra = 0,8$ мкм і точність центруючого діаметра по 7-8 квалітету [3].

1.2. Обробка шліцьових отворів.

Технологічний процес обробки шліцьового отвору складається з наступних основних операцій:

1. Свердління або зенкерування отвору і підрізування торця;
2. Сротягування циліндричної поверхні і шліців окремо або комбінованої протяжкою (за рахунок повздовжнього протягування);
3. Обробки всіх зовнішніх поверхонь втулки на верстатах токарної групи з базою від шліцьового отвору;
4. Термічної обробки;
5. Калібрування або шліфування отвору (в залежності від прийнятого методу центрування).

Для отримання точного зовнішнього діаметра западин шліцьового отвору потрібне введення протяжок для калібрування і більш точна попередня обробка шліців.

Недоліком калібрування є неминучість ексцентричності центруючої окружності западин щодо початкової окружності зубчастого колеса.

Евольвентні шліци у втулці зазвичай нарізаються на зубодолбальних верстатах. В даний час в масовому виробництві впроваджено протягування евольвентних шліців. Протягування евольвентних шліців у багато разів продуктивніше довбання. Недоліком цього способу є складність виготовлення протягання з евольвентним профілем.

Технологічний процес обробки шліцевого валу складається з наступних основних операцій:

1. Токарної обробки вала;
2. Обробки шліців;
3. Термообробка;
4. Шліфування зовнішніх поверхонь;
5. Шліфування елементів шліців.

1.3. Виготовлення шпонкового з'єднання на валах

З'єднання призматичними шпонками

Призматичні шпонки (рис. 1.7) виконують прямокутного перерізу з відношенням висоти до ширини перерізу ($h:b$) від 1:1 для валів малих діаметрів до 1:2 для валів великих діаметрів (ГОСТ 23360-78) [4].

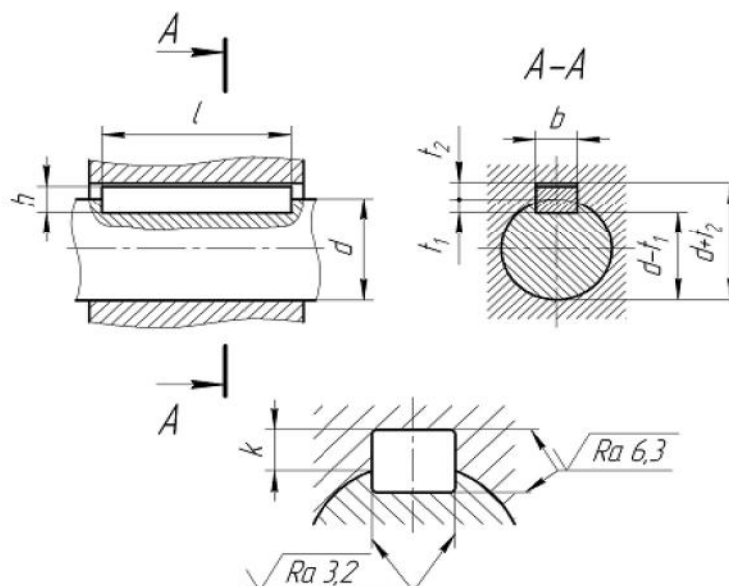


Рис. 1.7. Шпонкове з'єднання [4]

З'єднання сегментними шпонками

Сегментні шпонки (рис. 1.8) забезпечують меншу точність посадок і врізаються у вал на більшу глибину, що відповідно знижує витривалість валів [4].

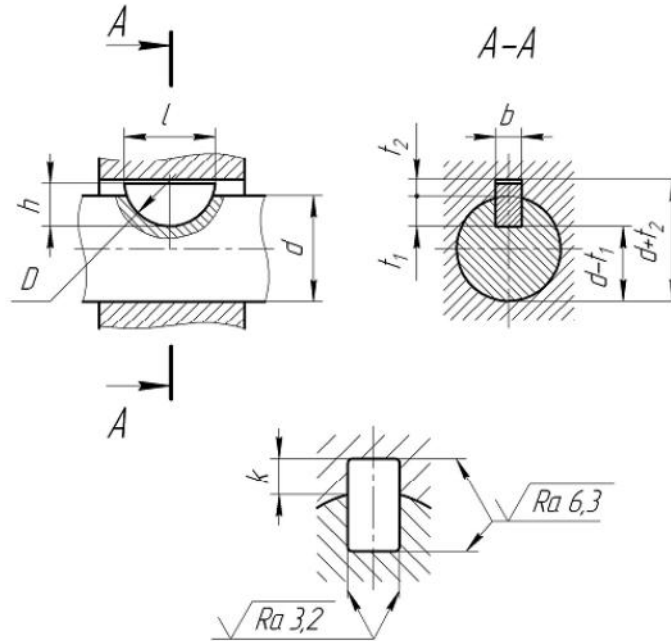


Рисунок 1.8. З'єднання сегментними шпонками [4]

1.4. Електроерозійна обробка шліцьових та шпонкових валів

Електроерозійна обробка (ЕЕО) заснована на використанні явища електричної ерозії – руйнування матеріалу електродів при електричному пробое міжелектродного проміжку, тому метод дозволяє обробляти тільки електропровідні матеріали [5].

На рис. 1.9 наведена умовна схема процесу ЕЕО. Ізольований електрод-інструмент (ЕІ) 1 і оброблювана заготовка 2 занурені в робочу діелектричну рідину 8 і з'єднані з генератором електричних імпульсів 3. Між електродом і деталлю електричним пробоем міжелектродного проміжку (МЕП) збуджується імпульсний розряд 4, який миттєво нагріває мікроділянки електродів і контактуючу з ними рідину. В результаті в зоні розряду формується газовий міхур 5. В кінці кожного імпульсу відбувається схлопування міхура. При цьому продукти ерозії - шлам - у вигляді гранул 6

видаляються з МЕР робочої рідиною 8, а на поверхні електрода-заготовки утворюється ерозійна лунка 7. За час паузи відбувається відновлення електричної міцності МЕР до вихідного значення. Потім, при подачі наступного імпульсу напруги, весь процес повторюється, але пробою відбувається вже там, де напруженість прийме максимальне значення, в зазорі між найбільш близькими мікровиступів поверхні заготовки і інструмента. Процес ерозії заготовки триває до повного видалення металу, що знаходиться на відстані електричного пробою (0,01-0,15 мм) [5].

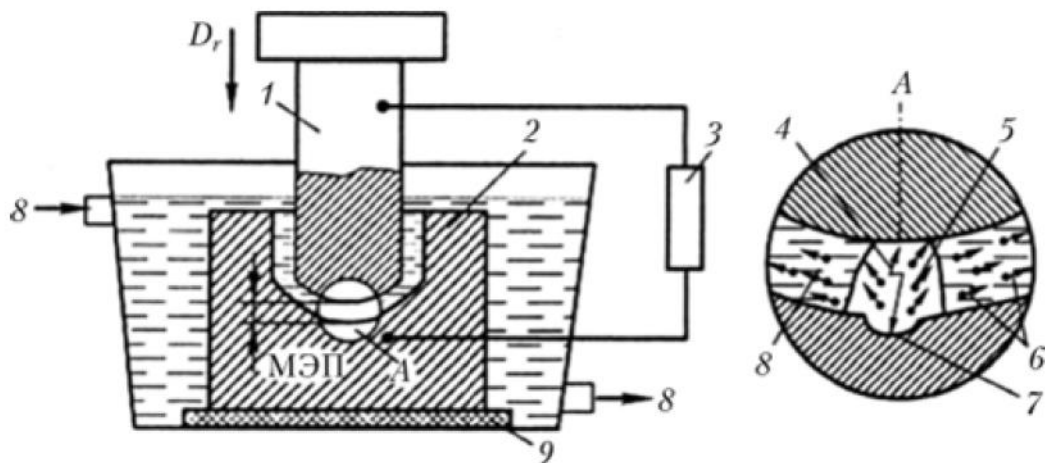


Рис.1.9 Умовна схема процесу ЕЕО [5]:

1 - електрод-інструмент; 2 - оброблювана деталь; 3 - генератор електричних імпульсів; 4 - електричний розряд; 5 - газовий міхур; 6 - продукти ерозії (шлам); 7 - ерозійна лунка; 8 - робоча рідина; 9 - ізолятор

Оброблена поверхня являє собою поверхню, утворену безліччю лунок (рис. 1.10) [5].

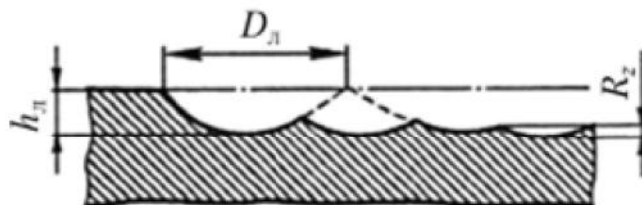


Рис.1.10. Профіль поверхні, обробленої ЕЕО [5]

При різноманітні кінематичних схем ЕЕО всі схеми умовно можна розподілити на три групи [5]:

1. Копіюванням форми профільованого інструмента, що представляє собою зворотнє відображення форми деталі. Операції, що

виконуються за першою схемою, називаються копіювально-прошивних (рис. 1.11, *а - н*) [5].

2. Задана форма деталі забезпечується взаємним переміщенням заготовки і непрофілірованого інструменту у вигляді дроту або металевого диска (рис. 1.11, *г, д*) [5].

3. Отримання необхідної форми забезпечується взаємним переміщенням профільованого інструменту і заготовки. Використовують для редагування фасонних електроалмазних кіл, виготовлення фігурних канавок і шліфування (рис. 1.11, *е*) [5].

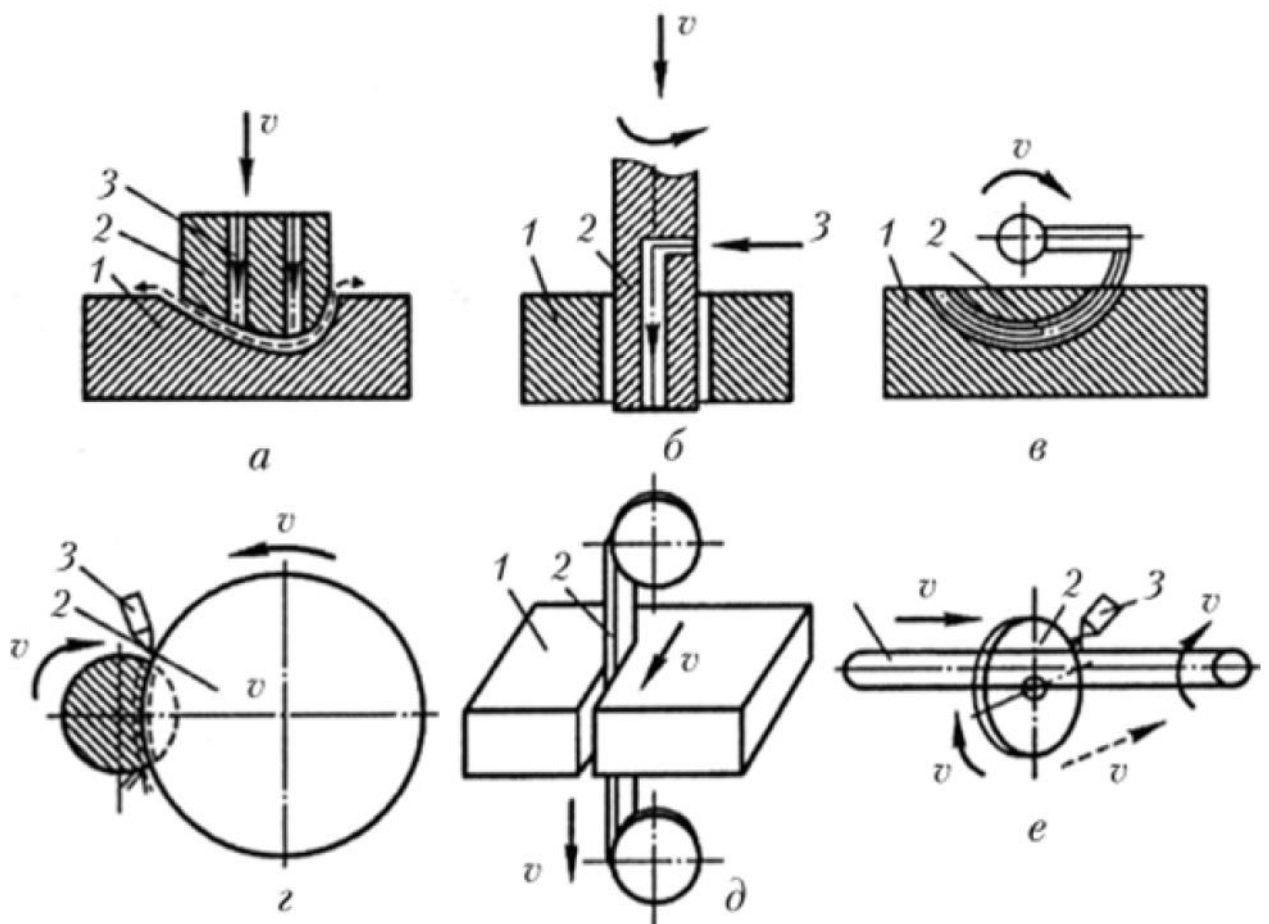


Рис.1.11. Кінематичні схеми процесів ЕЕО [5]:

а - копіювання; *б* - прошивання порожнин з прямою віссю; *в* - прошивання отворів з криволінійною віссю; *г* - відрізка обертним диском; *д* - відрізка дротом (стрічкою); *е* - шліфування; 1 - оброблювана деталь; 2 - інструмент; 3 - подача робочої рідини; *v* - швидкість і напрямок руху електродів

Електроди-інструменти (ЕІ) та робочі рідини.

Матеріал електрода-інструменту повинен володіти високою ерозійною стійкістю, міцністю і високою оброблюваністю методами різання [5].

Як матеріал для електродів при обробці високовуглецевих інструментальних сталей і жароміцних сплавів на нікелевій основі рекомендуються графіт, мідь і композиційний матеріал МНБ-3 (97% міді і 3% нітриду бору). Для видалення продуктів ерозії в електроді виготовляється необхідну кількість отворів через які здійснюється прокачуванням або відсмоктуванням робочої рідини з зазору [5].

В якості непрофільованого інструменту при ЕЕО найбільшого поширення набули мідні або латунні диски і тонкий дріт діаметром 0,02-0,3 мм з міді, латуні, вольфраму і молібдену [5].

В якості робочих рідин використовують низькомолекулярні вуглеводні різної в'язкості (гас, індустриальне масло, трансформаторне масло і їх суміші), воду і інше.

До недоліків електроіскрової та електроімпульсної обробки слід віднести низьку продуктивність обробки, що знаходиться в межах 5-30 см³/хв при чистових режимах обробки.

1.5. РОД як високоефективна альтернатива традиційним технологіям

В умовах сучасного виробництва (шліцьових та шпонкових валів) високоефективну альтернативу традиційним процесам обробки металів різанням і електроерозійним методам металообробки складає розмірна обробка електричною дугою (РОД). Пояснюється це тим, що обробка шліцьових та шпоночних пазів традиційними процесами обробки металів різанням низькопродуктивний процес і потребує подальшої слюсарної доводки, яка є тривалим процесом, що потребує для її реалізації спеціалістів високої кваліфікації. Процеси електроерозійної обробки дозволяють отримувати шліцьові з'єднання без наступної слюсарної доводки, проте

процеси послідовної обробки шліцьових валів не забезпечує рівномірного зазору між ними, а також має обмеження в можливості варіювання зазору. Окрім того, процеси електроерозійної обробки мають невисоку продуктивність.

Перспективним для виготовлення шліцьових та шпоночних з'єднань є спосіб РОД, який дозволяє здійснити як розділові операції при обробці складних внутрішніх і зовнішніх контурів, так і одержати фасонні профілі типу фасонних зубчатих поверхонь, квадратних отворів з фасками і т. і. [1].

