

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:**  
**«Розмірна обробка електричною дугою деталей штампу»**  
**«Dimensional processing of stamped parts using an electric arc»**

Виконав здобувач вищої освіти  
II курсу, групи ПМ-24Мз-2  
спеціальності 131  
«Прикладна механіка»,  
\_\_\_\_\_ Хало В. А.

Керівник проекту  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Віталій ШМЕЛЬОВ

Рецензент  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Віктор Пукалов

**Центральноукраїнський національний технічний університет**

Факультет: Механіко-технологічний

Кафедра: машинобудування, мехатроніки і робототехніки

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ММР

канд. техн. наук, доцент

\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА

30 серпня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ  
Хало Володимир Анатолійович**

1. Тема роботи: «Розмірна обробка електричною дугою деталей штампу».

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

3. Строк подання роботи до захисту: 20 грудня 2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.

Мета: дослідження технологічних характеристик процесу та розробка технології для розмірної обробки електричною дугою деталей штампа.

Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методику експериментальних досліджень; виконати експериментальні дослідження та провести аналіз отриманих результатів; розробити технологію для розмірної обробки електричною дугою деталей штампа; 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., доц.	01.09.2025 р.	18.12.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	15.09.2025 р.	
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу	02.10.2025 р.	
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові	25.11.2025 р.	
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту	12.12.2025 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	15.12.2025 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	18.12.2025 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	20.12.2025 р.	

Дата видачі завдання

01 вересня 2025 р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_ Шмельов В. М.

Завдання прийнято до виконання

01 вересня 2025 р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_ Хало В. А.

## АНОТАЦІЯ

Хало В.А. «Розмірна обробка електричною дугою деталей штампу», спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП - «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025 рік.

Метою роботи є дослідження технологічних характеристик процесу та розробка технології для розмірної обробки електричною дугою деталей штампу.

Розроблено технологію для розмірної обробки електричною дугою деталей штампу, перевірено можливість виготовлення деталей штампа із забезпеченням необхідної якості і точності обробки.

Досліджено та описано технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою деталей штампу, а саме його електричні і гідродинамічні характеристики, та отримано математичні моделі продуктивності процесу обробки, шорсткості обробленої поверхні, зносу електрода-інструмента та міжелектродного зазору.

**розмірна обробка електричною дугою, електроерозійна обробка, деталі штампа, електрод-інструмент, технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою**

## ANNOTATION

KHALO VOLODYMYR. "Dimensional processing of stamped parts using an electric arc", specialty 131 "Applied Mechanics", EP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025.

The purpose of the work is to study the technological characteristics of the process and develop a technology for dimensional processing of electric die parts.

A technology for dimensional processing of electric arc die parts has been developed, the possibility of manufacturing die parts with the necessary quality and accuracy of processing has been tested.

The technological characteristics of the process of dimensional processing of electric arc die parts, namely its electrical and hydrodynamic characteristics, have been studied and described, and mathematical models of the productivity of the processing process, the roughness of the processed surface, wear of the electrode-tool and the interelectrode gap have been obtained.

**dimensional processing by electric arc, electrical discharge machining, die parts, electrode-tool, technological characteristics of the process of dimensional processing by electric arc**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ТА ОБЛАСТІ РАЦІОНАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПА.....	8
1.1. Електроерозійна обробка .....	8
1.2. Електроімпульсна обробка .....	14
1.3. Розмірна обробка електричною дугою .....	19
РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	23
2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень.....	23
2.2. Обладнання, пристрої, апаратура.....	25
2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів.....	26
2.4 Охорона праці при роботі на верстатах РОД.....	30
2.5. Висновки.....	31
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД .....	32
3.1. Визначення технологічних характеристик РОД деталей штампа з отвором .....	32
3.2. Визначення технологічних характеристик РОД деталей штампа типу стержнів.....	38
3.3. Висновки.....	45
РОЗДІЛ 4. РОД ДЕТАЛЕЙ ШТАМПА .....	47
4.1. Послідовність обробки деталей штампа.....	47
4.2. Висновки.....	53
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД .....	54
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Штампи складаються з великої кількості деталей, це можуть бути стандартизовані деталі, унікальні деталі, які виготовляють під конкретну деталь. Деякі стандартизовані деталі необхідно доопрацьовувати під конкретну деталь, що буде штампуватись, з огляду на нюанси виду вихідної заготовки (штампування від стрічки, штампування від штаби, штампування від карток або одиничних заготовок), та наявності чи відсутності засобів автоматизації подачі заготовки, або її відсутності.

Зазвичай типовий штамп складається з робочих деталей штампа (пуансони, матриці), напрямних елементів (напрямні колонки, напрямні втулки, упори, напрямні планки), верхньої та нижньої плити штампа, елементів кріплення робочих деталей штампа (пуансонотримачі, матрицетримачі), різного виду штовхачі, виштовхувачі і знімачі (деталь що забезпечує зняття відштампованої заготовки з пуансона), кріпильних виробів (гвинти, болти, гайки, шайби, шпильки) тощо.

Переважно більшість деталей штампа виготовляють методами механічної обробки. Проте, при виготовленні деталі що має складну твірну зовнішньої чи внутрішньої (отвору) поверхні доцільним є використання методів електроерозійної обробки.

До традиційних методів електроерозійної обробки, що можуть бути застосовані для обробки деталей штампа, зазвичай відносять електроіскрову і електроімпульсну обробку. Недоліком яких є порівняно низька продуктивність обробки.

В цьому зв'язку перспективним високопродуктивних методів електроерозійної обробки є спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД) [1], який відомий за роботами доктора технічних наук Носуленка В. І. РОД забезпечує значно більшу продуктивність обробки (в 5...10 разів) в порівнянні з електроіскровою або електроімпульсною обробкою.

Таким чином робота спрямованих на розробку технології для розмірної обробки електричною дугою деталей штампа є актуальним науково-прикладним завданням, успішне виконання якого дозволить більш широко впроваджувати процес РОД у інструментальному виробництві.

**Мета роботи:** дослідження технологічних характеристик процесу та розробка технології для розмірної обробки електричною дугою деталей штампа.

**Задачі дослідження:**

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД та визначення меж його раціонального застосування;
2. Розробка технології обробки деталей штампа;
3. Визначення впливу фізико-технологічних характеристик процесу РОД, на його кількісні та якісні показники.

**Практичне значення отриманих результатів**

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

Запропоновано та розроблено технології для розмірної обробки електричною дугою деталей штампа, що дозволить підвищити якість виготовлення деталей штампа способом РОД та розширити його технологічні можливості.

**Особистий внесок здобувача**

Постановка мети і задач досліджень: експериментальні дослідження технологічних характеристик процесу РОД, та аналіз отриманих результатів.

## **РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ТА ОБЛАСТІ РАЦІОНАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПА**

Для виготовлення деталей штампа застосовують традиційні методи – механічну обробку. При цьому, більшість деталей штампа (блок штампа, пуансон тримачі, знімачі тощо) мають отвори і стержні, що мають однотипний складний профіль.

Розглянемо технологічні можливості та області раціонального застосування традиційних способів виготовлення деталей штапів та основні напрямки і тенденції розвитку нових процесів, які стають ефективною альтернативою відомим технологіям.

### **1.1. Електроерозійна обробка**

На сьогоднішній день для виготовлення штампувальних деталей все частіше використовуються електрофізичні методи, зокрема електроерозійна обробка.

Сучасні технології електроерозії (ЕЕО) дозволяють знижувати витрати на виробництво таких деталей, а також досягати більш високої точності при створенні складних контурів порівняно з традиційними методами обробки різанням.

Електроіскрова обробка (ЕІО) — це один із методів обробки матеріалів, що полягає у використанні електричних іскор, які утворюються між робочими електродами в умовах короткочасних високовольтних розрядів. Цей метод не має прямого механічного контакту між інструментом і матеріалом, а процес відбувається за рахунок високої температури, яку спричиняють іскрові розряди. Особливістю електроіскрової обробки є її здатність ефективно обробляти матеріали, що мають високу твердість, такі як титанові сплави, тверді сталеві сплави, вуглецеві композити та інші складні матеріали.

Ідея використання електричних розрядів для обробки матеріалів була розвинута на початку ХХ століття. Перші експерименти щодо електроіскрової обробки були проведені ще в 1920-х роках, і саме тоді з'явилися перші теоретичні основи цього процесу. З часом технологія почала вдосконалюватися, і вже в 1940-х роках електроіскрова обробка стала активно використовуватися в промисловості для виготовлення складних деталей, таких як штампи та інструменти. У сучасних умовах цей метод є важливим інструментом у виробництві високоточних деталей, зокрема в авіаційній, автомобільній і медичній техніці.

### ***Принцип роботи електроіскрової обробки***

Процес електроіскрової обробки полягає в тому, що між оброблюваним матеріалом (деталлю) та інструментом (електродом) створюється електричне поле, в якому утворюються іскрові розряди. Під час кожного розряду частина матеріалу розплавляється та виводиться з поверхні у вигляді дрібних часток (іскор), що утворюють шлак. Оскільки процес здійснюється в умовах високих температур (до кількох тисяч градусів), це дозволяє знімати матеріал без механічного контакту, що важливо для обробки матеріалів з високою твердістю або чутливих до механічних напружень.

#### ***Основні етапи процесу електроіскрової обробки:***

- 1. Формування іскор:** Коли між електродами і поверхнею матеріалу встановлюється різниця потенціалів, виникають іскрові розряди, які нагрівають місце контакту до високих температур.
- 2. Розплавлення матеріалу:** При високих температурах матеріал розплавляється в мікроскопічних точках контакту між електродом і оброблюваною поверхнею.
- 3. Виведення часток:** Розплавлений матеріал викидається з поверхні у вигляді іскор або шлаку, який осідає в рідкому вигляді або виводиться з допомогою спеціальної охолоджувальної рідини.

4. **Охолодження і очищення:** Після кожного іскрового розряду поверхня матеріалу охолоджується, що сприяє її затвердінню.