Сутність РОД полягає в тому, що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою, яка горить поміж ЕІ та електрод-заготовка (ЕЗ) 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). Звичайно РОД здійснюють дуговим розрядом, що горить в поперечному, по суті, потоці робочої рідини (рис. 1.13) [1].

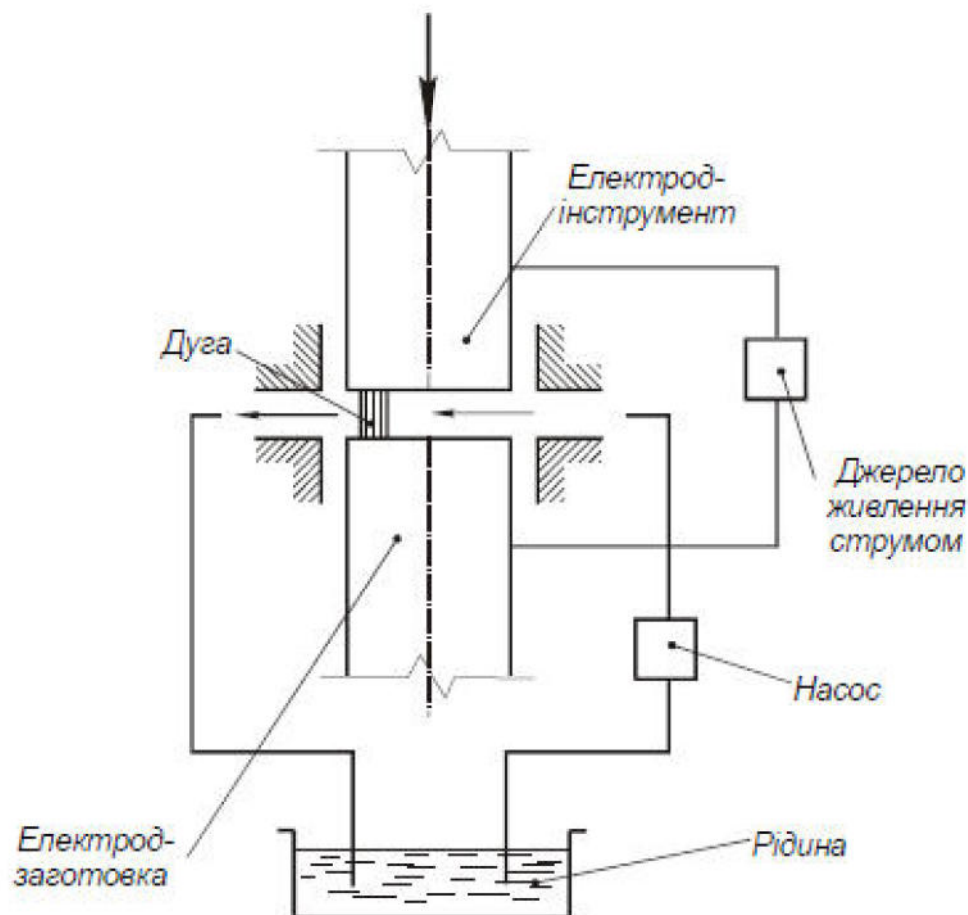


Рис. 1.13. Принципова схема РОД [1]

Як зазначено в роботі Носуленко В.І. «Спосіб РОД порівняно з традиційними способами металообробки (різанням, тиском) забезпечує такі переваги:

1. Вихідний енергоносіє (електроенергія) не перетворюється в силову енергію (тобто не потрібен двигун і відповідні ланки кінематичного ланцюга верстата), а реалізується в зоні обробки безпосередньо, виконуючи відповідну операцію при необхідних якості та продуктивності обробки...

2. Обробка здійснюється без помітних механічних зусиль на інструмент та без силової дії на заготовку...

3. Відсутня необхідність застосування спеціальних інструментів, більш твердих, ніж метал, що обробляється...

4. Продуктивність обробки не залежить від твердості та в'язкості металу, який обробляється...

5. Широкі можливості реалізації різноманітних технологічних схем формоутворення як непрофільованим, так і особливо, профільованим електродом...» [1].

Таким чином процес РОД дозволяє підвищити продуктивність виготовлення шліцьових та шпонкових з'єднань і дає можливість отримувати шліцьові та шпонкові з'єднання із заданою геометричною точністю отримувати якість робочої поверхні 5 класу шорсткості, і тому є актуальним.

На підставі зазначеного метою роботи є розробка технології та обладнання для реалізації способу РОД з використанням електроерозійних головок як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.

Мета роботи реалізована шляхом вирішення таких задач:

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД з використанням електроерозійних головок та визначення меж його раціонального застосування;

2. Удосконалення обладнання розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок;

3. Визначення впливу фізико-технологічних характеристик процесу РОД, на його кількісні та якісні показники.

1.6. Висновок

Показано, що спосіб РОД з використанням електроерозійних головок для виготовлення деталей складного профілю, зокрема спряжених пар, забезпечує необхідну якість і продуктивність обробки та можливість отримання готових, що не потребують слюсарної доводки, спряжених пар, забезпечує необхідну якість і точність обробки і тому є високоефективною альтернативою традиційним технологіям.

РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень

Спосіб РОД реалізує різноманітні технологічні схеми формоутворення, і дозволяє з високою продуктивністю порівняно з традиційними способами ЕЕО отримати різноманітної форми отвори, порожнини та стержні. Це обумовило його впровадження перш за все в інструментальному виробництві для отримання порожнин штампів гарячого об'ємного штампування, обробки глибоких отворів, очищення твердосплавних прес-форм та в ремонтному виробництві для випалювання залишків зламаного металорізального інструменту.

Зазвичай спосіб РОД застосовують для копіювально-прошивних операцій профільованим ЕІ при яких форма та розміри ЕІ повторюють форму та розміри отримуємої порожнини або отвору. РОД з використанням електроерозійних головок для обробки різноманітних порожнин та отворів раніше майже не застосовувався. Тому необхідні дослідження фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД, розробка технології та пристроїв, дослідження гідродинамічних процесів, що протікають в процесі обробки, приклади реалізації конкретних технологій, впровадження цих технологій у виробництво та визначення області раціонального практичного застосування процесу і його конкурентоспроможності порівняно з іншими способами обробки.

"Інструментом" обробки при РОД є стаціонарна електрична дуга в поперечному потоці робочої рідини.

Із попередніх досліджень відомо, що найкращу ерозійну стійкість мають електрод-інструмент (ЕІ) з графітизованих матеріалів при застосуванні робочої рідини з нафтопродуктів. Тому для досліджень використовувались ЕІ з матеріалу МПГ- 7 та робочу рідину, яка являє собою

суміш мастила і гасу. Найкраща якість обробки досягається при застосуванні зворотної полярності електродів. Міжелектродний зазор (МЕЗ) (бічний) коливається в межах 0,15...0,04мм.

Для зазначених умов виконано дослідження впливу матеріалу електрод-інструмента на технологічні характеристики процесу. Встановлено, що при РОД з використанням електроерозійних головок основними факторами, що обумовлюють енергетичні та геометричні характеристики дуги, фізичний механізм процесу і технологічні характеристики РОД є сила технологічного струму I і статичний тиск робочої рідини на вході в МЕЗ P_s .

Для визначення технологічних характеристик процесу РОД використано математичні методи планування експерименту [9,10,11,12], що дало можливість отримати деякі теоретичні уявлення про фізичний механізм процесу і оцінити теоретичні передумови кількісно.

При цьому відповідні теоретичні і експериментальні дослідження дозволили зробити висновок, що технологічні характеристики процесу можуть бути представлені у вигляді функціональної степеневі залежності від сили струму I та статичного тиску потоку робочої рідини P_s , що і було реалізовано нами при визначенні цих характеристик процесу.

РОД має широкі можливості здійснення різноманітних технологічних схем формоутворення, що були розроблені для реалізації РОД з використанням електроерозійних головок. Експериментально досліджено технологічні характеристики процесу, такі як продуктивність, якість обробленої поверхні, що характеризується шорсткістю, точність обробки, стійкість ЕІ.

Практична реалізація способу РОД вимагає створення різноманітного обладнання та пристроїв. Установка для РОД з використанням

електроерозійних головок заснована на настільному свердлувальному верстаті 2М112 (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Настільний свердлувальний верстат 2М112

2.2. Обладнання, пристрої, апаратура

Дослідження технологічних характеристик процесу, фізичного механізму електричної ерозії та гідродинаміки проводились безпосередньо при отриманні стержнів, порожнин і щілин із використанням спеціальних пристроїв: електроерозійних головок (ЕЕГ), в якій кріпився ЕІ та тримача для заготовки, що встановлено на столі свердлувального верстату рис. 2.2



Рис.2.2. Установка РОД з використанням ЕЕГ встановленої на настільному свердлувальному верстаті

Експериментальні дослідження процесу РОД насамперед його технологічних характеристик та виготовлення експериментальних деталей здійснювались на настільному свердлувальному верстаті 2М112 з встановленою в патрон верстату електроерозійною головкою, що призначений для обробки фасонних об'ємних поверхонь, виготовлення

фасонних стержнів та прошивання глухих і наскрізних отворів різних поперечних перерізів в деталях як із конструкційних, так і важкооброблюваних сталей і сплавів, зокрема загартованих сталей і твердих сплавів тощо.

Технічна характеристика ЕЕГ

Оброблюваний матеріал	будь-який струмопровідний матеріал;
Діапазон діаметрів оброблюваних отворів, мм	4... 52;
Найбільша глибина прошивання, мм:	
– одним електродом	45;
– двома електродами	90;
Найбільша продуктивність обробки отворів в сталевих зразках, мм ³ /хв. при технологічному струмі:	
	50А..... 900;
	100А..... 1800;
	300А..... 5400;
	450А..... 8100;
Шорсткість обробленої поверхні по ГОСТ 2789-73, мкм.....	6,3;
Хід шпинделя, мм	40;
Маса головки, кг.....	4,5;
Габаритні розміри (довж.×шир.×висота), мм	110×110×215

Для макро- і мікроаналізу протікання процесу в часі, його основні параметри, зокрема, напругу, силу технологічного струму та статичний тиск робочої рідини записували за допомогою плати АЦП L-264 [13], встановленої на персональному комп'ютері (процесор Intel®-486) із програмним забезпеченням “Oscilloskop”, яке дозволяло переглядати і аналізувати отримані осцилограми в різних масштабах часу.

Технічна характеристика аналого-цифрового перетворювача плати - представлена в таблиці 2.1. На вхід зазначеного АЦП через комутатор може бути поданий з 16 або 32 аналогових каналів із зовнішнього роз'їму плати.

Дослідження технологічних характеристик процесу РОД здійснено з використанням методів математичного багатофакторного планування експерименту та математичного моделювання на ПЕОМ з використанням програмного забезпечення “Statistica v6.0”.

Таблиця 2.1 - Параметри АЦП

Кількість каналів	- 16 диференційних; - 32 зі спільною землею
Розрядність	12 біт
Час перетворення	1,7 мкс
Вхідний опір	≥ 1 МОм
Діапазон вхідного сигналу	$\pm 5,12$ В; $+2,56$ В; $+1,02$ В; $+10,24$ В; $+5,12$ В; $+2,56$ В;
Максимальна частота перетворення	200 кГц
Захист входів	при ввімкненому живленні комп'ютера вхідний захист витримує ± 20 В; при вимкненому живленні комп'ютера вхідний захист витримує ± 10 В;
Інтегральна не лінійність перетворення	$\pm 0,8$ МЗР; макс. $\pm 1,2$ МЗР
Диференційна не лінійність перетворення	$\pm 0,5$ МЗР; макс. $\pm 0,75$ МЗР
Відсутність пропуску кодів	гарантовано 12 біт
Час установлення аналогового тракту при максимальному перепаді напруги (параметри часу приведені для точності встановлення аналогового тракту до 1 МЗР)	4 мкс
Між каналне проходження	на смузі 10 кГц менше 0,5 МЗР на смузі 100 кГц для інших – 1,0 МЗР
Зміщення нуля	$\pm 0,5$ МЗР, макс. 1 МЗР

2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів

Експериментальні дані, отримані на основі планування та реалізації багатофакторного експерименту із елементами аналізу дисперсії та регресії являють помітний практичний інтерес. Побудовані за результатами експериментів моделі дозволяють визначити ступінь та характер впливу технологічних факторів на параметри, що досліджуються і, таким чином, створити передумови для керування процесом. В таких випадках важливо отримати максимально компактну адекватну модель, яка не містить зайвих членів та факторів.

Звичайно для відокремлення факторів, які суттєво впливають на досліджуваний параметр (відгук) проводять так звані експерименти для відсіювання, наприклад, на основі методів випадкового балансу або планів Плакетта-Бермана, а потім переходять до реалізації основного плану. Проте, така стратегія проведення експерименту потребує значних витрат. Тому

доцільно провести багатофакторний експеримент, який включає і сумнівні фактори із подальшим аналізом дисперсії результатів.

При дослідженні технологічних характеристик процесу РОД основних технологічних схем формоутворення – продуктивності, якості, точності обробки, стійкості ЕІ та гідродинаміки було виконано математичне планування експериментів [9,10,11,12]. Крім точок, визначених планами, при отриманні експериментальних партій деталей перевірялась точність побудованих моделей роботою на інших режимах в рамках меж варіювання керуючих факторів. Це дозволило побудувати також емпіричні графіки, які добре апроксимуються моделями, отриманими в результаті реалізації планів.

Розглянемо приклад планування експерименту та розрахунок математичної моделі продуктивності обробки деталі. На підставі попередньої інформації було відібрано ряд факторів, що впливають на функцію відгуку: технологічний струм I (X_1), А; статичний тиск робочої рідини на вході в зазор P_s (X_2), МПа.

Регулювання сили струму I і тиску P_s в зазначених далі межах обумовлені можливостями техніки, що при цьому використовувалась, та технологічною доцільністю. Зокрема, в якості джерел живлення для РОД використовують стандартні зварювальні випрямлячі з зовнішньою падаючою характеристикою ВДУ-504, розраховані на максимальний струм $I_{max}= 500$ А, які при безперервній роботі працюють при $I_{max}=400$ А. Робоча напруга U в межах 22...30 В, яку забезпечують зазначені джерела живлення, відповідає мінімальній необхідній величині МЕЗ.

Повний факторний експеримент для двох факторів (k) і трьох рівнів (p) включає себе наступне число експериментів (n):

Межі варіювання факторів і план експерименту представлено в табл. 2.2 і табл. 2.3.

Таблиця 2.2 - Межі варіювання факторів

Фактори	X_{max}	X_{min}	X_0	ΔX
Сила току I, A	200	50	125	75
Статичний тиск P_s, MPa	1,0	0,5	0,75	0,25

Таблиця 2.3 - Матриця планування експерименту

Номер експерименту	$X1 (I)$	$X2 (P_s)$	$Y1 (M) \text{ мм}^3/\text{хв}$
1	-	-	525
2	-	0	427
3	-	+	369
4	0	-	2075
5	0	0	1689
6	0	+	1460
7	+	-	3520
8	+	0	3219
9	+	+	2534

Всі зазначені фактори задовольняють умові керованості та однозначності. Інші параметри процесу РОД (склад робочої рідини, полярність, матеріал інструменту) обумовлені і зафіксовані на відповідних рівнях. Планування експерименту та обробка отриманих результатів виконані за допомогою програми STATISTICA 6.0, зокрема таких модулів як Планування експерименту, Основні статистики і таблиці, Множинна регресія, Нелінійне оцінювання.