Електроіскрова обробка може здійснюватися за допомогою різних типів інструментів:

- **Електроіскрове шліфування:** Використовується для обробки матеріалів, коли потрібно отримати високу точність і рівність поверхні. Під час цього процесу електроди переміщуються по поверхні оброблюваного матеріалу, знімаючи з нього мікроскопічні частки.

- **Електроіскрове різання:** Дозволяє здійснювати точне різання навіть надтвердих матеріалів, таких як сталеві сплави, титанові сплави, а також кераміка та композити.

- **Електроіскрове формування:** Цей метод використовується для надання необхідної форми матеріалу, зокрема для виготовлення штампів або форм.

Процес зазвичай здійснюється в спеціальному рідинному середовищі, яке охолоджує робочі елементи і зменшує утворення газових продуктів, що можуть впливати на якість обробки. Охолоджувальні рідини також допомагають виводити частки матеріалу, які утворюються під час іскрових розрядів.

### ***Переваги електроіскрової обробки***

1. **Висока точність:** ЕІО дозволяє досягати дуже високої точності обробки, навіть для складних геометричних форм та мікроскопічних деталей.

2. **Здатність обробляти тверді матеріали:** Метод ефективно обробляє матеріали, які неможливо обробити традиційними методами механічної обробки (наприклад, тверді сплави, титанові сплави, кераміка).

3. **Мінімальний механічний вплив:** Оскільки процес обробки не передбачає безпосереднього контакту інструменту з оброблюваною

поверхнею, це знижує ризик виникнення тріщин і механічних напружень у матеріалі.

4. **Висока якість обробки:** Поверхня, оброблена електроіскровим методом, має високу точність і рівність, що робить цей метод дуже ефективним у виробництві високоякісних інструментів і деталей.

5. **Можливість обробки складних форм:** ЕІО дозволяє обробляти складні геометричні форми та мікрорельєфи, які можуть бути важкими або неможливими для обробки за допомогою традиційних механічних методів.

### *Недоліки електроіскрової обробки*

1. **Висока енергозатратність:** Процес електроіскрової обробки вимагає великої кількості енергії, що може робити його більш дорогим у порівнянні з іншими методами.

2. **Шум і вібрація:** Під час роботи може виникати значний шум та вібрація, що потребує додаткових заходів щодо зниження рівня цих факторів у виробничому процесі.

3. **Знос інструменту:** Хоча процес не передбачає механічного контакту, інструменти, особливо електроди, можуть піддаватися зносу через високі температури.

4. **Низька продуктивність:** Що є наслідком необхідності накопичення енергії в конденсаторах установки.

### *Сфери застосування електроіскрової обробки*

1. **Машинобудування:** Для виготовлення точних і складних деталей, таких як штампи, формувальні інструменти та інші елементи, що потребують високої точності.

2. **Авіаційна та космічна промисловість:** Для обробки надтвердих матеріалів, таких як титанові сплави, що використовуються в виробництві авіаційних і космічних компонентів.

3. **Медична техніка:** Для виготовлення точних і складних медичних інструментів і пристроїв.

4. **Електроніка:** Для обробки мікроелектронних компонентів, де важлива точність і мініатюризація.

ЕЕО активно застосовується для вирізання фасонних деталей штампів за допомогою електродного дроту, що безперервно рухається (рис. 1.1) [3]. Завдяки використанню кількох робочих ділянок електродного дроту, який проходить через кілька пар напрямних роликів, можливо обробляти конічні та призматичні заготовки. Ця технологія дозволяє обробляти як зовнішні, так і внутрішні поверхні заготовок, а також їх поєднання. Водночас, такий процес не завжди гарантує отримання рівномірних зазорів між основними деталями штампа, такими як матриця, пуансон, виштовхувач і знімач, без проведення додаткової ручної доводки.

З цієї причини застосовується метод вирізання робочих контурів одночасно на всіх частинах штампа, таких як пуансон, матриця, знімач, виштовхувач, пуансонотримач, підматрична пластина, а також нижня плита штампа для забезпечення рівномірних зазорів при складанні. Переміщення електродного дроту здійснюється згідно з контуром, кресленням або програмою за допомогою різноманітних додаткових пристроїв.

Електроерозійна обробка активно застосовується для вирізання фасонних деталей штампів за допомогою електродного дроту, який постійно рухається. Використання кількох робочих ділянок дроту, що проходить через кілька пар напрямних роликів, дає можливість обробляти фасонні заготовки, зокрема конічні та призматичні деталі.

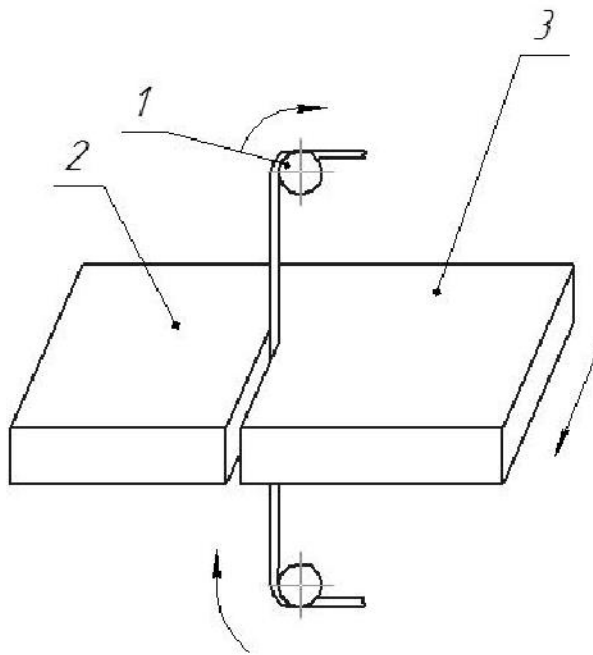


Рисунок 1.1 Схема електроіскрового способу обробки

На рис.1.2 представлено відносне розташування робочих ділянок 8, 9 електрод-дроту 10, що має напрямляючі ролики 2, 3, 4, 5 та заготовок 6, 7 при одночасній обробці різних поверхонь. Робочі ділянки 8 та 9 електрод-дроту між опорами 2, 3 та 4, 5 розташовується в одній площині. Заготовку 6, 7 встановлюють у пристосування і провертаються під час обробки від відповідної системи автоматичного регулювання. Скоба 1 з електрод в напрямку до осі заготовки 6, 7 і назад, обходячи копір 11.

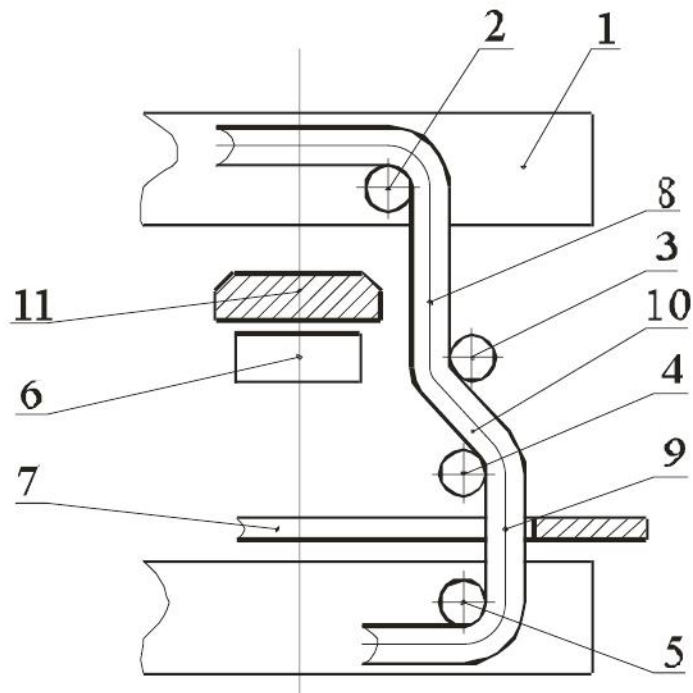


Рисунок 1.2. Схема отримання спряженої пари методом дротяного різання

Застосування цієї схеми дозволяє обробляти як зовнішні, так і внутрішні поверхні заготовок, а також зовнішні поверхні, що з'єднані з внутрішніми, та одночасно обробляти внутрішні і зовнішні поверхні однієї заготовки. Однак у деяких випадках цей процес не гарантує отримання рівномірних зазорів між основними елементами штампа (матрицею та пуансоном, матрицею та виштовхувачем, пуансоном та знімачем) без додаткових ручних налаштувань. Тому для досягнення рівномірного зазору між ними під час зборки використовуються методи вирізання робочих контурів одночасно на всіх елементах штампа: пуансонах, матрицях, знімачах, виштовхувачах, пуансонотримачах, підматричних пластинах та нижніх плитах різних типів штампів, що застосовуються для вирубування та пробивання. Переміщення електродного дроту здійснюється згідно з контуром, кресленням або програмою за допомогою інших додаткових пристроїв.

## **1.2. Електроімпульсна обробка**

Електроімпульсна обробка (ЕІО) — це метод обробки матеріалів, який використовує імпульси високої напруги для досягнення змін у властивостях матеріалу без застосування механічних сил. Цей процес активно використовується в різних галузях промисловості, зокрема в металургії, механічній обробці, виробництві інструментів та в машинобудуванні. ЕІО дозволяє отримувати високу точність обробки, покращувати структуру матеріалу та його фізичні характеристики, зокрема твердість, зносостійкість та стійкість до корозії.

Електроімпульсна обробка матеріалів (ЕІО) — це технологічний процес, в основі якого лежить використання коротких імпульсів електричного струму для модифікації властивостей матеріалу. Метод є ефективним для обробки твердих та високопластичних матеріалів, що робить його корисним у різних виробничих сферах. Оскільки ЕІО не передбачає

використання механічних сил, цей метод значно знижує ризик пошкодження оброблюваних матеріалів та дозволяє досягти високої точності.

Ідея використання електричних імпульсів для обробки матеріалів вперше з'явилася в середині ХХ століття. Одним з основних етапів розвитку цієї технології стало відкриття явища електричної ерозії, яке було відзначене при дослідженні взаємодії високовольтних імпульсів з металевими поверхнями. З того часу науковці почали активно вивчати можливості використання електричних імпульсів для досягнення різноманітних ефектів, таких як зміна мікроструктури матеріалу, зниження напружень у ньому та збільшення його зносостійкості.

### **Принципи роботи електроімпульсної обробки**

Електроімпульсна обробка базується на впливі імпульсів електричного струму на оброблюваний матеріал. Процес можна поділити на кілька етапів:

1. **Імпульсне збудження:** Під час впливу коротких, але потужних імпульсів струму на поверхню матеріалу відбувається миттєве нагрівання матеріалу до високих температур (до декількох тисяч градусів Цельсія), що спричиняє його часткове плавлення та випаровування.

2. **Ерозія та вибухові явища:** Висока температура та тиск, що виникають при проходженні імпульсу, викликають місцеве утворення парових бульбашок у матеріалі, що в свою чергу може призвести до вибухових хвиль. Це явище активно використовують для обробки твердих сплавів і сталей, особливо у процесах електроімпульсної шліфування та різання.

3. **Охолодження та затвердіння:** Після проходження імпульсу матеріал швидко охолоджується, що може спричинити зміну його структури, покращуючи механічні властивості, такі як твердість і зносостійкість. Це є основною перевагою ЕІО у порівнянні з традиційними методами обробки.

## Основні технології електроімпульсної обробки

1. **Електроімпульсне шліфування:** Ця технологія використовується для досягнення високої точності обробки та поліпшення якості поверхні. Процес полягає у використанні електричних імпульсів для створення мікроелектричних розрядів, які знімають матеріал без механічного контакту з оброблюваною поверхнею.

2. **Електроімпульсне різання:** Принцип роботи цієї технології полягає у застосуванні електричних імпульсів для розрізання матеріалів, особливо твердих та надтвердих, таких як металеві сплави та кераміка. Це дозволяє досягти дуже високої точності та забезпечити мінімальний знос інструментів.

3. **Електроімпульсне формування:** Цей метод використовується для змінення форми матеріалу під дією електричних імпульсів, що призводить до мікророзплавлення та створення бажаного контурного вигину або структури.

4. **Електроімпульсна термообробка:** Використання електричних імпульсів для нагрівання та охолодження матеріалів дозволяє змінювати їх механічні та фізичні властивості. Цей метод застосовується для зміцнення матеріалів, підвищення їх зносостійкості та корозійної стійкості.

## Переваги та недоліки електроімпульсної обробки

### *Переваги:*

- **Висока точність:** ЕІО дозволяє досягати високої точності обробки, що особливо важливо для виготовлення деталей з складними формами.
- **Мінімальний механічний вплив:** Оскільки цей метод не передбачає використання механічного тиску, знижуються ризики виникнення тріщин або деформацій матеріалу.
- **Покращення властивостей матеріалу:** Процес може покращити твердість, зносостійкість та інші механічні властивості матеріалу.

- **Швидкість обробки:** Завдяки використанню електричних імпульсів, процес обробки може бути набагато швидшим у порівнянні з електроіскровою обробкою.

*Недоліки:*

- **Висока енергоспоживаність:** Для отримання необхідних параметрів імпульсів потрібне значне споживання енергії.

- **Складність в управлінні процесом:** Застосування високовольтних імпульсів потребує спеціалізованого обладнання та технології, що може бути складним для контролю.

- **Обмежена застосовність:** Хоча метод є дуже ефективним для певних матеріалів, його застосування обмежене специфічними умовами і типами матеріалів.

### **Сфери застосування електроімпульсної обробки**

1. **Машинобудування:** У виробництві точних деталей, зокрема для аерокосмічної та автомобільної промисловості, де потрібна висока точність і якість обробки.

2. **Металургія:** Для обробки твердих металевих сплавів, що підвищує їх зносостійкість і корозійну стійкість.

3. **Мікроелектроніка:** Для виготовлення мікросхем та інших компонентів, де потрібна висока точність і делікатність обробки.

4. **Виробництво інструментів:** Для обробки інструментальних матеріалів, які потребують підвищеної твердості і стійкості до зношування.

**Електроімпульсне об'ємне копіювання** – це високотехнологічний процес обробки матеріалів, який активно застосовується в машинобудуванні, авіабудуванні та у виробництві складних форм і компонентів, що потребують високих показників точності. Метод базується на використанні коротких електричних імпульсів високої енергії, які руйнують матеріал завдяки

високотемпературним впливам, спричиненим електричними розрядами. Це дає змогу отримувати складні форми з високою точністю і мінімальною потребою в подальшій обробці.

На відміну від традиційних методів, під час електроімпульсної обробки матеріал не зазнає механічного впливу: його ерозія відбувається під дією електричних розрядів. Це відкриває значні технологічні можливості для обробки твердих і важкооброблюваних матеріалів, а також для виготовлення тонких і складних елементів.

### **Принцип роботи електроімпульсного об'ємного копіювання**

Об'ємне копіювання ґрунтується на впливі на оброблюваний матеріал короточасних електричних розрядів. При цьому створюються імпульси струму високої частоти й амплітуди, які спричиняють іскровий розряд між електродом та матеріалом. Іскра генерує високі температури, які плавлять і випаровують матеріал на мікрорівні, формуючи потрібний рельєф.

Обладнання для електроімпульсної включає:

1. Джерело імпульсного струму – формує імпульси тривалістю від наносекунд до мікросекунд.
2. Електрод – провідник, що бере участь у процесі розряду й поступово змінює свою форму відповідно до контурів деталі.
3. Робочу рідину – ізоляційне та охолоджувальне середовище (найчастіше масло, вода або спеціальні діелектричні рідини).

Розряд між електродом і заготовкою відбувається в робочій рідині, яка охолоджує зону обробки і видаляє продукти ерозії.

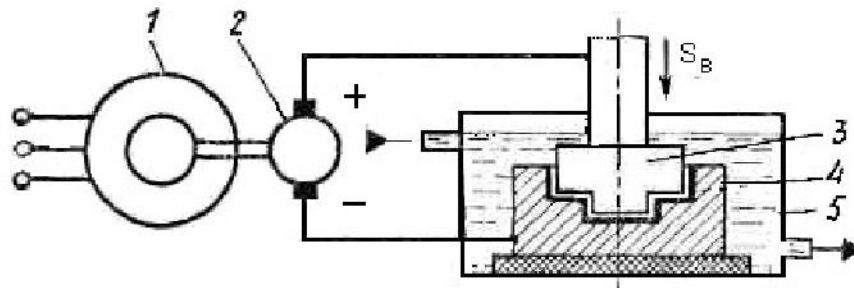


Рис. 1.3. Схема електроімпульсної обробки

## **Застосування електроімпульсного об'ємного копіювання**

Широко застосовується у сферах, де необхідна висока точність та обробка твердих матеріалів:

1. Виготовлення прес-форм та штампів – технологія незамінна під час створення форм для лиття та штампування деталей у металургії, автомобілебудуванні, виробництві пластмас.

2. Машинобудування – використовується для виготовлення точної механіки: зубчастих коліс, валів, елементів точних механізмів.

3. Авіаційна та космічна галузі – дозволяє виготовляти деталі, що працюють у складних умовах: елементи двигунів, конструкційні компоненти, вузли керування.

4. Електроніка – виготовлення високоточних компонентів, зокрема елементів мікросистемної техніки.

### **1.3. Розмірна обробка електричною дугою**

У сучасному виробництві високоефективною альтернативою традиційним методам обробки металів різанням і електроерозійним методам є розмірна обробка електричною дугою (РОД). Це пояснюється тим, що обробка спряжених пар традиційними методами різання металів є малопродуктивним процесом, який не забезпечує рівномірного зазору між спряженими парами та потребує подальшої слюсарної доводки. Така доводка — тривалий і трудомісткий процес, що вимагає висококваліфікованих спеціалістів. У той же час, електроерозійна обробка дозволяє отримувати спряжені пари без подальших ручних налаштувань, але процеси послідовної обробки не гарантують рівномірного зазору між ними і мають обмеження щодо можливості варіювання зазору. Крім того, електроерозійні процеси мають низьку продуктивність.

Процес РОД порівняно з традиційними способами металообробки 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. При цьому продуктивність обробки змінюється простим регулюванням струму обробки. В результаті верстат значно спрощується та здешевлюється, а процес стає більш мобільним.

2. Обробка здійснюється без помітних механічних зусиль на інструмент та без силової дії на заготовку. Відповідно виключається необхідність передачі значних механічних зусиль через систему верстат-пристрій-інструмент-деталь (ВПД), що дозволяє помітно спростити та здешевити верстат в цілому.

3. Відсутня необхідність застосування спеціальних інструментів, більш твердих, ніж метал, що обробляється. Інструмент для РОД (електрод) помітно простіший та дешевший, ніж інструменти, які застосовуються при традиційних способах металообробки (різець, свердло, протяжка).

4. Продуктивність обробки не залежить від твердості та в'язкості металу, який обробляється, що важливо в умовах зростаючого застосування важкооброблюваних матеріалів.

5. Широкі можливості реалізації різноманітних технологічних схем формоутворення як непрофільованим, так і особливо, профільованим електродом, зокрема, копіювання форми електрода на поверхні заготовки при простому поступальному русі електрода, що дозволяє отримати, аналогічно процесу штампування, різноманітні отвори, порожнини, стержні та інші вироби складної форми.

6. Існує можливість виконувати ряд технологічних операцій, які неможливо виконати іншими способами обробки, наприклад, різноманітні глибокі отвори в важкооброблюваних матеріалах.

Перспективним методом для виготовлення штампувальних деталей є РОД, який дозволяє виконувати як розділові операції при обробці складних внутрішніх і зовнішніх контурів, так і створювати фасонні профілі, наприклад, зубчасті поверхні, квадратні отвори з фасками тощо.