Попередньо проведені теоретичні і експериментальні дослідження технологічних характеристик РОД дозволяють зробити висновок, що в найзагальнішому випадку вони можуть бути представлені у вигляді функціональної степеневі залежності від вище зазначених факторів:

$$y = k \cdot I^{\beta_1} \cdot P_s^{\beta_2}, \quad (2.1)$$

Застосувавши до виразу (2.2) перетворення логарифма, яке стабілізує дисперсію і досить поширене в статистиці, отримаємо:

$$\lg y = \lg k + \beta_1 \lg I + \beta_2 \lg P_s, \quad (2.2)$$

Тепер задача зводиться до побудови лінійної моделі виду

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i \cdot X_i, \quad (2.3)$$

де $Y = \lg y$

$$b_0 = \lg k (k = 10^{b_0})$$

$$b_1 = \beta_1$$

$$X_1 = \lg I$$

$$b_2 = \beta_2$$

$$X_2 = \lg P_i \text{ т.д.}$$

Формула переходу від натуральних значень факторів до кодованих (+1, 0, -1) має вигляд:

$$X_i = \frac{X_i - \lg X_0}{\lg X_{\max} - \lg X_0} \quad (2.4)$$

У відповідності з вибраним планом (3^2) було проведено 9 експериментів, кожний з яких виконувався один раз. Розрахунок моделі виконують згідно відомих методик [9,10,11,12] і застосуванням програмного пакету STATISTICA 6.0 [12]. В табл. 2.4 представлено значення оцінок коефіцієнтів регресії ($BETA$) та значення коефіцієнтів регресії (B), значення критерію Стюдента (t) для коефіцієнтів регресії та рівні його значимості (p). Побудовано довірчі інтервали ($\pm 95\%$).

Таблиця 2.4 - Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресії

Regression Summary for Dependent Variable: lgM (stal.sta)						
R= ,99824650 R?= ,99649607 Adjusted R?= ,99532810 F(2,6)=853,18 p<,00000 Std.Error of estimate: ,02615						
N=9	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(6)	p-value
Intercept			0,166077	0,072080	2,30405	0,060762
lgI	0,983979	0,024166	1,419427	0,034860	40,71774	0,000000
lgP	-0,168174	0,024166	-0,491145	0,070576	-6,95915	0,000437

Позначки в таблицях: *Dep. Var.* - Ім'я залежної змінної. В нашому випадку *lgM*; *Numberofcases* - кількість експериментів, за якими побудована регресія; *Multiple R* - коефіцієнт множинної кореляції; *R-square* - *RI* - квадрат коефіцієнта множинної кореляції, що зветься коефіцієнтом детермінації; *Adjusted R-square* - скоригований коефіцієнт детермінації; *Standard Error of Estimate* – стандартна похибка оцінки, що є мірою розпорошування

результатів спостереження відносно кривої регресії; *Intercept* - оцінка вільного члена регресії; *Std.Error* - стандартна похибка оцінки вільного члена; *t(df)* and *p-value* - значення *t* - критерія і рівня *p*. *t*-критерій використовують для перевірки гіпотези про рівність 0 вільного члена регресії; *F* - значення *F*-критерія; *df* - число ступенів свободи *F*-критерія; *p* - рівень значимості; *Std.Error of estimate* - квадратичне відхилення середнього експерименту; *b** - оцінка коефіцієнта регресії; *b* – значення коефіцієнта регресії.

Рівняння регресії згідно значень BETA:

$$y(M) = 1757,556 + 1325,333x_1 - 292,833x_2. \quad (2.5)$$

Відповідно, математична модель в функції двох факторів, мм

$$M = 1,466 \cdot I^{1,419} \cdot P_s^{-0,491}. \quad (2.6)$$

2.4. Охорона праці при роботі на верстатах РОД

Безпека при експлуатації електроерозійних верстатів РОД

Верстати РОД повинні експлуатуватися в строгій відповідності з вимогами техніки безпеки. При порушенні цих вимог створюється підвищена небезпека враження електричним струмом, одержання опіків унаслідок загоряння робочої рідини, отруєння газоподібними продуктами розкладання робочого середовища, а також травмування рухомими деталями і вузлами верстата. Крім того, у заходах щодо охорони праці повинні бути враховані збільшений шум, вплив робочого середовища й інші супутні явища при роботі, що становлять визначену небезпеку і погіршують умови праці [14,15].

До роботи на верстатах РОД допускаються особи, що пройшли медогляд, спеціальне навчання, інструктаж, атестовані за правилами проведення робіт на верстаті, по наданню першої допомоги при ураженні електрострумом і пожежної безпеки. Робота на верстаті чи його ремонт дозволяється за умови, що в приміщенні, де установлений верстат, знаходяться не менш двох чоловік, що можуть надати один одному необхідну допомогу. На кожному робочому місці обов'язково повинен бути електроізоляційний коврик під ноги. Під час роботи не слід торкатися

струмонесучих частин (електрода, електродотримача, бобіни з дротом на вирізних верстатах і т.д.). Налагодження, установку виробу інструмента варто робити, упевнившись у тому, що генератор технологічного струму виключений. По закінченню роботи, при проведенні налагоджувальних робіт, технічному обслуговуванні, а також при перервах у подачі електроенергії верстат повинен бути відключений від мережі живлення [14, 15].

Вимоги до технологічного обладнання

Вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів.

Безпека праці на виробництві містить такі складові:

- безпеку виробничого обладнання;
- безпеку технологічних процесів;
- організацію безпечного виконання робіт.

Необхідно знати вимоги безпеки до виробничого обладнання. Основним нормативним документом, який визначає загальні вимоги безпеки до виробничого обладнання (за винятком обладнання, яке є джерелом іонізуючого випромінювання), є ГОСТ 12.2.003-91.

2.5. Висновки

2.5.1. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень РОД з використанням електроерозійних головок.

2.5.2. Теоретичні дослідження виконано на основі теорії електроерозійної обробки, теорії математичного планування експерименту та засобів математичного моделювання.

2.5.3. Експерименти виконано на установці для РОД на базі настільного свердлувального верстату 2М112 з встановленою на ньому електроерозійною головкою.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК

3.1. Визначення технологічних характеристик РОД графітовим ЕІ з використанням електроерозійних головок

Склад робочої рідини суміш мастила індустріального і гасу, матеріал заготовки – сталь45, матеріал ЕІ – графіт МПГ-7, полярності електродів – зворотна, продуктивність обробки, згідно викладеного, є функцією сили струму, напруги, динамічного тиску потоку робочої рідини.

Повний факторний експеримент для двох факторів (k) і трьох рівнів (p) включає себе наступне число експериментів (n): $n=3^2=9$

Межі варіювання факторів і план експерименту представлено в табл. 3.1 і табл. 3.2.

Таблиця 3.1 - Межі варіювання факторів

Фактори	X_{max}	X_{min}	X_0	ΔX
Сила току I, A	200	50	125	75
Статичний тиск P_s, MPa	1,0	0,5	0,75	0,25

Таблиця 3.2 - Матриця планування експерименту

Номер експерименту	$x_1 (I)$	$x_2 (P_s)$	$y_1 (M)$ мм ³ /хв	$y_2 (Ra)$ мкм	$y_3 (\delta)$ мм	$y_4 (\gamma)$ %
1	-	-	525	9	0,14	0,05
2	-	0	427	6,5	0,1	0,09
3	-	+	369	4	0,05	0,15
4	0	-	2075	12	0,17	0,16
5	0	0	1689	10,5	0,12	0,27
6	0	+	1460	9,5	0,07	0,4
7	+	-	3520	17	0,21	0,3
8	+	0	3219	15	0,15	0,63
9	+	+	2534	12,5	0,08	0,8

Продуктивність обробки отворів графітовим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(M) = 1757,556 + 1325,333x_1 - 292,833x_2. \quad (3.1)$$

Математична модель продуктивності процесу має наступний вигляд, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$M = 1,466 \cdot I^{1,419} \cdot P_s^{-0,491}. \quad (3.2)$$

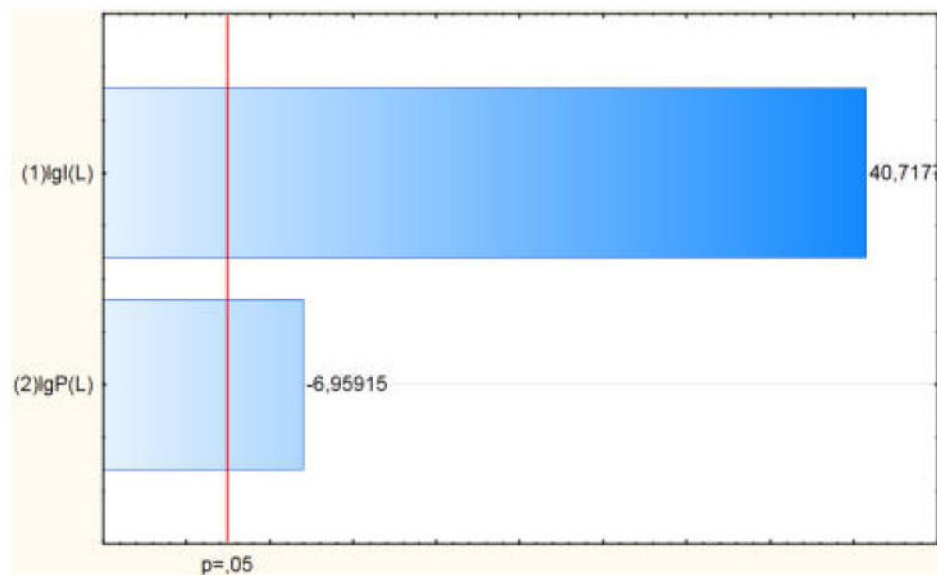


Рис. 3.1. Степінь впливу факторів на продуктивність процесу M

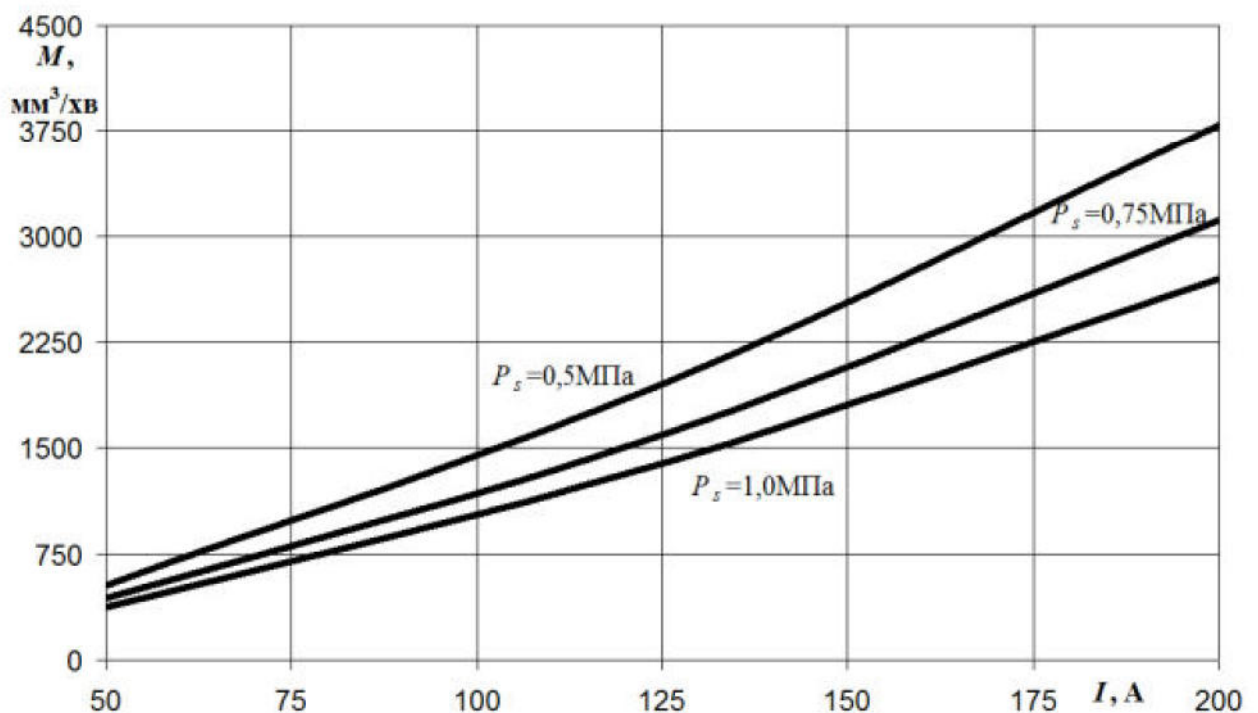


Рис. 3.2. Залежність продуктивності процесу M від I та P_s

На підставі ранжування факторів (рис. 3.1) встановлено, що продуктивність процесу визначається перш за все силою технологічного струму I , другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.3 - ANOVA

ANOVA; Var.:lgM; R-sqr=,9965; Adj.:99533 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0006836 DV: lgM: =Log10(M)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI(L)	1,133304	1	1,133304	1657,934	0,000000
(2)lgP(L)	0,033105	1	0,033105	48,430	0,000437
Error	0,004101	6	0,000684		
Total SS	1,170511	8			

Таблиця 3.4 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgM; R-sqr=,9965; Adj.:99533 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0006836 DV: lgM: =Log10(M)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	3,078855	0,008808	349,5503	0,000000	3,057303	3,100408	3,078855	0,008808	3,057303	3,100408
(1)lgI(L)	0,854580	0,020988	40,7177	0,000000	0,803225	0,905936	0,427290	0,010494	0,401612	0,452968
(2)lgP(L)	-0,147850	0,021245	-6,9591	0,000437	-0,199835	-0,095864	-0,073925	0,010623	-0,099918	-0,047932

Шорсткість поверхні отворів оброблених графітовим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ra) = 10,667 + 4,167x_1 - 2x_2. \quad (3.3)$$

Математична модель шорсткості поверхні отворів має наступний вигляд, мкм:

$$Ra = 1,466 \cdot I^{1,419} \cdot P_s^{-0,491}. \quad (3.4)$$

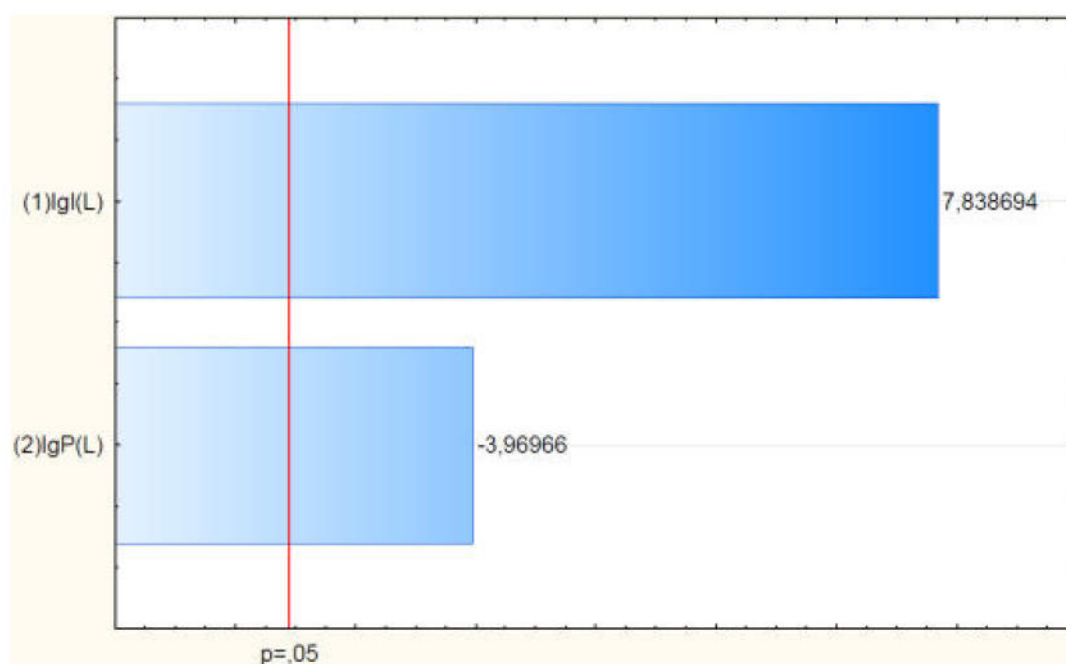


Рис. 3.3. Степінь впливу факторів на шорсткість поверхні Ra

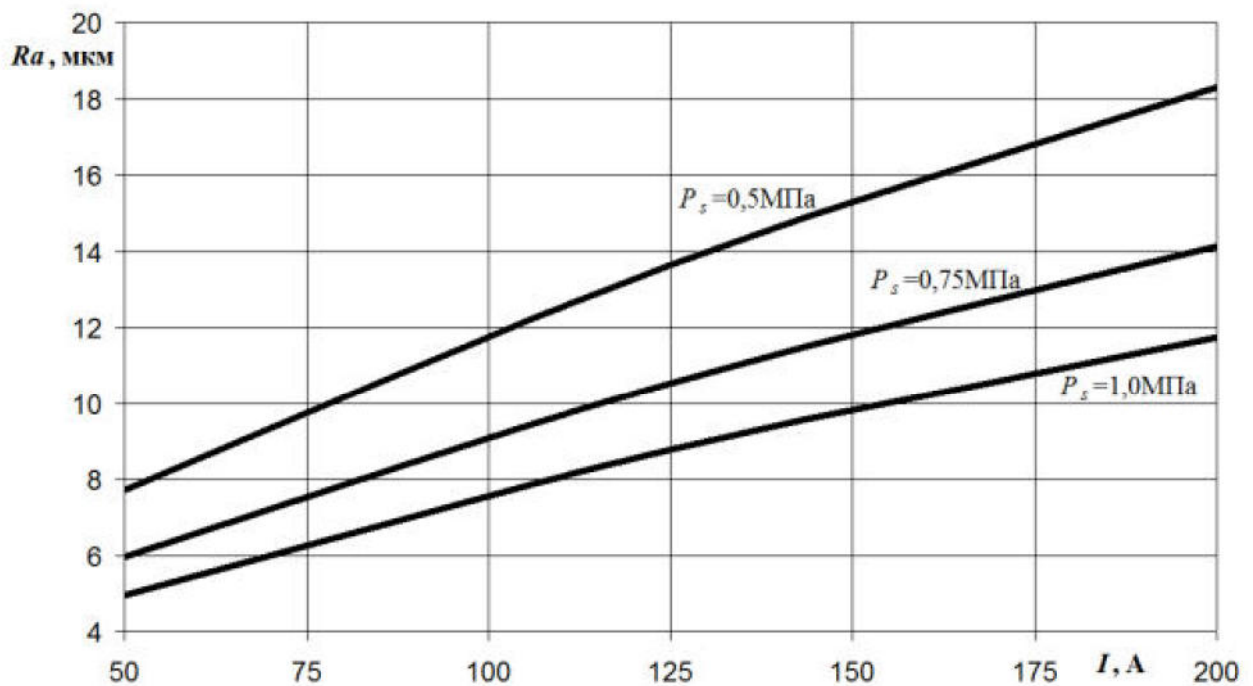


Рис. 3.4. Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від P_s та I

На підставі ранжування факторів (рис.3.3) встановлено, що шорсткість поверхні визначається перш за все силою технологічного струму I , другим по степеню впливу фактором є статичний тиск робочої рідини P_s .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.5 - ANOVA

ANOVA; Var.:lgRa; R-sqr=,92789; Adj.:90385 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0035564 DV: lgRa: =Log10(Ra)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI L	0,218523	1	0,218523	61,44512	0,000228
(2)lgP L	0,056042	1	0,056042	15,75821	0,007370
Error	0,021338	6	0,003556		
Total SS	0,295903	8			

Таблиця 3.6 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgRa; R-sqr=,92789; Adj.:90385 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0035564 DV: lgRa: =Log10(Ra)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,979843	0,020091	48,77102	0,000000	0,930683	1,029003	0,979843	0,020091	0,930683	1,029003
(1)lgI(L)	0,375256	0,047872	7,83869	0,000228	0,258117	0,492395	0,187628	0,023936	0,129058	0,246198
(2)lgP(L)	-0,192368	0,048459	-3,96966	0,007370	-0,310944	-0,073792	-0,096184	0,024230	-0,155472	-0,036896

Об'ємний знос EI при виготовленні отвору графітовим EI

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\gamma) = 0,317 + 0,24x_1 + 0,14x_2. \quad (3.5)$$

Математична модель об'ємного зносу ЕІ при виготовленні отвору має наступний вигляд, %:

$$\gamma = 0,001 \cdot I^{1,285} \cdot P_s^{1,446}. \quad (3.6)$$

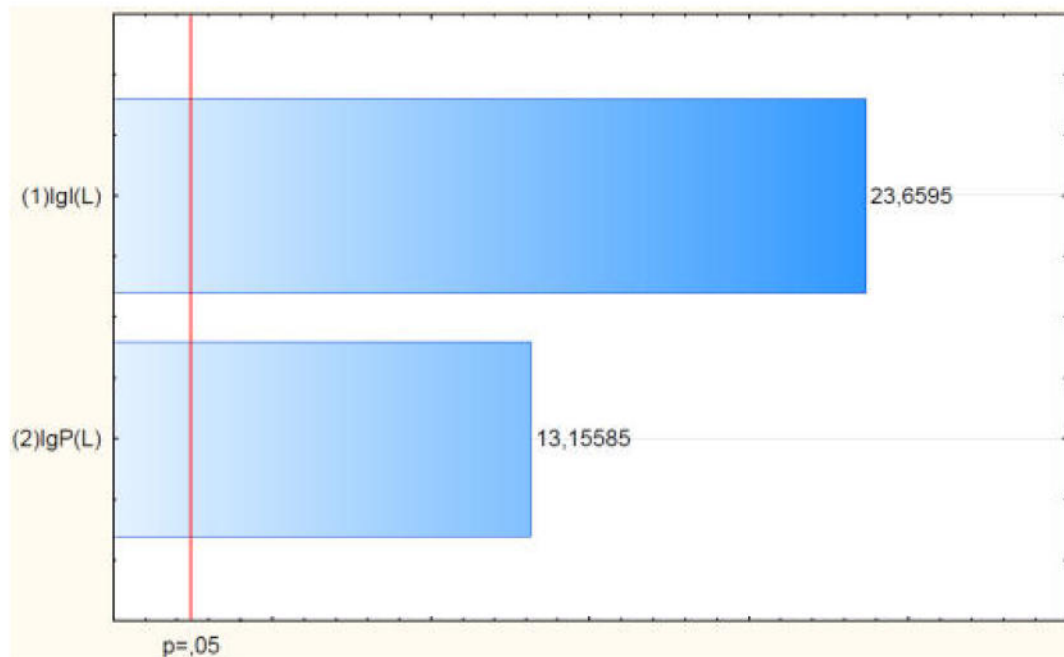


Рис. 3.5. Степінь впливу факторів на об'ємний знос ЕІ γ

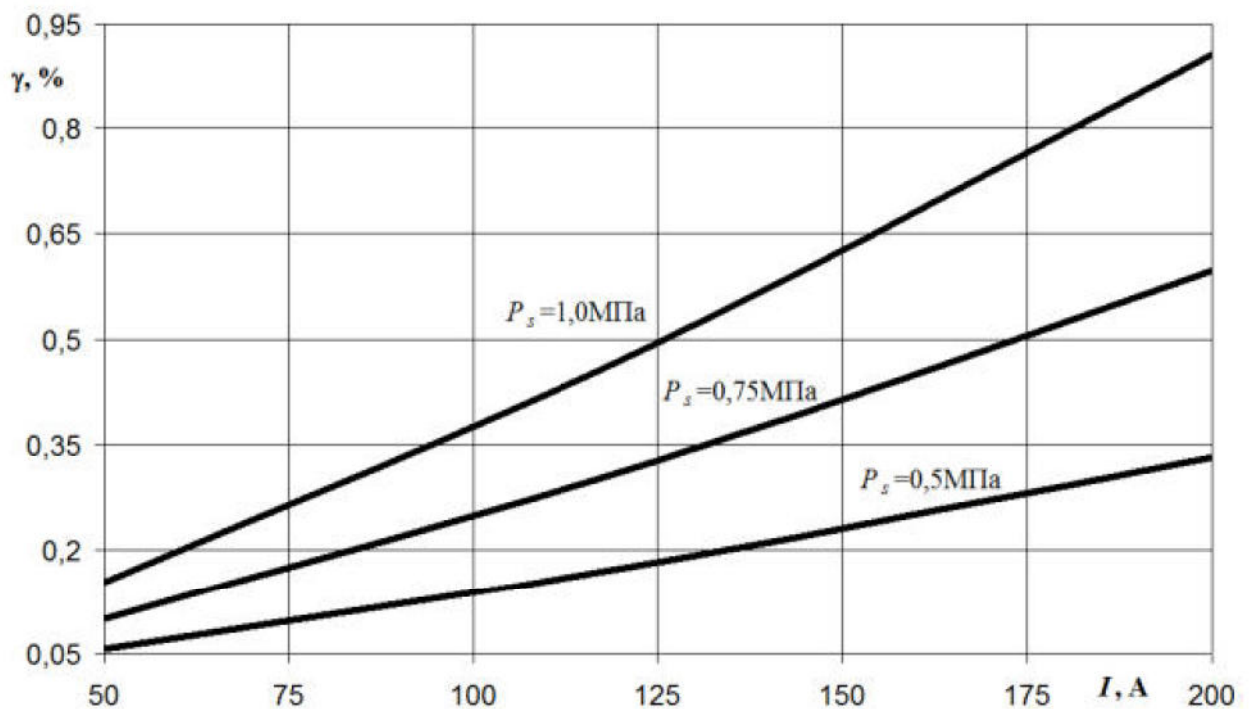


Рис. 3.6. Залежність об'ємного зносу ЕІ γ від P_s та I

На підставі ранжування факторів (рис.3.5) встановлено, що об'ємний знос ЕІ γ визначається перш за все силою технологічного струму I , другим по степеню впливу фактором є статичний тиск робочої рідини P_s .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.7 - ANOVA

ANOVA; Var.:lgγ; R-sqr=,99188; Adj.:98917 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0016581 DV: lgγ: =Log10(γ)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI L	0,928159	1	0,928159	559,7717	0,000000
(2)lgP L	0,286979	1	0,286979	173,0764	0,000012
Error	0,009949	6	0,001658		
Total SS	1,225086	8			

Таблиця 3.8 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgγ; R-sqr=,99188; Adj.:98917 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0016581 DV: lgγ: =Log10(γ)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-0,693113	0,013718	-50,5252	0,000000	-0,726680	-0,659545	-0,693113	0,013718	-0,726680	-0,659545
(1)lgI(L)	0,773376	0,032688	23,6595	0,000000	0,693392	0,853360	0,386688	0,016344	0,346696	0,426680
(2)lgP(L)	0,435310	0,033089	13,1559	0,000012	0,354345	0,516276	0,217655	0,016544	0,177173	0,258138

МЕЗ при виготовленні отворів графітовим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\delta) = 0,121 + 0,025x_1 - 0,053x_2. \quad (3.7)$$

Математична модель МЕЗ при виготовленні отворів має наступний

ВИГЛЯД, мм:

$$\delta = 0,017 \cdot I^{0,301} \cdot P_s^{-1,35}. \quad (3.8)$$

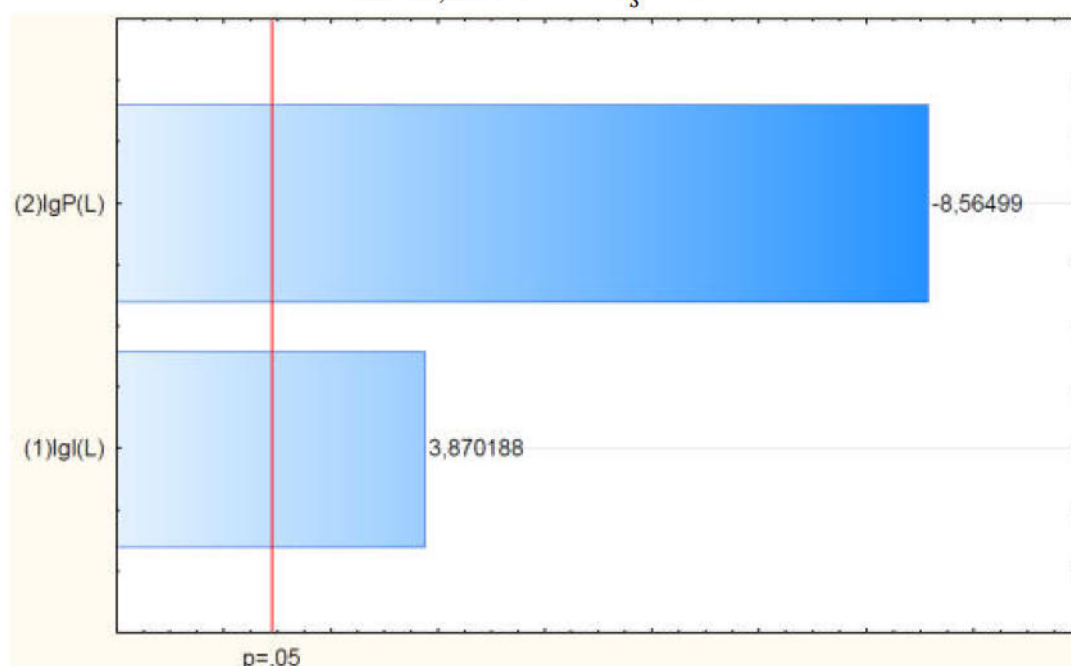


Рис. 3.7. Степінь впливу факторів на МЕЗ δ

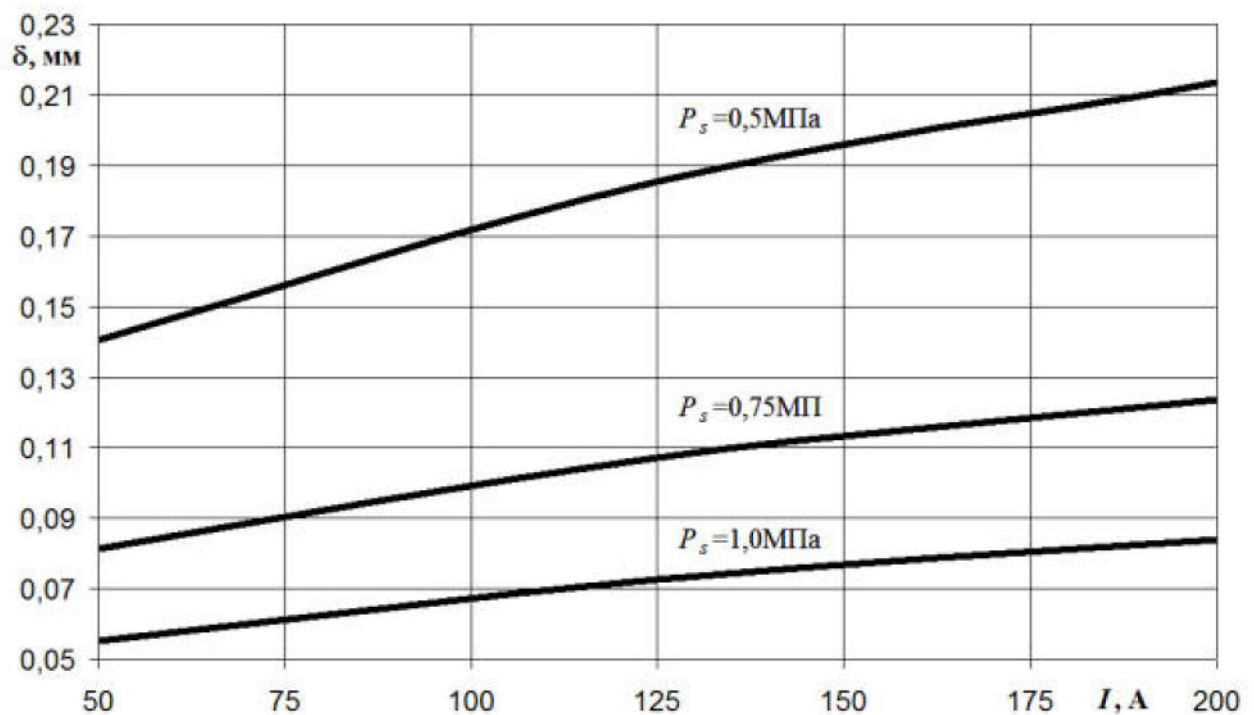


Рис. 3.8. Залежність МЕЗ δ від I та P_s

На підставі ранжування факторів (рис.3.7) встановлено, що МЕЗ δ визначається перш за все статичним тиском робочої рідини P_s , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму I .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.9 - ANOVA

ANOVA; Var.:lg δ ; R-sqr=,9364; Adj.:9152 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0034099 DV: lg δ : =Log10(δ)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI L	0,051075	1	0,051075	14,97835	0,008264
(2)lgP L	0,250147	1	0,250147	73,35908	0,000139
Error	0,020459	6	0,003410		
Total SS	0,321681	8			

Таблиця 3.10 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lg δ ; R-sqr=,9364; Adj.:9152 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0034099 DV: lg δ : =Log10(δ)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-0.953643	0.019673	-48.4758	0.000000	-1.00178	-0.905506	-0.953643	0.019673	-1.00178	-0.905506
(1)lgI(L)	0.181419	0.046876	3.8702	0.008264	0.06672	0.296120	0.090709	0.023438	0.03336	0.148060
(2)lgP(L)	-0.406417	0.047451	-8.5650	0.000139	-0.52253	-0.290309	-0.203209	0.023725	-0.26126	-0.145154

3.2. Визначення технологічних характеристик РОД металевим ЕІ з використанням електроерозійних головок

Склад робочої рідини суміш мастила індустріального і гасу, матеріал заготовки – сталь 45, матеріал ЕІ – сталь 45, полярності електродів – зворотна, продуктивність обробки, згідно викладеного, є функцією сили струму, напруги, динамічного тиску потоку робочої рідини.