Суть РОД полягає в тому, що обробка проводиться за допомогою стаціонарної електричної дуги, яка горить між електродом-іонізатором (ЕІ) і електродом-заготовкою (ЕЗ) в потоці рідини при динамічному тиску потоку не менше 1...2 кПа (що відповідає швидкості потоку близько 1,5...2 м/с). Зазвичай РОД здійснюють дуговим розрядом, який горить в поперечному потоці робочої рідини (рис. 1.4).

Такий дуговий розряд має високі енергетичні характеристики і переміщується по поверхні електродів. В результаті цього відбувається інтенсивне локальне руйнування металу через випаровування та крапельне викидання розплавленого матеріалу, а потік рідини видаляє з зони обробки продукти ерозії. Все це забезпечує ефективне і оптимальне протікання процесу розмірної обробки.

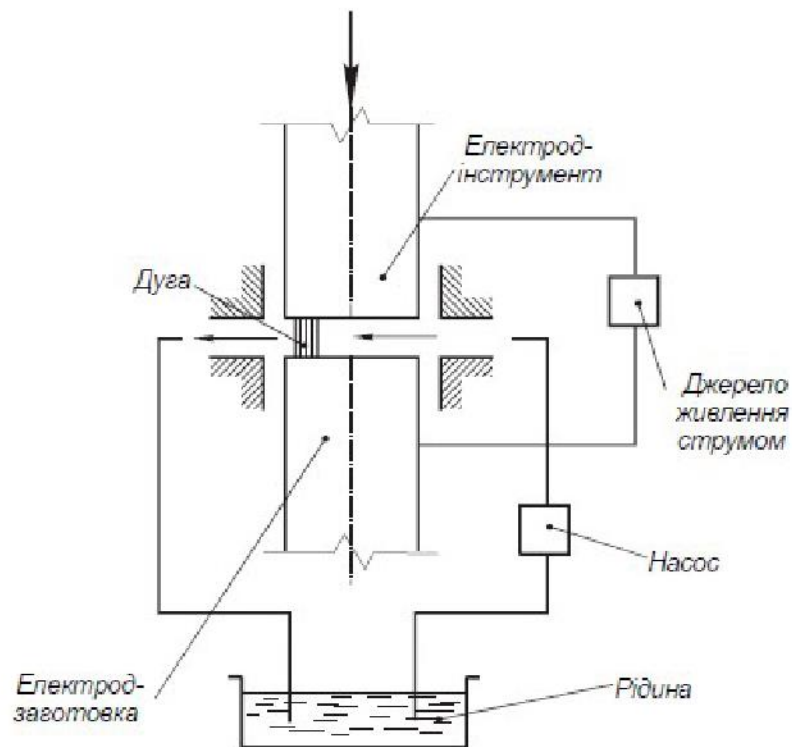


Рис. 1.4. Принципова схема РОД

Таким чином процес РОД дозволяє підвищити продуктивність виготовлення деталей штампів і дає можливість отримувати деталі штампів із заданою геометричною точністю, отримувати необхідну якість обробленої поверхні (шорсткість), і тому є актуальним.

На підставі зазначеного метою роботи є розробка технології та оснащення і для реалізації способу РОД спряжених пар як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.

## РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень

Спосіб розмірної обробки електричною дугою реалізує різноманітні технологічні схеми формоутворення, і дозволяє з високою продуктивністю отримувати різноманітної форми отвори, порожнини та стержні. Це обумовило його впровадження на різноманітних промислових підприємствах, малих підприємствах та ремонтних майстернях.

Переважно спосіб РОД застосовують при копіювально-прошивних операцій профільованим ЕІ за цих умов форма та розміри ЕІ повторюють форму та розміри отримуючої деталі. Тому необхідні дослідження фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД, розробка технології та пристроїв, 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.

Відомо, що при РОД основними факторами, що обумовлюють 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 [8,9], що дало можливість отримати деякі теоретичні уявлення про фізичний механізм процесу і оцінити теоретичні передумови кількісно.

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.

Практична реалізація способу РОД вимагає створення різноманітного обладнання та пристроїв. Розроблено пристрої для отримання деталей штампів на універсальному копіювально-прошивному верстаті "Дуга-8Г" (рис. 2.1).

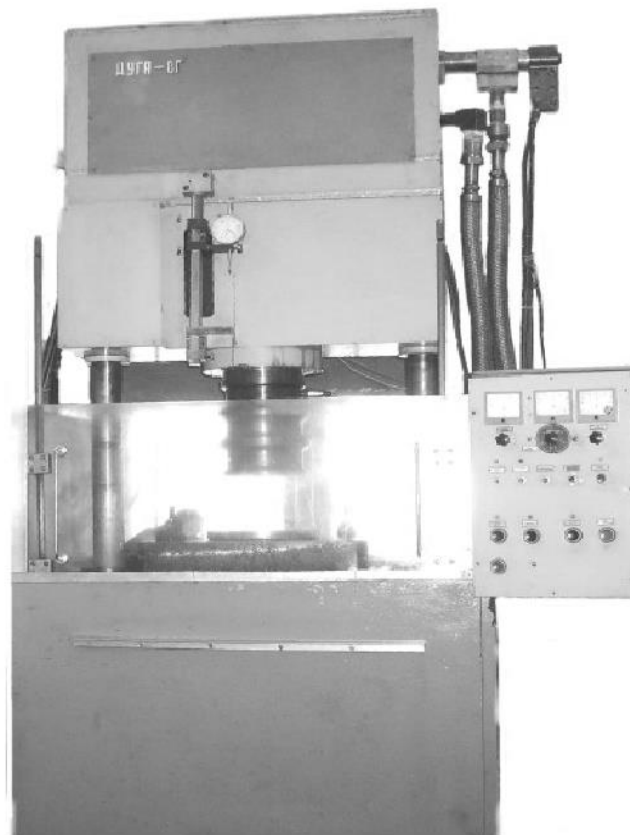


Рис. 2.1. Універсальний копіювально-прошивний верстат "Дуга-8Г"

## 2.2. Обладнання, пристрої, апаратура

Дослідження технологічних характеристик процесу, фізичного механізму електричної ерозії та гідродинаміки проводились безпосередньо при отриманні відповідних деталей штампів із використанням спеціальних пристроїв: відповідного електродотримача, в якому кріпився ЕІ та тримача для заготовки, що містились в герметизованій камері рис. 2.2

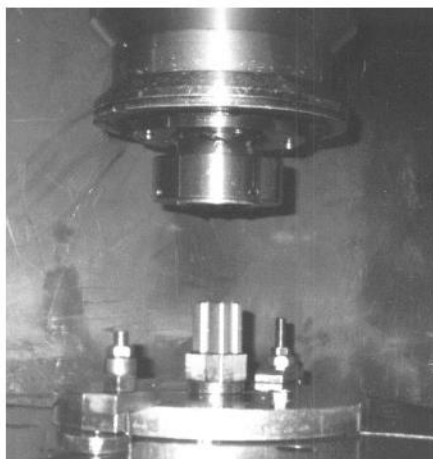


Рис.2.2. Деталь, оброблена в пристрої

Експериментальні дослідження процесу РОД деталей штампів, насамперед його технологічних характеристик та виготовлення експериментальних робочих деталей розділових штампів здійснювались на універсальному копіювально-прошивному верстаті "Дуга-8Г", 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 верстата "Дуга-8Г"

Найбільший розмір заготовки в плані, мм	500x700
Найбільший поперечний розмір електрода, мм	150
Найбільша відстань від торця шпинделя до плити верстата, мм	520
Найбільша відстань від торця шпинделя до плити координатного столу, мм	330

Робочий хід шпинделя, мм	200
Найбільша продуктивність, мм <sup>3</sup> /хв	25000
Найменша шорсткість обробленої поверхні Ra, мкм	
з випрямлячем ВДУ-504 .....	1,6
з додатковим генератором імпульсів згідно технічної характеристики генератора	
Точність обробки, мм	0,05
Глибина зони термічного впливу, мм	до 0,01
Відносний знос графітового електрода, %	до 1
Робоча рідина сировина вуглеводнева, масло, гас	
Потужність джерел живлення електричним струмом, кВт	100
Габарити верстата, мм	1000x1000x2740
Маса верстата, кг	2100
Площа установки, м <sup>2</sup>	17

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”. Дослідження мікроструктури обробленої поверхні [11,12,13] здійснено з використанням растрового електронного мікроскопа РЕМ-106И.

### **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 [13,14]. 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.

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, отримуємо:

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

Тепер задача зводиться до побудови лінійної моделі виду

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

де  $Y = \lg y$

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

$$b_1 = \beta_1$$

$$X_1 = \lg I$$

$$b_2 = \beta_2$$

$$X_2 = \lg P_s \text{ і т.д.}$$

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

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

Розрахунок моделі виконують згідно відомих методик [13,14] і застосуванням програмного пакету STATISTICA 6.0 [14]. В табл. 2.4

представлено приклад значення оцінок коефіцієнтів регресії ( $BETA$ ) та значення коефіцієнтів регресії ( $B$ ), значення критерію Стьюдента ( $t$ ) для коефіцієнтів регресії та рівні його значимості ( $p$ ). Побудовано довірчі інтервали ( $\pm 95\%$ ).

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

Regression Summary for Dependent Variable: lgM (stal.sta)						
R= ,99824650 R <sup>2</sup> = ,99649607 Adjusted R <sup>2</sup> = ,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.

Відповідно, математична модель в функції двох факторів може мати вигляд:

$$M = 1,466 \cdot I^{1,419} \cdot P_s^{-0,491} . \quad (2.5)$$

- 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.

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

2.5.3. Експерименти виконано верстаті «Дуга - 8Г».

## **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 [15,16].

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 [15, 16].

### **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;

## РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД

### 3.1. Визначення технологічних характеристик РОД деталей штампа з отвором

Склад робочої рідини масло „Індустріальне-12” – 50%, гас освітлювальний – 50%, матеріал заготовки – сталь 45, матеріал ЕІ – сталь 45, полярності електродів – пряма, 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 при виготовленні стержня

Фактори	$X_{max}$	$X_{min}$	$X_0$	$\Delta X$
Сила току $I, A$	150	50	100	50
Статичний тиск $P_s, MPa$	1,2	0,8	1,0	0,2

Таблиця 3.2 Матриця планування експерименту

Номер експерименту	$x_1 (I) A$	$x_2 (P_s) \text{ кгс/см}^2$	$Y1 (M) \text{ мм}^3/\text{хв}$	$Y2 (Ma) \text{ мм}^3/\text{Ахв}$	$Y3 (Ra) \text{ мкм}$	$Y4 (\delta) \text{ мм}$	$Y5 (\gamma) \%$
1	-	-	400	8	4	0,055	0,38
2	-	0	369,5	7,39	3,2	0,048	0,48
3	-	+	321	6,42	2,5	0,04	0,59
4	0	-	1075	10,75	5,1	0,065	0,26
5	0	0	995	9,95	4	0,059	0,34
6	0	+	993	9,93	3,2	0,05	0,45
7	+	-	1833,7	12,22	8	0,12	0,14
8	+	0	1830,2	12,2	6,3	0,09	0,21
9	+	+	1779	11,86	5,1	0,08	0,23

#### *Продуктивність обробки отворів*

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(M) = 1571,4 + 1328,86x_1 - 479,29x_2. \quad (3.1)$$

Математична модель продуктивності процесу має наступний вигляд,  
мм<sup>3</sup>/хв:

$$M = 0,155 \cdot I^{1,96} \cdot P_s^{-1,513} \quad (3.2)$$

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  $P_s$ .

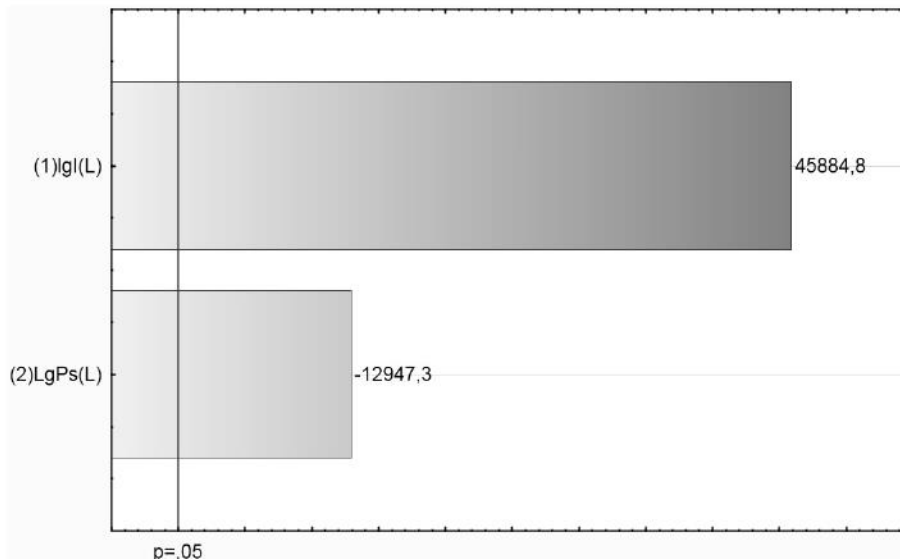


Рисунок 3.1. Степень впливу факторів на продуктивність процесу  $M$

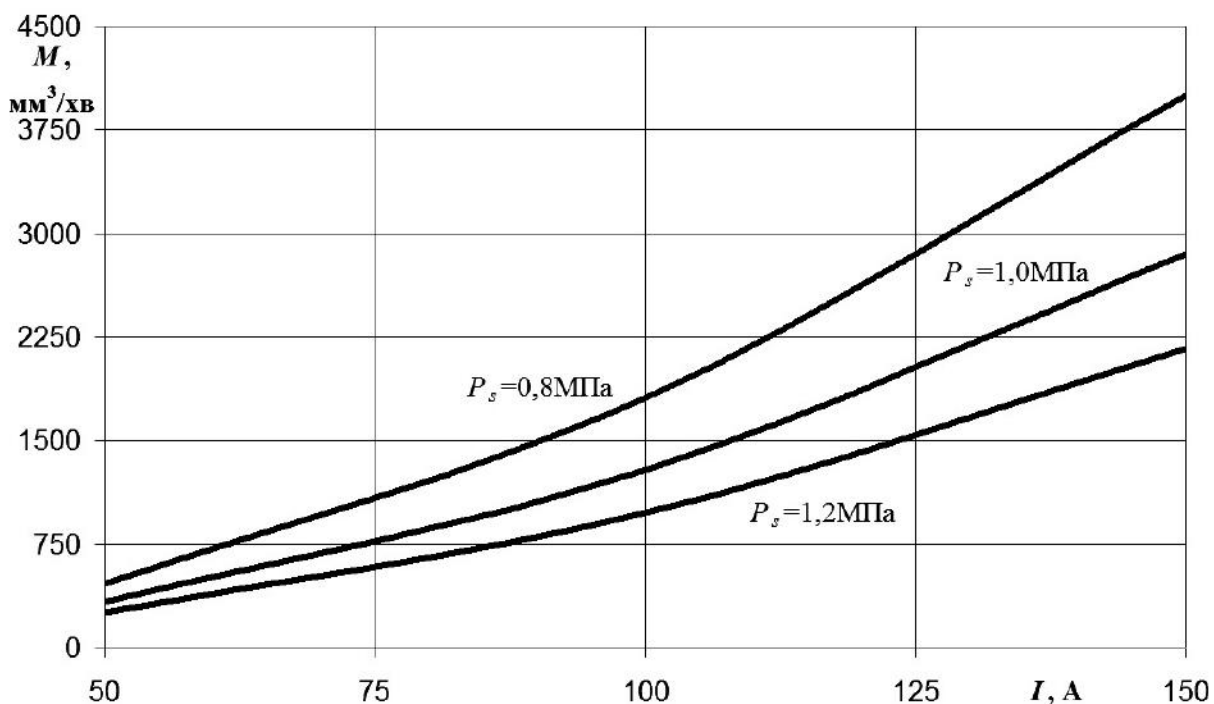


Рисунок 3.2. Залежність продуктивності процесу  $M$  від  $I$  та  $P_s$

### **Питома продуктивність обробки отворів**

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ma) = 13,537 + 6,53x_1 - 4,13x_2 \quad (3.3)$$

Математична модель питомої продуктивності процесу має наступний вигляд, мм<sup>3</sup>/Ахв:

$$Ma = 0,155 \cdot I^{0,959} \cdot P_s^{-1,513} \quad (3.4)$$

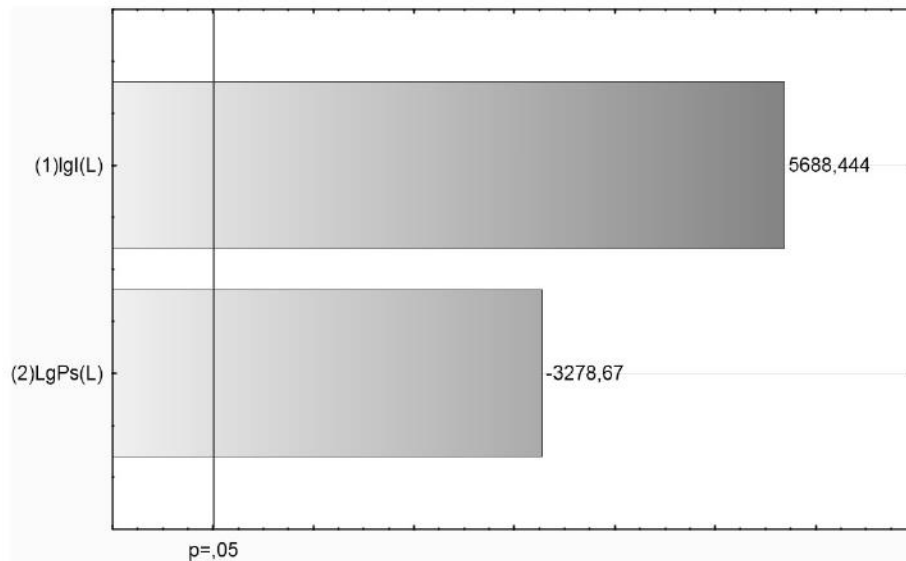


Рисунок 3.3. Степінь впливу факторів на питому продуктивність процесу  $Ma$

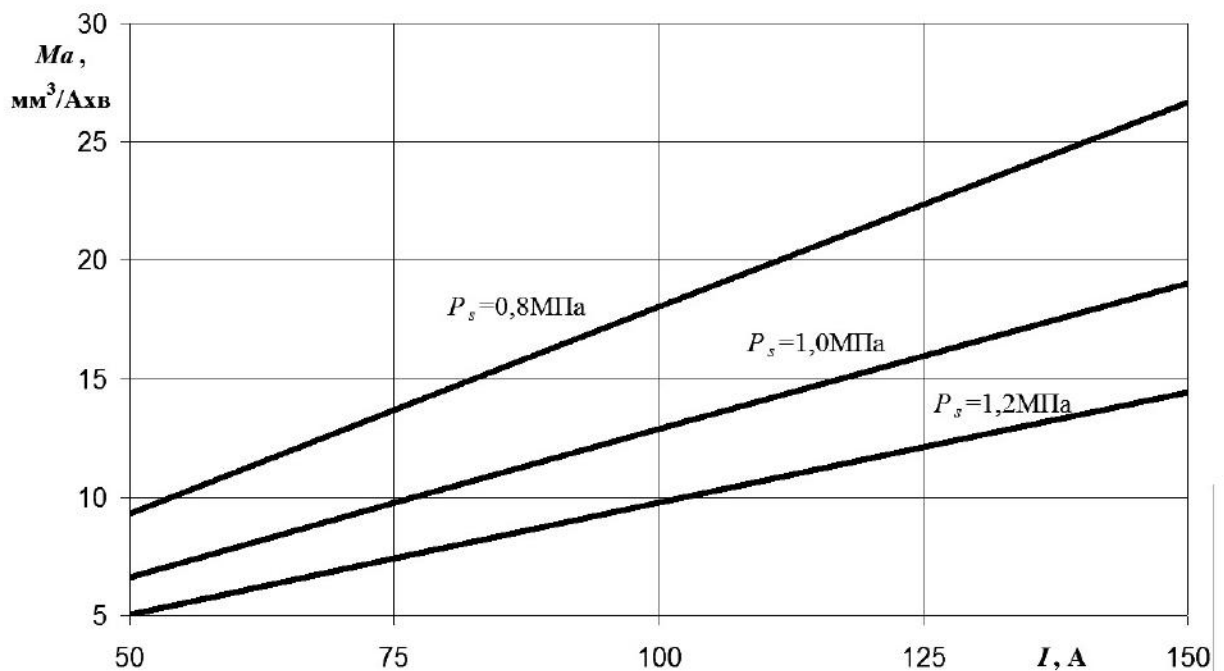


Рисунок 3.4. Залежність питомої продуктивності процесу  $Ma$  від  $I$  та  $P_s$

На підставі ранжування факторів (рис.3.4) встановлено, що питома продуктивність процесу визначається перш за все силою технологічного струму  $I$ , другим по степеню впливу фактором є статичний тиск робочої рідини  $P_s$ .