Повний факторний експеримент для двох факторів (k) і трьох рівнів (p) включає себе наступне число експериментів (n): $n=3^2=9$

Межі варіювання факторів і план експерименту представлено в табл. 3.11 і табл. 3.12.

Таблиця 3.11 - Межі варіювання факторів

Фактори	X_{max}	X_{min}	X_0	ΔX
Сила току I, A	200	50	125	75
Статичний тиск P_s, MPa	1,0	0,5	0,75	0,25

Таблиця 3.12 - Матриця планування експерименту

Номер експерименту	$x_1 (I)$	$x_2 (P_s)$	$y_1 (M)$ мм ³ /хв	$y_2 (Ra)$ мкм	$y_3 (\delta)$ мм	$y_4 (\gamma)$ %
1	-	-	464	12	0,15	81,7
2	-	0	331	8	0,12	79,3
3	-	+	251	5,5	0,06	77,7
4	0	-	1806	18	0,19	83,4
5	0	0	1289	12,5	0,14	80,9
6	0	+	978	9	0,08	79,3
7	+	-	3200	22	0,24	84,2
8	+	0	2354	16	0,18	81,8
9	+	+	1966	11	0,1	80,1

Продуктивність обробки отворів металевим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(M) = 1404,333 + 1079x_1 - 379,167x_2. \quad (3.9)$$

Математична модель продуктивності процесу має наступний вигляд, мм³/хв:

$$M = 0,939 \cdot I^{1,544} \cdot P_s^{-0,824}. \quad (3.10)$$

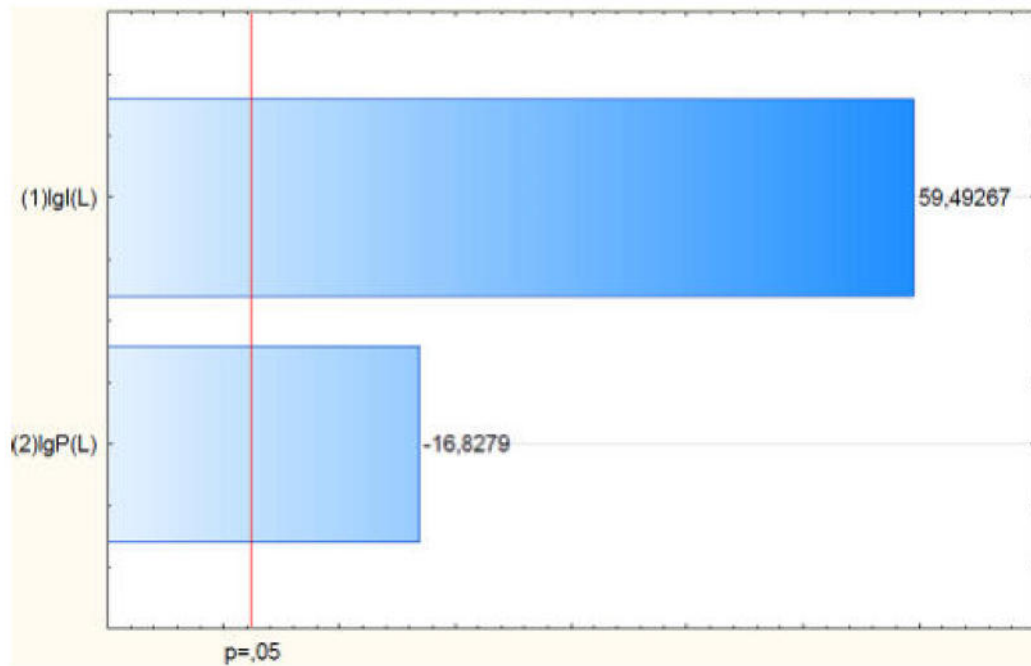


Рис. 3.9. Степінь впливу факторів на продуктивність процесу M

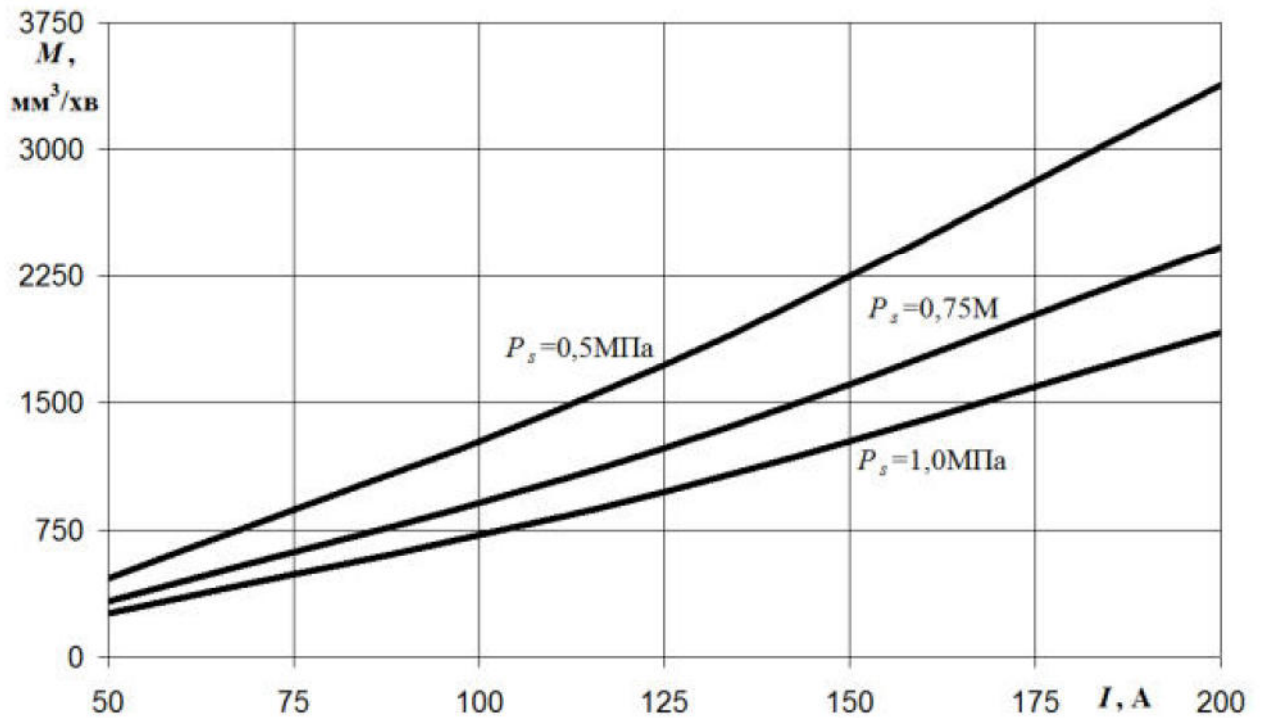


Рис. 3.10. Залежність продуктивності процесу M від I та P_s

На підставі ранжування факторів (рис. 3.9) встановлено, що продуктивність процесу визначається перш за все силою технологічного струму I , другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.13 - ANOVA

ANOVA; Var.:lgM; R-sqr=,99843; Adj.:99791 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003287 DV: lgM: =Log10(M)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI L	1,163431	1	1,163431	3539,378	0,000000
(2)lgP L	0,093084	1	0,093084	283,179	0,000003
Error	0,001972	6	0,000329		
Total SS	1,258487	8			

Таблиця 3.14 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgM; R-sqr=,99843; Adj.:99791 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003287 DV: lgM: =Log10(M)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	2,973216	0,006108	486,7764	0,000000	2,958270	2,988161	2,973216	0,006108	2,958270	2,988161
(1)lgI(L)	0,865864	0,014554	59,4927	0,000000	0,830252	0,901477	0,432932	0,007277	0,415126	0,450738
(2)lgP(L)	-0,247920	0,014733	-16,8279	0,000003	-0,283970	-0,211870	-0,123960	0,007366	-0,141985	-0,105935

Шорсткість поверхні отворів оброблених металевим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ra) = 12,667 + 3,917x_1 - 4,417x_2. \quad (3.11)$$

Математична модель шорсткості поверхні отворів має наступний

вигляд, МКМ:

$$Ra = 0,882 \cdot I^{0,48} \cdot P_s^{-1,032}. \quad (3.12)$$

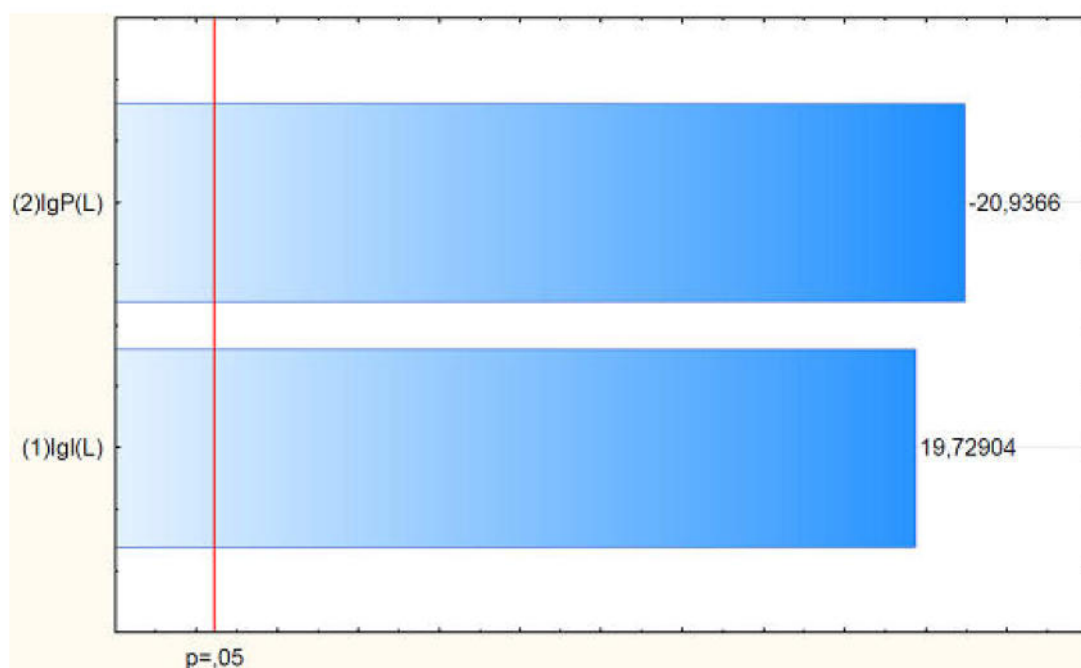


Рис. 3.11. Степінь впливу факторів на шорсткість поверхні Ra

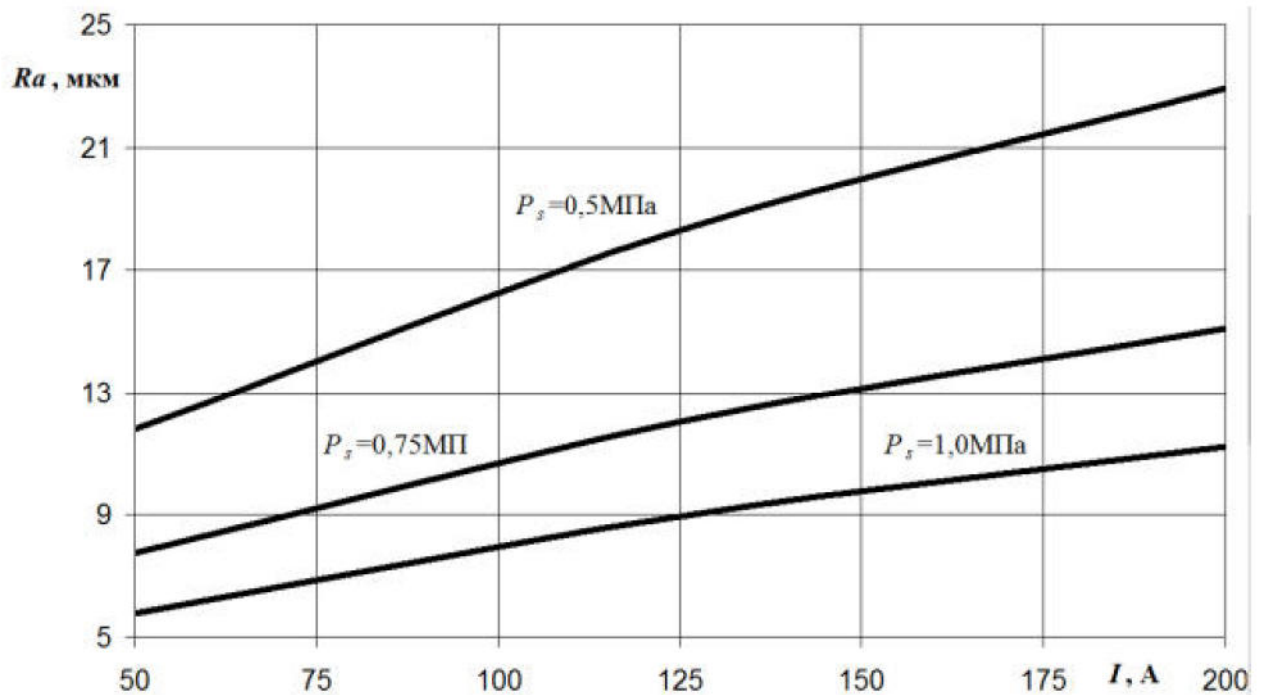


Рис. 3.12. Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від P_s та I

На підставі ранжування факторів (рис.3.11) встановлено, що шорсткість поверхні визначається перш за все статичним тиском робочої рідини P_s , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму I .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.15 - ANOVA

ANOVA; Var.:lgRa; R-sqr=,9928; Adj.:,9904 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003336 DV: lgRa: =Log10(Ra)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI L	0,129837	1	0,129837	389,2350	0,000001
(2)lgP L	0,146217	1	0,146217	438,3397	0,000001
Error	0,002001	6	0,000334		
Total SS	0,278056	8			

Таблиця 3.16 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgRa; R-sqr=,9928; Adj.:,9904 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003336 DV: lgRa: =Log10(Ra)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	1,061835	0,006153	172,5732	0,000000	1,046779	1,076891	1,061835	0,006153	1,046779	1,076891
(1)lgI(L)	0,289254	0,014661	19,7290	0,000001	0,253379	0,325129	0,144627	0,007331	0,126689	0,162564
(2)lgP(L)	-0,310723	0,014841	-20,9366	0,000001	-0,347038	-0,274408	-0,155362	0,007421	-0,173519	-0,137204

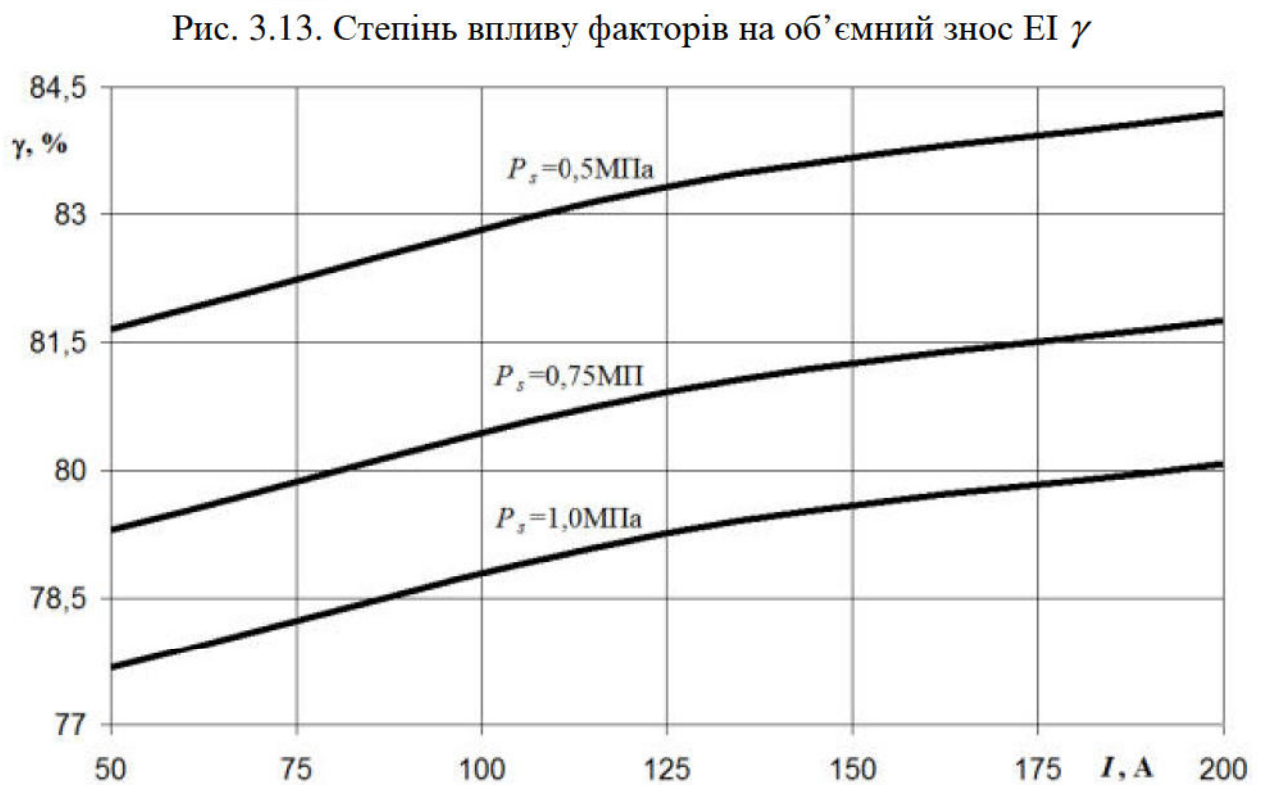
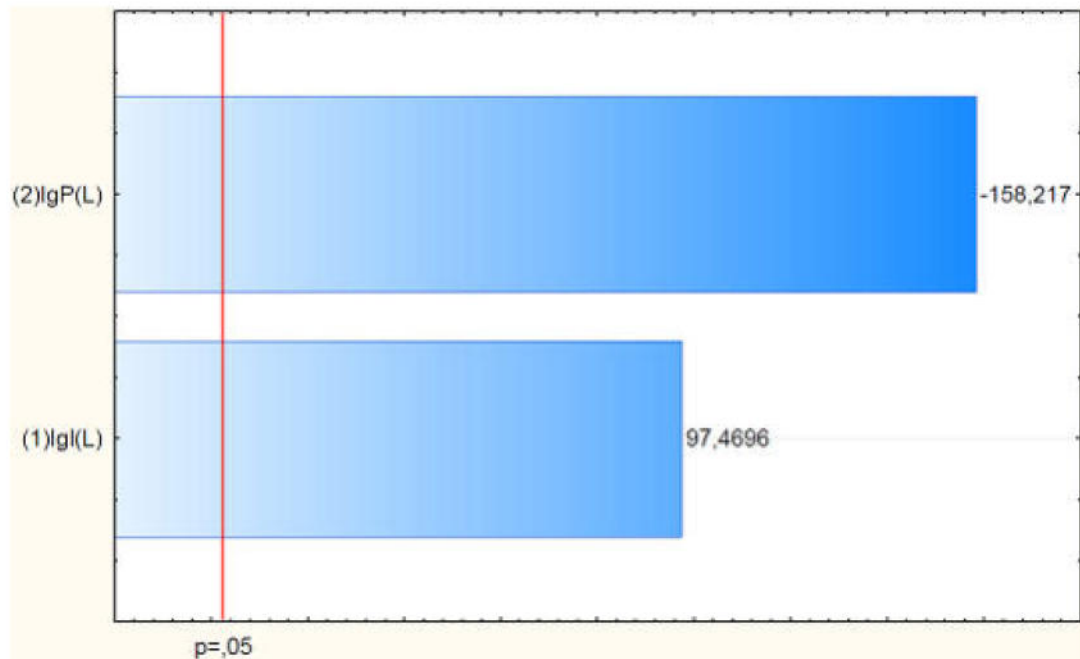
Об'ємний знос EI при виготовленні отвору металевим EI

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\gamma) = 80,933 + 1,233x_1 - 2,033x_2. \quad (3.13)$$

Математична модель об'ємного зносу ЕІ при виготовленні отвору має наступний вигляд, %:

$$\gamma = 71,27 \cdot I^{0,022} \cdot P_s^{-0,072} \quad (3.14)$$



На підставі ранжування факторів (рис.3.13) встановлено, що об'ємний знос ЕІ γ визначається перш за все статичним тиском робочої рідини P_s , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму I .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.17 - ANOVA

ANOVA; Var.:lgy; R-sqr=,99983; Adj.:99977 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=0 DV: lgy: =Log10(y)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgl L	0,000273	1	0,000273	9500,32	0,000000
(2)lgP L	0,000720	1	0,000720	25032,56	0,000000
Error	0,000000	6	0,000000		
Total SS	0,000994	8			

Таблиця 3.18 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgy; R-sqr=,99983; Adj.:99977 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=0 DV: lgy: =Log10(y)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	1,907906	0,000057	33385,11	0,000000	1,907766	1,908046	1,907906	0,000057	1,907766	1,908046
(1)lgl(L)	0,013273	0,000136	97,47	0,000000	0,012940	0,013606	0,006636	0,000068	0,006470	0,006803
(2)lgP(L)	-0,021809	0,000138	-158,22	0,000000	-0,022147	-0,021472	-0,010905	0,000069	-0,011073	-0,010736

МЕЗ при виготовленні отворів металевим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\delta) = 0,14 + 0,032x_1 - 0,057x_2. \quad (3.15)$$

Математична модель МЕЗ при виготовленні отворів має наступний вигляд, мм:

$$\delta = 0,019 \cdot I^{0,022} \cdot P_s^{-0,072}. \quad (3.16)$$

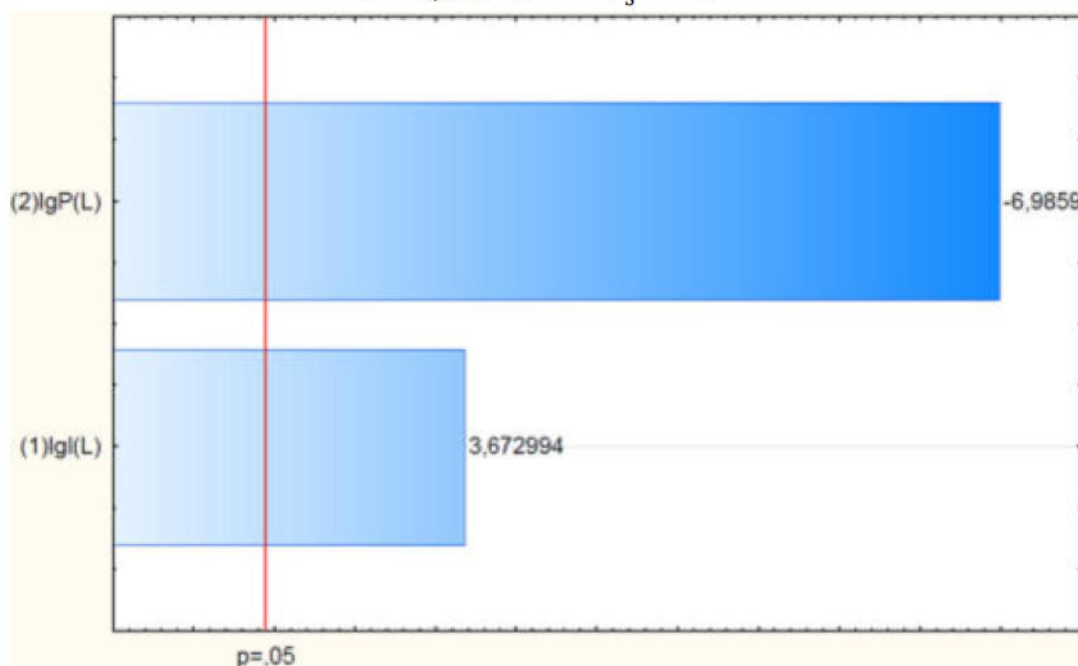


Рис. 3.15. Степінь впливу факторів на МЕЗ δ

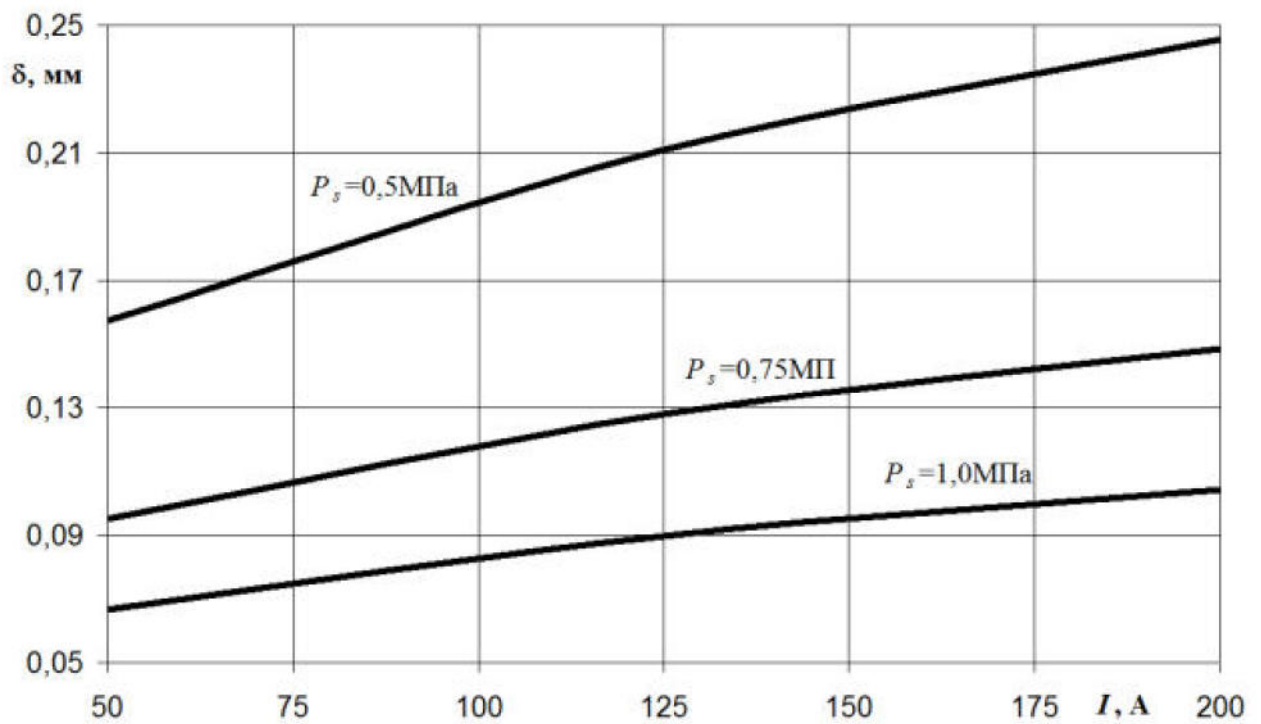


Рис. 3.16. Залежність МЕЗ δ від I та P_s

На підставі ранжування факторів (рис.3.15) встановлено, що МЕЗ δ визначається перш за все статичним тиском робочої рідини P_s , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму I .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.19 – ANOVA

ANOVA; Var.:lgδ; R-sqr=,91215; Adj:,88286 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0043085 DV: lgδ: =Log10(δ)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI L	0,058126	1	0,058126	13,49088	0,010417
(2)lgP L	0,210272	1	0,210272	48,80374	0,000428
Error	0,025851	6	0,004309		
Total SS	0,294249	8			

Таблиця 3.20 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgδ; R-sqr=,91215; Adj:,88286 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0043085 DV: lgδ: =Log10(δ)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-0,889067	0,022113	-40,2050	0,000000	-0,943176	-0,834958	-0,889067	0,022113	-0,943176	-0,834958
(1)lgI(L)	0,193537	0,052692	3,6730	0,010417	0,064605	0,322469	0,096769	0,026346	0,032302	0,161235
(2)lgP(L)	-0,372619	0,053338	-6,9860	0,000428	-0,503133	-0,242105	-0,186310	0,026669	-0,251567	-0,121053

3.3. Висновки

3.3.1. Теоретично і експериментально досліджено, обґрунтовано і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу: продуктивності процесу обробки отворів, шорсткості обробленої поверхні отворів, точності розмірів отворів, стійкості ЕІ. Досліджено і описано технологічні характеристики процесу. Залежно від режиму обробки графітовим ЕІ продуктивність при виготовленні отворів складає 375...3800 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 4,9...18,3 мкм; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах 0,05...0,9 %, міжелектродний зазор в межах 0,05...0,2 мм.

3.3.2. Теоретично і експериментально досліджено, обґрунтовано і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу: продуктивності процесу обробки отворів, шорсткості обробленої поверхні отворів, точності розмірів отворів, стійкості ЕІ. Досліджено і описано технологічні характеристики процесу. Залежно від режиму обробки сталевим ЕІ продуктивність при виготовленні отворів складає 260...3400 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 5,7...23 мкм; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах 77...84 %, міжелектродний зазор в межах 0,07...0,25 мм.

Розділ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОД

З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК

4.1. Станція робочої рідини

Відома станція робочої рідини до настільного свердлувального верстату для РОД з використанням електроерозійних головок має компоновку, що зображено на рис. 4.1.