### **Шорсткість поверхні отворів**

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ra) = 8,3 + 2,03x_1 - 1,75x_2 \quad (3.5)$$

Математична модель шорсткості поверхні отворів має наступний вигляд, мкм:

$$Ra = 0,978 \cdot I^{0,463} \cdot P_s^{-1,046} \quad (3.6)$$

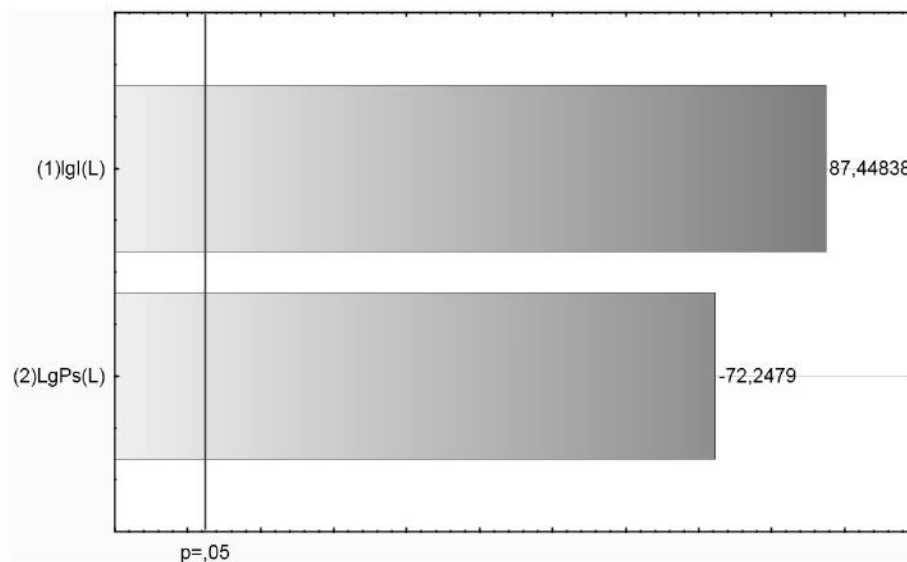


Рисунок 3.5. Степінь впливу факторів на шорсткість поверхні  $Ra$

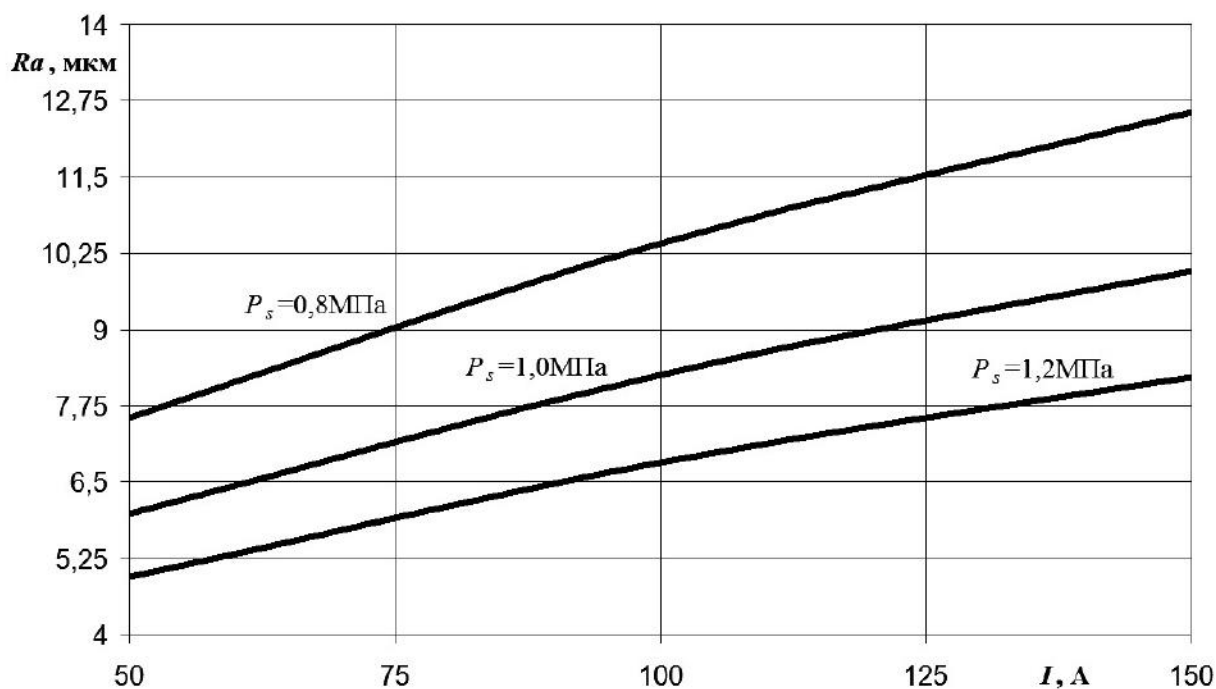


Рисунок 3.6. Залежність шорсткості обробленої поверхні  $Ra$  від  $P_s$  та  $I$

На підставі ранжування факторів (рис.3.5) встановлено, що шорсткість поверхні визначається перш за все силою технологічного струму  $I$ , другим по степеню впливу фактором є статичний тиск робочої рідини  $P_s$ .

#### **Об'ємний знос $EI$ при виготовленні отвору**

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\gamma) = 78,8 + 0,95x_1 - 1,17x_2 \quad (3.7)$$

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

$$\gamma = 71,27 \cdot I^{0,022} \cdot P_s^{-0,073} \quad (3.8)$$

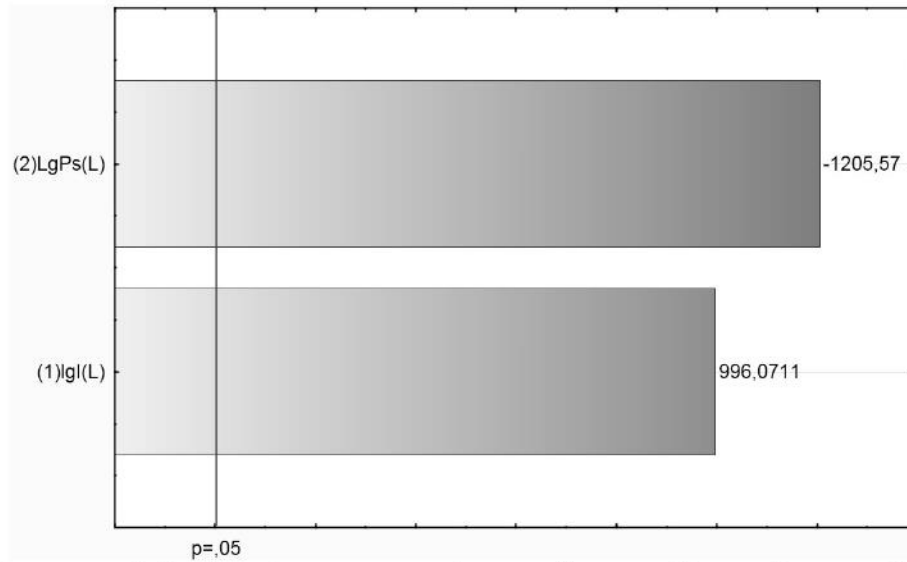


Рисунок 3.7. Степень впливу факторів на об'ємний знос ЕІ  $\gamma$

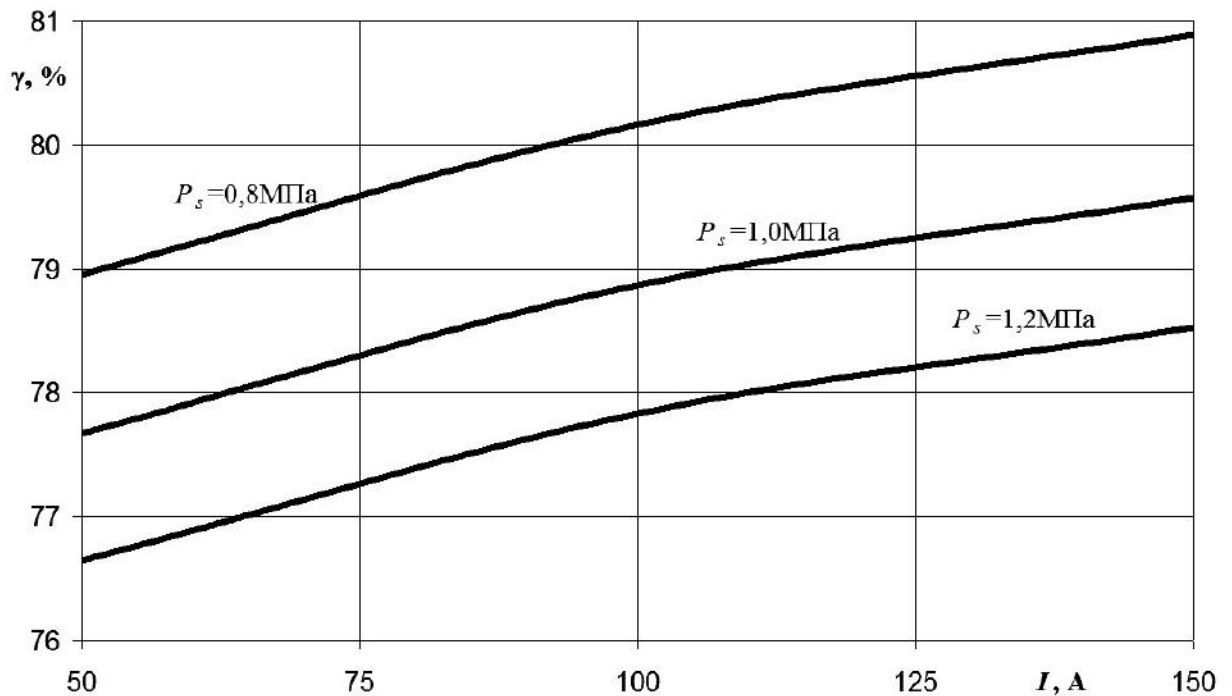


Рисунок 3.8. Залежність об'ємного зносу ЕІ  $\gamma$  від  $P_s$  та  $I$

На підставі ранжування факторів (рис.3.7) встановлено, що об'ємний знос ЕІ  $\gamma$  визначається перш за все статичним тиском робочої рідини  $P_s$ , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму  $I$ .

### ***МЕЗ при виготовленні отворів***

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\delta) = 0,072 + 0,014x_1 - 0,01x_2 \quad (3.9)$$

Математична модель МЕЗ при виготовленні отворів має наступний

вигляд, мм:

$$\delta = 0,013 \cdot I^{0,375} \cdot P_s^{-0,727} \quad (3.10)$$

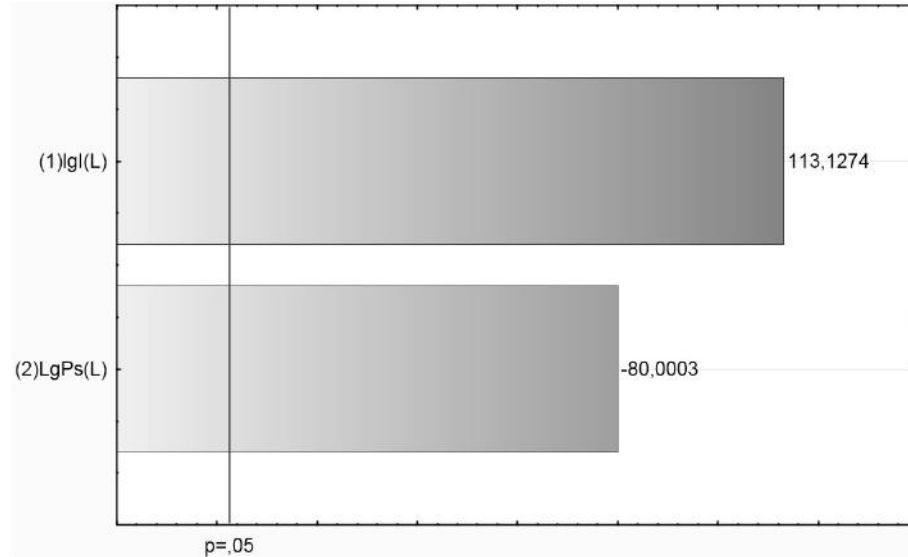


Рисунок 3.9. Степень впливу факторів на МЕЗ  $\delta$

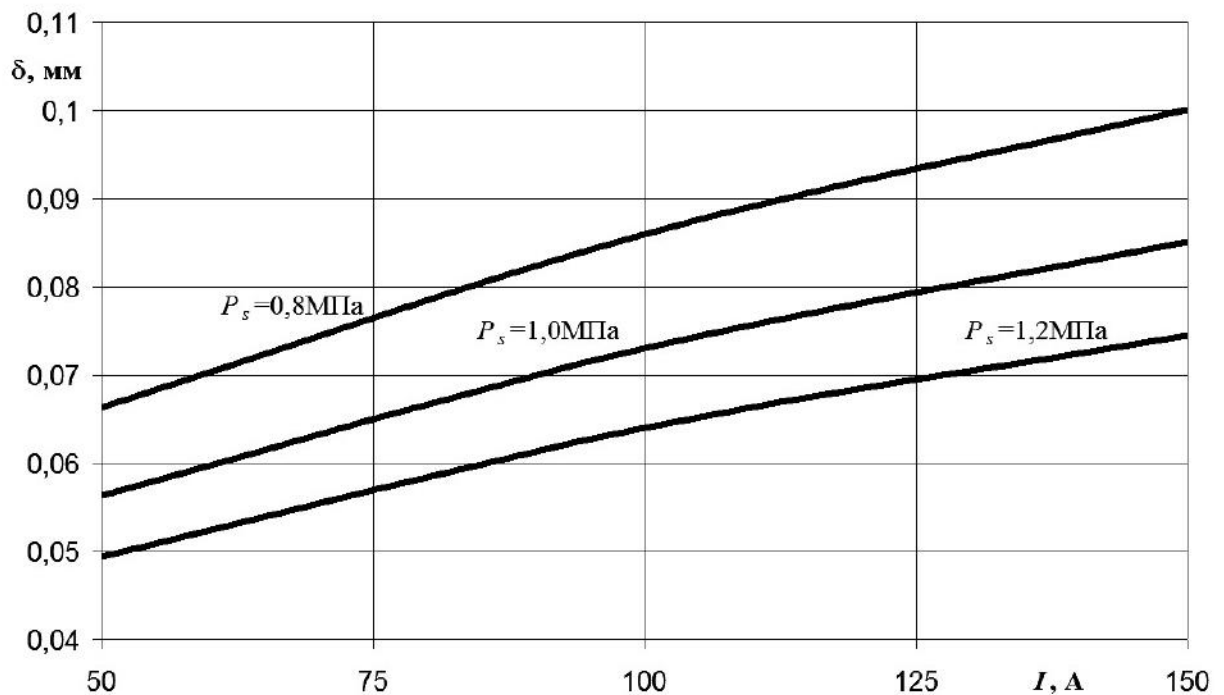


Рис. 3. 10. Залежність МЕЗ  $\delta$  від  $I$  та  $P_s$

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

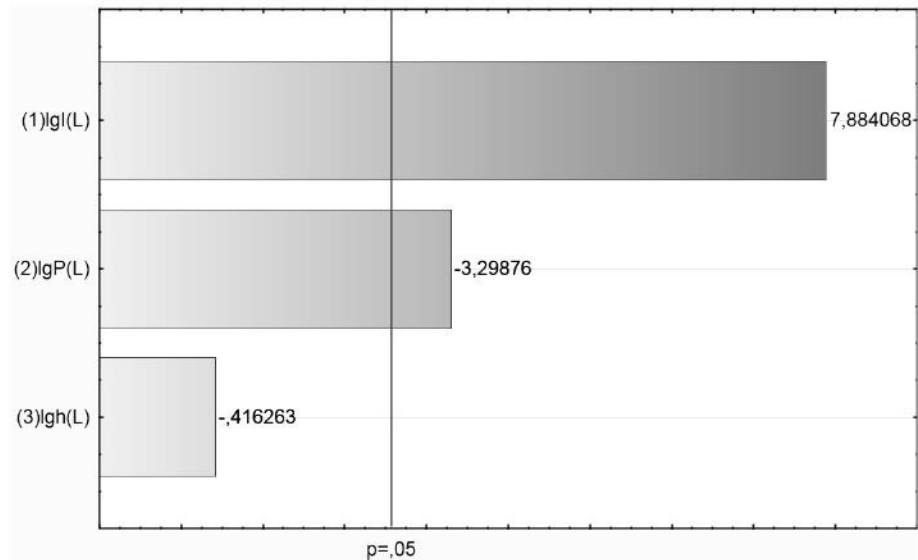


Рисунок 3.11. Степінь впливу факторів на продуктивність процесу  $M$

Як видно з рис. 3.11 один із факторів, а саме висота робочого пояса  $h$ , знаходиться нижче лінії  $p=0,05$  тобто він є статистично не значимим і його потрібно вивести з математичної моделі.

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

$$M = 1,323 \cdot I^{1,519} \cdot P_s^{-1,738} \quad (3.12)$$

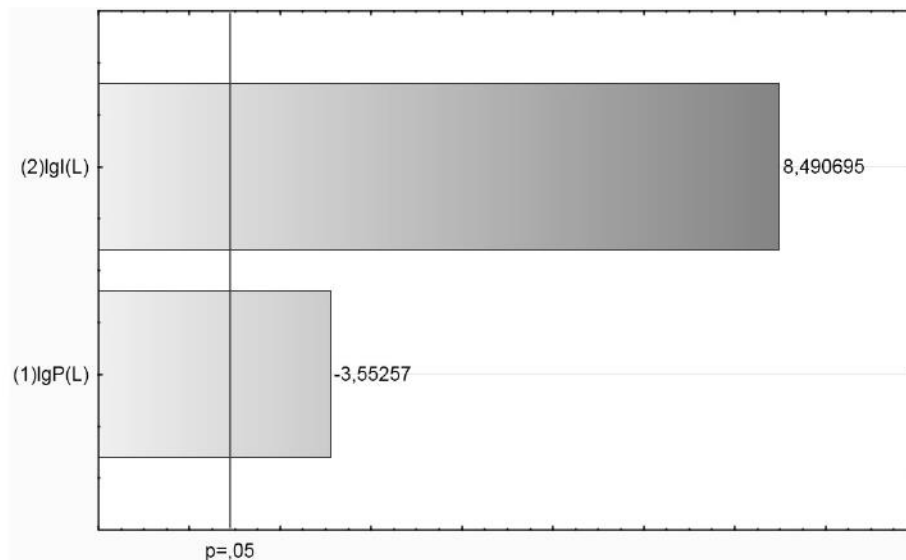


Рисунок 3.12. Степінь впливу факторів на продуктивність процесу  $M$

### 3.2. Визначення технологічних характеристик РОД деталей штампа типу стержнів

Склад робочої рідини масло „Індустріальне-12” – 50%, гас освітлювальний – 50%, матеріал заготовки – сталь 45, матеріал ЕІ – графіт МПГ–7, полярності електродів – зворотна, продуктивність обробки, згідно викладеного, є функцією сили струму, напруги, динамічного тиску потоку робочої рідини, та висоти робочого пояса ЕІ.