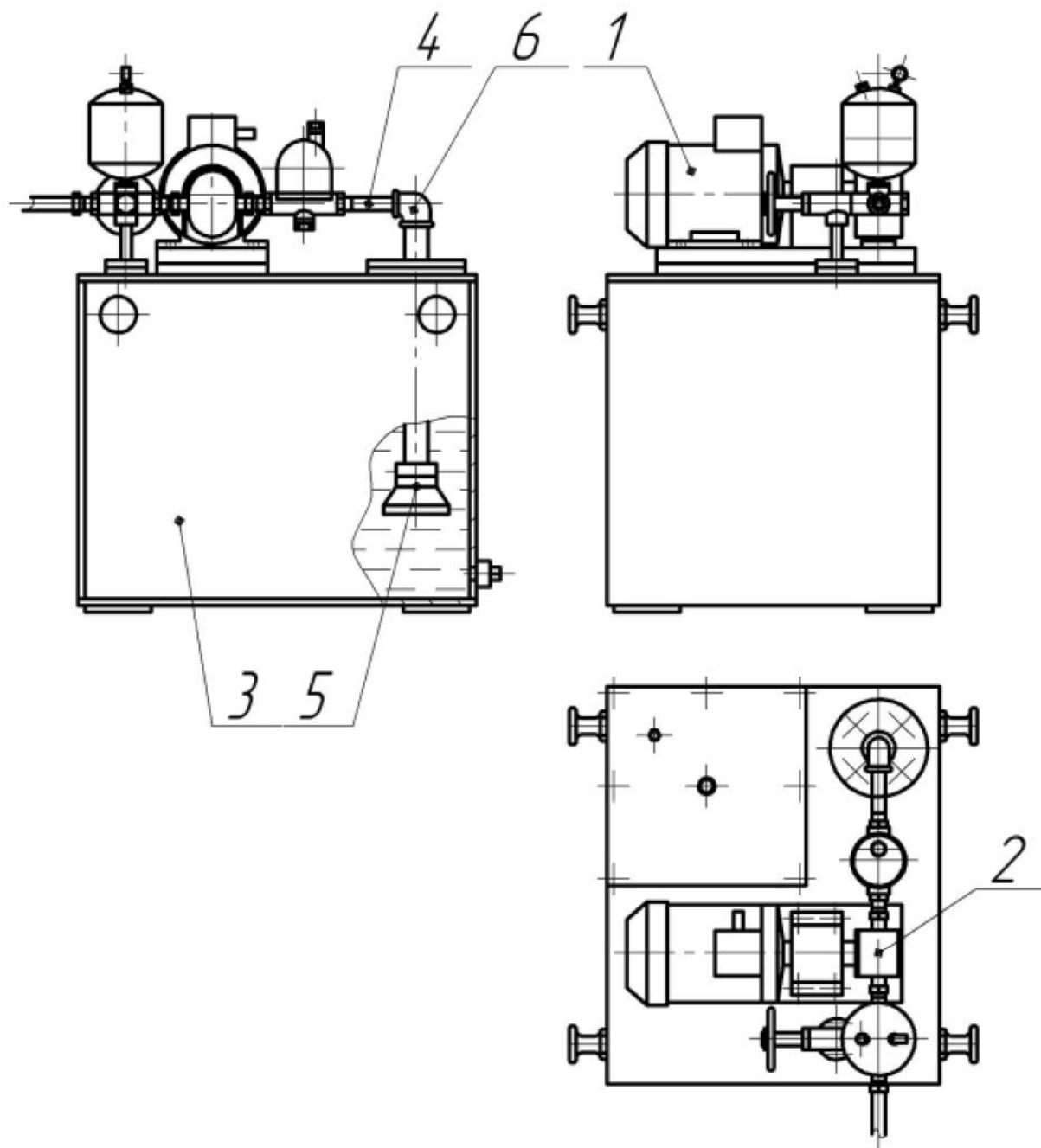


Рис. 4.1. Станція робочої рідини до електроерозійної головки

В такій станції електродвигун 1 і шестеренний насос 2 встановлені зверху гідробака 3 з робочою рідиною. При цьому конструктивно виникає потреба в довгому трубопроводі для всмоктування робочої рідини 4, який з'єднують з сітчастим фільтром 5. До того ж для повороту трубопроводу в низ на ньому встановлено відвід різьбовий 90 градусів.

Зазначені конструктивні особливості станції робочої рідини призводять до появи значних гідродинамічних опорів в середині всмоктуючого трубопроводу [16], що призводить до створення несприятливих умов роботи насоса, як наслідок знижується його продуктивність. На практиці виявлено, що реальна продуктивність насоса, при такій компоновці станції робочої рідини, знижується в 3-4 рази. Таке зниження продуктивності істотно впливає на стійкість процесу РОД в наслідок недостатньої витрати рідини в міжелектродному зазорі, а також суттєво впливає на роботу допоміжних гідравлічних систем установки.

Згідно вимог до монтажу шестеренних насосів всмоктувальна гідролінія повинна забезпечувати швидкість течії рідини на вході в насос не більше 1,5 м/с і бути по можливості короткою, з мінімальною кількістю згинів. Рівень робочої рідини в гідробаку повинен бути вищим за вхідний отвір насоса на 150 мм. Бажано мати бак закритого типу з надлишковим тиском 0,02 МПа [17].

З зазначеного можна зробити висновок, що для оптимальних умов роботи насоса його необхідно встановити на рівні дна гідробака.

Після перенесення насоса в нижню частину гідробака (рис. 4.2) продуктивність насоса збільшилась до його паспортних характеристик. Це пояснюється тим, що по трубопроводу всмоктування робочої рідини значно знижені місцеві опори течії рідини за рахунок зменшення довжини трубопроводу і відсутності відводу різьбового 90 градусів. Окрім того, в станції робочої рідини зображеній на рис. 4.1 робоча рідина потрапляє в насос за рахунок всмоктування, а при розміщенні насоса в низу гідробака, як показано на рис. 4.2, робоча рідина потрапляє в насос самоплином під

невеликим надлишковим тиском за рахунок розташування його нижче рівня робочої рідини в гідробаці, що рекомендується виробниками насосів.

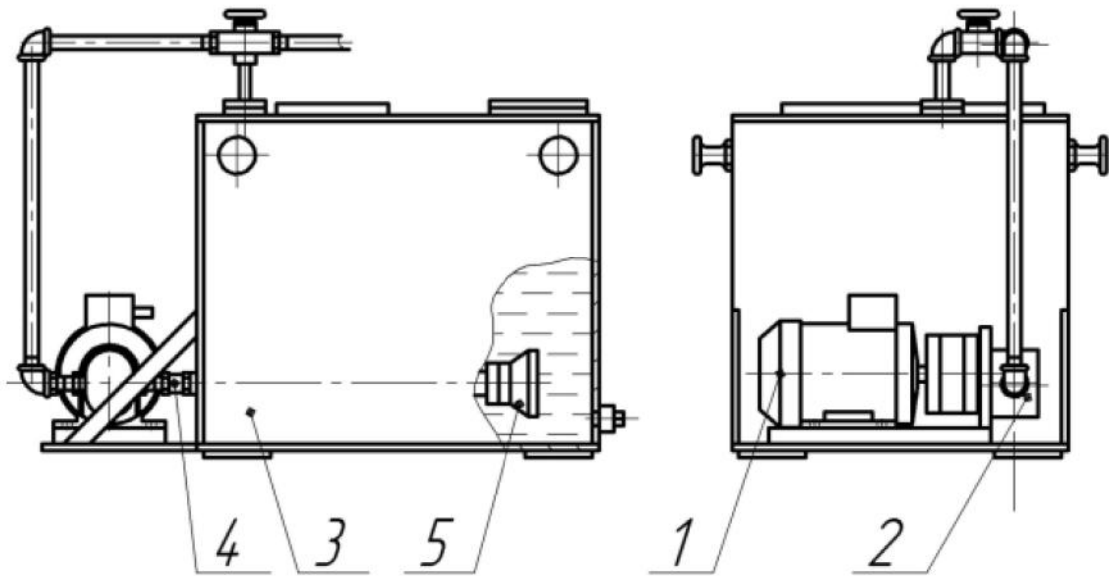


Рис. 4.2. Станція робочої рідини до електроерозійної головки з нижнім розташуванням насоса

Вдосконалена конструкція станція робочої рідини для подальшого комерційного використання у складі обладнання для РОД з використання електроерозійних головок не є оптимальною. Так як ця станція робочої рідини пропонується для використання у поєднання з настільним свердлувальним верстатом, який зазвичай на підприємствах встановлюють на підставку або спеціальну тумбу (як наприклад рис. 4.3), необхідно буде збільшити площу під установку більше ніж у двічі.



Рис. 4.3. Настільний свердлувальний станок встановлений на тумбу

Для комерційного використання і економії необхідної площі під обладнання пропонуємо станцію робочої рідини виготовляти у формі тумби (рис. 4.4) для встановлення на неї настільного свердлувального верстату.

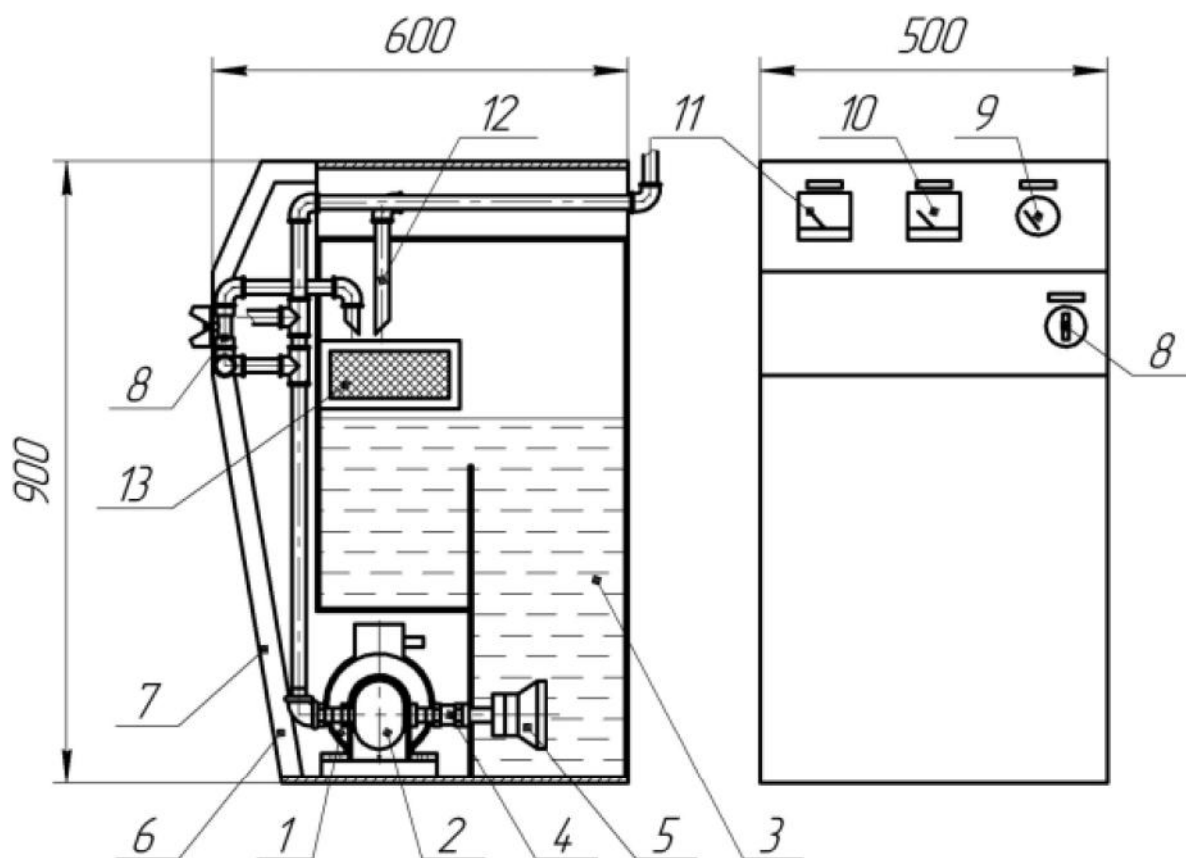


Рис. 4.4. Запропонована станція робочої рідини

Запропонована станція робочої рідини має таку конструкцію. Каркас 6 станції робочої рідини виготовляють з сортового прокату у вигляді кутика, зовні каркас обшивають, наприклад, листовим металом. В середину каркаса монтують електродвигун 1 з шестеренний насос 2, а також гідробак 3, що має в нижній частині різьбовий отвір для під'єднання всмоктувального трубопровода 4 на який встановлено фільтруючий елемент 5. При увімкненні електродвигуна робоча рідина з насоса під тиском подається по напірному трубопроводу 7 до електроерозійної головки і допоміжних гідравлічних систем установки. На зовнішній панелі керування станції робочої рідини встановлено вентиль 8 для регулювання тиску робочої рідини в напірному трубопроводі.

Для візуального контролю величини тиску робочої рідини на контрольній панелі станції робочої рідини встановлюють манометр 9. Для контролю напруги та сили технологічного струму дуги на панелі встановлюють показники величини напруги 10 і струму 11.

Відпрацьована робоча рідина разом з продуктами ерозії по трубопроводу 12 потрапляє назад у бак через фільтруючий елемент 13.

Для регулювання різних допоміжних гідравлічних систем установки, за вимогою замовника, на зовнішній панелі керування можуть встановлюватись додаткові елементи керування та прилади візуального контролю.

4.2. Висновки

4.2.1. Удосконалено існуючу конструкцію станції робочої рідини для РОД з використанням електроерозійних головок, що дозволяє забезпечити необхідну продуктивність насоса.

4.2.2. Запропоновано конструкцію станції робочої рідини, яка має форму тумби для встановлення на неї настільного свердлувального верстату, що дозволяє значно зменшити розміри установки для РОД з використанням електроерозійних головок.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК

Розрахунок економічної ефективності РОД спряжених пар виконується за умов виготовлення спряженої пари з шліцьовим з'єднанням 6×26×30×6. Довжина шліцьової частини стержня 40мм, довжина шліцьової отвору 10мм. При цьому при розрахунку будуть враховуватись лише відмінні операції в базовому і проектному варіанті.

Розрахунок очікуваного річного економічного ефекту від впровадження у виробництво способу РОД з використанням електроерозійних головок базується на наступних умовах:

- за базовий варіант прийнято найбільш розповсюджений метод виготовлення валу методами механічної обробки. Для зовнішньої поверхні стержня фрезерна обробка шліців на універсально фрезерному верстаті кінцевою модульною фрезою і внутрішньої поверхні деталі з отвором на довбальному верстаті. Час виконання зазначених операцій згідно норм штучного часу складає для фрезерної операції 13,8 хв, для довбальної операції 40 хв. Середня продуктивність для фрезерувальної операції $M_{\text{баз}(c)} = 390 \text{ мм}^3/\text{хв.}$, для довбальної операції $M_{\text{баз}(o)} = 18,23 \text{ мм}^3/\text{хв.}$;

- за проектний варіант обробку здійснюють розмірною обробкою електричною дугою з використанням електроерозійної головки з середньою продуктивністю обробки стержня $M_{np(c)} = 1450 \text{ мм}^3/\text{хв.}$, що відповідає силі технологічного струму $I = 50 \text{ А}$ і статичному тиску робочої рідини $P_s = 1 \text{ МПа}$, та середньою продуктивністю обробки отвору металевим електродом $M_{np(c)} = 250 \text{ мм}^3/\text{хв.}$, що відповідає силі технологічного струму $I = 50 \text{ А}$ і статичному тиску робочої рідини $P_s = 1 \text{ МПа.}$;

- річний об'єм виробництва шліцьових з'єднань способами механічної обробки становить 18 500 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	
				базовий	проектний
1	Річна програма випуску	n	шт/рік	18500	18500
2	Середня трудомісткість обробки	t	хв/шт		
	- стержень			13,8	3,7
	- отвір			40	2,9
	Середня трудомісткість обробки	t	год/шт		
	- стержень			0,230	0,062
	- отвір			0,667	0,048
3	Вартість обробки одного шліцьового з'єднання	T	грн/шт	60	40
4	Дійсний фонд часу обладнання при однозмінній роботі	F	год	2008	2008
5	Вартість обладнання	K	грн	185550+800000	158000
6	Виробнича площа, що займає одиниця обладнання	S	м ²	1,527+2,413	2,5
7	Коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу на одну одиницю обладнання	κ_{∂}	-	1,1	1,1
8	Вартість 1 м ² виробничої площі	Π_n	грн/м ²	4500	4500
9	Сумарна потужність двигунів та джерел живлення	N	кВт	4+3,7=7,7	25+1,5=26,5
10	Коефіцієнт використання потужності обладнання	κ_n	-	0,9	0,7
11	Вартість однієї кВт/год електроенергії	Π_e	грн	1,81	1,81
12	Річна норма амортизаційних відрахувань	a_a	%	11,48	11,48
13	Річна норма відрахувань на утримання та поточний ремонт обладнання	a_y	%	3,64	3,64
14	Річна норма відрахувань на ремонт, амортизацію та утримання виробничої площі	a_n	%	2,4	2,4
15	Коефіцієнт, що ураховує додаткову заробітну плату	$K_{\partial z}$	-	1,089	1,089
16	Коефіцієнт завантаження обладнання	κ_{zo}	-	0,75	0,75
17	Сума витрат на НДР	$E_{НДР}$	грн	-	120 000

Для розрахунку суми капітальних вкладень необхідно визначити: розрахункову та прийняту кількість потрібного обладнання для обробки шліцьових з'єднань за програмою n ; вартість всього обладнання $K_{об}$; вартість виробничих приміщень $K_{вп}$. Дані розрахунки наведено нижче в табл. 5.2

Таблиця 5.2 - Розрахунок суми капітальних вкладень у виробництво

№ п п	Найменування показників	Умовн і познач .	Одиниц і виміру	Варіанти		Формули, розрахунок
				Базовий	Проектни й	
1	Розрахунков а кількість обладнання	H_p^c H_p^o	шт	2,119 6,145	0,571 0,442	$H_p = \frac{n \cdot t}{F}$ $H_{p(\bar{o})}^c = \frac{18500 \cdot 0,23}{2008} = 2,119$ $H_{p(\bar{o})}^o = \frac{18500 \cdot 0,667}{2008} = 6,145$ $H_{p(n)}^c = \frac{18500 \cdot 0,062}{2008} = 0,571$ $H_{p(n)}^o = \frac{18500 \cdot 0,048}{2008} = 0,442$
2	Прийнята кількість обладнання	H_n^c H_n^o	шт	3 7	1 1	-
3	Вартість всього обладнання	$K_{об}$	грн	6 156 650	316 000	$K_{об} = K \cdot H_n$ $K_{об(\bar{o})} = 185\,550 \cdot 3 + 800\,000 \cdot 7 =$ $= 6\,156\,650$ $K_{об(n)} = 158\,000 \cdot 1 + 158\,000 \cdot 1 = 316\,000$
4	Вартість виробничих приміщень	$K_{ен}$	грн	106 286,4	24 750	$K_{ен} = S \cdot \kappa_{\partial} \cdot H_n \cdot \Pi_n$ $K_{ен(\bar{o})} = (1,527 \cdot 3 + 2,413 \cdot 7) 1,1 \cdot 4500 =$ $= 106\,286,4$ $K_{ен(n)} = (2,5 \cdot 1 + 2,5 \cdot 1) \cdot 1,1 \cdot 4500 = 24\,750$
5	Загальна сума капітальних вкладень	$K_{кв}$	грн	6 262 936, 4	340 750	$K_{кв} = K_{об} + K_{ен}$ $K_{кв(\bar{o})} = 6\,156\,650 + 106\,286,4 = 6\,262\,936,4$ $K_{кв(n)} = 316\,000 + 24\,750 = 340\,750$

Для подальшого розрахунку собівартості одиниці продукції попередньо треба визначитися: з заробітною платою C_{zn} ; амортизацією, утриманням та ремонтом обладнання $C_{ам}$; вартістю електроенергії C_e ; ремонтом та

утриманням виробничою площею $C_{пл}$. Дані показники є складовими частинами собівартості одиниці продукції, розрахунок якої наведено у 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 одного робітника	$C_{зн}$	грн	1 208 790	805 860	$C_{зн} = n \cdot T \cdot K_{\partial з}$ $C_{зн(б)} = 18\,500 \cdot 60 \cdot 1,089 = 1\,208\,790$ $C_{зн(п)} = 18\,500 \cdot 40 \cdot 1,089 = 805\,860$
2	Амортизація, утримання та ремонт обладнання	$C_{ам}$	грн	930 885,48	47 779,2	$C_{ам} = \frac{K \cdot H_n \cdot (a_a + a_y)}{100}$ $C_{ам(б)} = \frac{(185\,550 \cdot 3 + 800\,000 \cdot 7) \cdot (11,48 + 3,64)}{100} =$ $= 930\,885,48$ $C_{ам(п)} = \frac{(158\,000 \cdot 1 + 158\,000 \cdot 1) \cdot (11,48 + 3,64)}{100} = 47\,779,2$
3	Вартість електро- енергії	C_e	грн	95 923,01	202 258,81	$C_e = N \cdot \kappa_n \cdot F \cdot H_n \cdot \Pi_e \cdot \kappa_{зо}$ $C_{e(б)} = (3,7 \cdot 3 + 4 \cdot 7) \cdot 0,9 \cdot 2\,008 \cdot 1,81 \cdot 0,75 = 95\,923,01$ $C_{e(п)} = (26,5 \cdot 1 + 26,5 \cdot 1) \cdot 0,7 \cdot 2\,008 \cdot 1,81 \cdot 0,75 = 202\,258,81$
4	Ремонт та утримання виробничої площі	$C_{пл}$	грн	2550,87	594	$C_{пл} = \frac{S \cdot \kappa_{\partial} \cdot H_n \cdot \Pi_n \cdot a_n}{100}$ $C_{пл(б)} = \frac{(1,527 \cdot 3 + 2,413 \cdot 7) \cdot 1,1 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 2\,550,87$ $C_{пл(п)} = \frac{(2,5 \cdot 1 + 2,5 \cdot 1) \cdot 1,1 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 594$
5	Собівартість випуску продукції	C	грн	13 117 149,36	1 880 352,01	$C = C_{зн} + C_{ам} + C_e + C_{пл}$ $C_{(б)} = 10 \cdot 1\,208\,790 + 930\,885,48 + 95\,923,01 + 2\,550,87 =$ $= 13\,117\,149,36$ $C_{(п)} = 2 \cdot 805\,860 + 47\,779,2 + 220\,258,81 + 594 = 1\,880\,352,01$

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження у виробництво способу РОД з використанням електроерозійних головок визначаємо за формулою, грн

$$E_p = [C_{(\delta)} - C_{(n)}] + E_n [K_{кв(\delta)} - K_{кв(n)}] = \\ = (13\,117\,149,36 - 1\,880\,352,01) + 0,15(6\,262\,936,4 - 340\,750) = 12\,125\,125,31.$$

При цьому коефіцієнт ефективності НДР:

$$K_{ef} = \frac{E_p}{E_{НДР}} = \frac{12\,125\,125,31}{120\,000} = 101,04.$$

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Показано, що спосіб РОД з використанням електроерозійних головок для виготовлення деталей складного профілю, зокрема спряжених пар, забезпечує необхідну якість і продуктивність обробки та можливість отримання готових, що не потребують слюсарної доводки, спряжених пар, забезпечує необхідну якість і точність обробки і тому є високоефективною альтернативою традиційним технологіям.

2. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень РОД з використанням електроерозійних головок.

3. Теоретичні дослідження виконано на основі теорії електроерозійної обробки, теорії математичного планування експерименту та засобів математичного моделювання.

4. Отримано математичну модель продуктивності M процесу РОД з використанням ЕЕГ при обробці графітовим ЕІ. Показано, що найбільш впливовим фактором на продуктивність M є сила технологічного струму I із підвищенням якої продуктивність збільшується.

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I а також при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s продуктивність M процесу РОД збільшується (зменшується). Встановлено, що в діапазоні варіювання факторів в рамках експерименту продуктивність M процесу РОД змінюється в межах від 375 до 3800 мм³/хв.

5. Отримано математичну модель шорсткості поверхні Ra при обробці графітовим ЕІ. Показано, що найбільш впливовим фактором на шорсткість поверхні Ra є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I , а також при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s шорсткість поверхні отвору Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткість поверхні отвору Ra змінюється в межах від 4,9 до 18,3 мкм.

6. Отримано математичну модель міжелектродного зазору між ЕІ та заготовкою δ при обробці графітовим ЕІ. Показано, що найбільш впливовим

фактором на міжелектродний зазор між ЕІ та заготовкою δ статичний тиск робочої рідини P_s .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I , а також при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s міжелектродний зазор δ збільшується (зменшується). В рамках експерименту міжелектродний зазор δ змінюється в межах від 0,05 до 0,2 мм.

7. Отримано математичну модель об'ємного зносу ЕІ γ при обробці графітовим ЕІ. Показано, що найбільш впливовим фактором на знос ЕІ γ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s знос ЕІ γ збільшується (зменшується). В рамках експерименту знос ЕІ γ змінюється в межах від 0,05 до 0,9%.

8. Отримано математичну модель продуктивності M процесу РОД з використанням ЕЕГ при обробці металевим ЕІ. Показано, що найбільш впливовим фактором на продуктивність M є сила технологічного струму I із підвищенням якої продуктивність збільшується.

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I а також при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s продуктивність M процесу РОД збільшується (зменшується). Встановлено, що в діапазоні варіювання факторів в рамках експерименту продуктивність M процесу РОД змінюється в межах від 260 до 3400 мм³/хв.

9. Отримано математичну модель шорсткості поверхні Ra при обробці металевим ЕІ. Показано, що найбільш впливовим фактором на шорсткість поверхні Ra є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I , а також при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s шорсткість поверхні отвору Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткість поверхні отвору Ra змінюється в межах від 5,7 до 23 мкм.

10. Отримано математичну модель міжелектродного зазору між ЕІ та заготовкою δ при обробці металевим ЕІ. Показано, що найбільш впливовим фактором на міжелектродний зазор між ЕІ та заготовкою δ статичний тиск робочої рідини P_s .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I , а також при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s міжелектродний зазор δ збільшується (зменшується). В рамках експерименту міжелектродний зазор δ змінюється в межах від 0,07 до 0,25 мм.

11. Отримано математичну модель об'ємного зносу ЕІ γ при обробці металевим ЕІ. Показано, що найбільш впливовим фактором на знос ЕІ γ є статичний тиск робочої рідини P_s .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I , а також при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s знос ЕІ γ збільшується (зменшується). В рамках експерименту знос ЕІ γ змінюється в межах від 77 до 84 %.

12. Удосконалено існуючу конструкцію станції робочої рідини для РОД з використанням електроерозійних головок, що дозволяє забезпечити необхідну продуктивність насоса.

13. Запропоновано конструкцію станції робочої рідини, яка має форму тумби для встановлення на неї настільного свердлувального верстату, що дозволяє значно зменшити розміри установки для РОД з використанням електроерозійних головок.

14. Основні результати роботи доповідались на науково-практичній конференції студентів ЦНТУ у 2021 році.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Авториф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТТУ „КПІ”. – Київ, 1999. – 36 с
2. Ресурси Інтернету: https://uk.wikipedia.org/wiki/Шліцьове_з'єднання
3. Ресурси Інтернету: https://studopedia.su/13_40597_metodi-polucheniya-shlitsevih-poverhnostey.html
4. Ресурси Інтернету: <https://studfile.net/preview/6310707/page:20/>
5. Ресурси Інтернету:
https://stud.com.ua/173446/tehnika/elektroeroziyna_rozmirna_obrobka
6. Фотеев Н. К. «Высокоустойкие штампы» М. Машиностроение 1965
7. Альберт М. Высокопроизводительная электроэрозионная обработка // В мире производства: передовая зарубежная технология. – 1991. – №1 – С. 48...52.
8. Александров А. Г., Заруба И.И., Пиньковский И. В. Источники питания для дуговой и электрошлаковой сварки: Справочное пособие. – Днепропетровск: Промінь. 1976. – 151с.
9. Боровиков В. П., Боровиков И. П. STATISTICA – статистический анализ и обработка данных в среде Windows – М.: Информационно-издательский дом „Филинь”, 1998. – 608 с.
10. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение: София: Техника, 1980. – 304 с.
11. Солонин Н. С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972.
12. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер. М. – 1987. – 610 с.
13. Плата L-264. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Москва, L-CARD 1997, – 45 с.

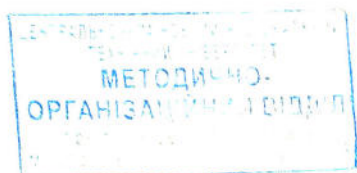
14. Охрана труда в машиностроении : Т.1.,2 : Сб. норм.-техн. документов / Сост. А.И.Шуминов. - М: Машиностроение, 1990. - 383 с. , 349с
15. Охрана труда и техника безопасности на предприятии: Информационный обзор. - Дн-ск: Укрметаллургинформ, 2005. - 175 с.
16. Башта Т.Н. Машиностроительная гидравлика. – М. Машиностроение. 1971.
17. Ресурси Інтернету: http://www.agrovodcom.ru/pump_obyem/nmsh4.php
18. Пат. 29603 Україна, МПК (2006) B23H1/00. Спосіб електроерозійної обробки робочих спряжених пар штампів суміщеної дії. / Носуленко В. І., Шмельов В. М., Великий П. М., Чумаченко О. С.; заявник і патентовласник Кіровоградський національний технічний університет. - № u200704716; Заявл. 27.04.2007; Опубл. 25.01.2008.
19. Попилов Л. Я. Основы электротехнологии и новые её разновидности. Л.: Машиностроение, 1971. – 216 с.
20. Размерная электрическая обработка металлов: Учеб. Пособие для студентов вузов/ Б. А. Артамонов, А. Л. Вишницкий, Ю. С. Волков, А. В. Глазков; Под ред. А. В. Глазкова. – М.: Высш. Школа, 1978. – 336 с., ил.
21. Артамонов Б.А., Волков Ю.С., Дрожалова В.И. и др. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. Учеб. пособие (в 2-х томах). Т.1. Обработка металлов с применением инструмента / Под ред. В.П. Смоленцева. – М.; Высш. шк., 1983. – 247 с., ил.
22. Носуленко В. І. Розмірна обробка електричною дугою робочих деталей розділових штампів / В. І. Носуленко, В.М. Шмельов // Збірник наукових праць КДТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип.13. Кіровоград: КДТУ, 2003. – С. 186-191.
23. Носуленко В. І. Особливості технології розмірної обробки електричною дугою спряжених пар пуансонів і матриць/ В. І. Носуленко, В. М. Шмельов // Збірник наукових праць КДТУ. Техніка в

сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип.16. Кіровоград, 2005. – С.78-85.

24. Носуленко В. І. Розмірна обробка електричною дугою робочих деталей розділових штампів суміщеної дії/ В. І. Носуленко, В. М. Шмельов // Вестник национального технического Украины «Киевский политехнический институт» №60. Машиностроение. – К.:НТУУ «КПИ»,-2010. – С. 154-158.

25. Носуленко В. І. Розмірна обробка електричною дугою робочих деталей розділових штампів як високоефективна альтернатива традиційним технологіям/ В. І. Носуленко, В. М. Шмельов // Вісник національного технічного України «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ«ХП» – 2010. – №43. – С. 17- 21.

ДОДАТКИ



Довідка № 92 від 16. 12. 2021р.

Видана здобувачу вищої освіти групи ПМ(ОТ)20-1,4М Черніченку К. про те, що він 14 травня 2021 р. брав участь у науково-технічній online конференції «Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку» приуроченій «Дню науки – 2021» на секції обробки металів тиском та спецтехнологій з доповіддю на тему: «Зрівноважувач осьових зусиль на штоку електроерозійної головки». Також ним опубліковано за цією ж темою тезу в збірнику тез «Наука виробництву, 2021», С.230-231.

Фахівець I кат. МОВ

Лілія РЕЗНІК