Неповний факторний експеримент для трьох факторів (k) і трьох рівнів (p) включає себе наступне число експериментів (n):  $n=3^{3-1}=9$

Межі варіювання факторів і план експерименту представлено в табл. 3.2 і табл. 3.4.

Таблиця 3.3 Межі варіювання факторів при виготовленні стержня

Фактори	$X_{max}$	$X_{min}$	$X_0$	$\Delta X$
Сила току $I, A$	150	50	100	50
Статичний тиск $P_s, MPa$	1,2	0,8	1,0	0,2
Висота робочого пояса ЕІ $h, mm$	1,5	0,5	1,0	0,5

Таблиця 3.4 Матриця планування експерименту

Номер експерименту	$x_1 (I)$ A	$x_2 (P_s)$ , кгс/см <sup>2</sup>	$x_3 (h)$ , мм	$Y1 (M)$ мм <sup>3</sup> /хв	$Y2 (Ma)$ мм <sup>3</sup> /Ахв	$Y3 (Ra)$ мкм	$Y4 (\delta)$ мм	$Y5 (\gamma)$ %	$Y6 (\psi)$ мм/мм
1	-1	1	0	258,134	5,16268	5,7	0,12	0,068	0,00759
2	1	0	-1	2277,655	15,1843667	4,1	0,021	0,049	0,008187
3	0	1	-1	1455,531	14,55531	3,3	0,078	0,045	0,013074
4	1	-1	0	3277,655	21,8510333	8,2	0,014	0,089	0,002659
5	1	1	1	1866,593	12,4439533	11,1	0,069	0,111	0,005187
6	-1	0	1	527,766	10,55532	10	0,076	0,096	0,00346
7	0	0	0	1822,124	18,22124	6,9	0,055	0,079	0,004698
8	-1	-1	-1	803,687	16,07374	3,8	0,037	0,043	0,004936
9	0	-1	1	2233,186	22,33186	11,7	0,042	0,113	0,001935

#### ***Продуктивність обробки стержнів***

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(M) = 1613,592 + 972,053x_1 - 455,712x_2 + 15,112x_3 \quad (3.11)$$

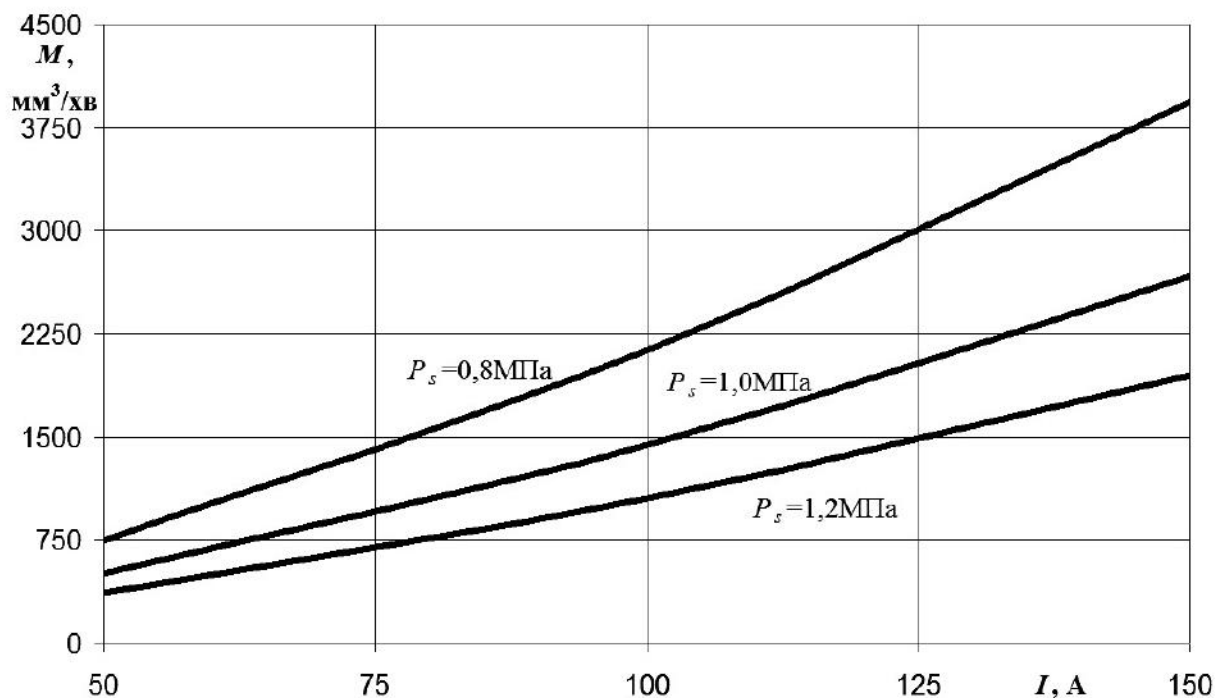


Рисунок 3.13. Залежність  $M$  від  $I$  та  $P_s$

На підставі ранжування факторів (рис.3.12) встановлено, що продуктивність процесу визначається перш за все силою технологічного струму  $I$ , другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини  $P_s$ .

### **Питома продуктивність обробки стержня**

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ma) = 15,153 + 2,948x_1 - 4,682x_2 - 0,080x_3 \quad (3.13)$$

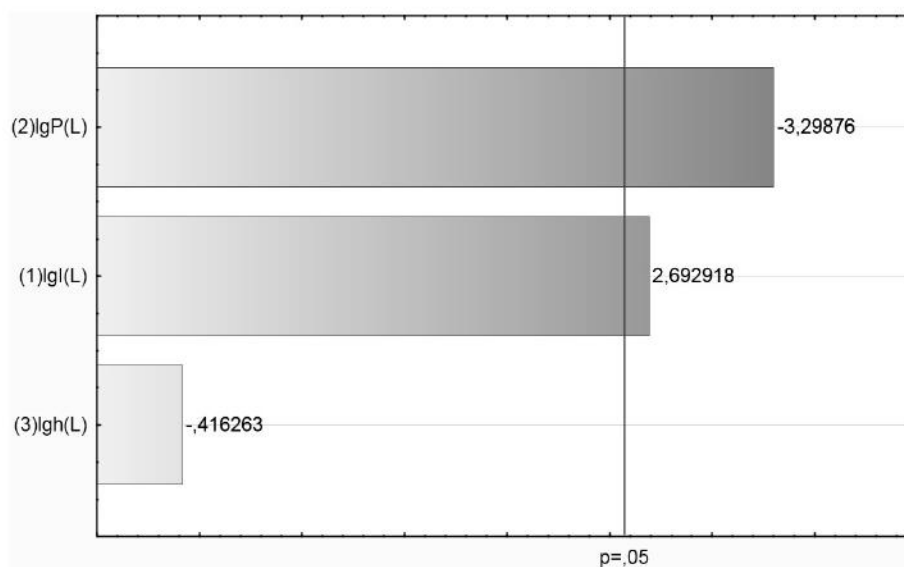


Рисунок 3.14. Степень впливу факторів на питому продуктивність процесу  $Ma$

Як видно з рис. 3.14 один із факторів, а саме висота робочого пояска  $h$ , знаходиться нижче лінії  $p=0,05$  тобто він є статистично не значимим і його потрібно вивести з математичної моделі.

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

$$Ma = 1,323 \cdot I^{0,519} \cdot P_s^{-1,738} \quad (3.14)$$

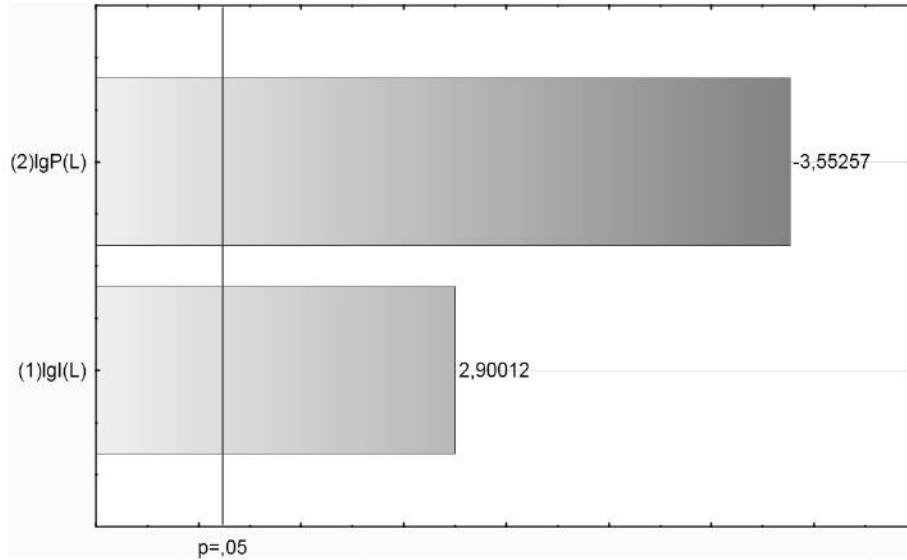


Рисунок 3.15. Степень впливу факторів на питому продуктивність процесу

$Ma$

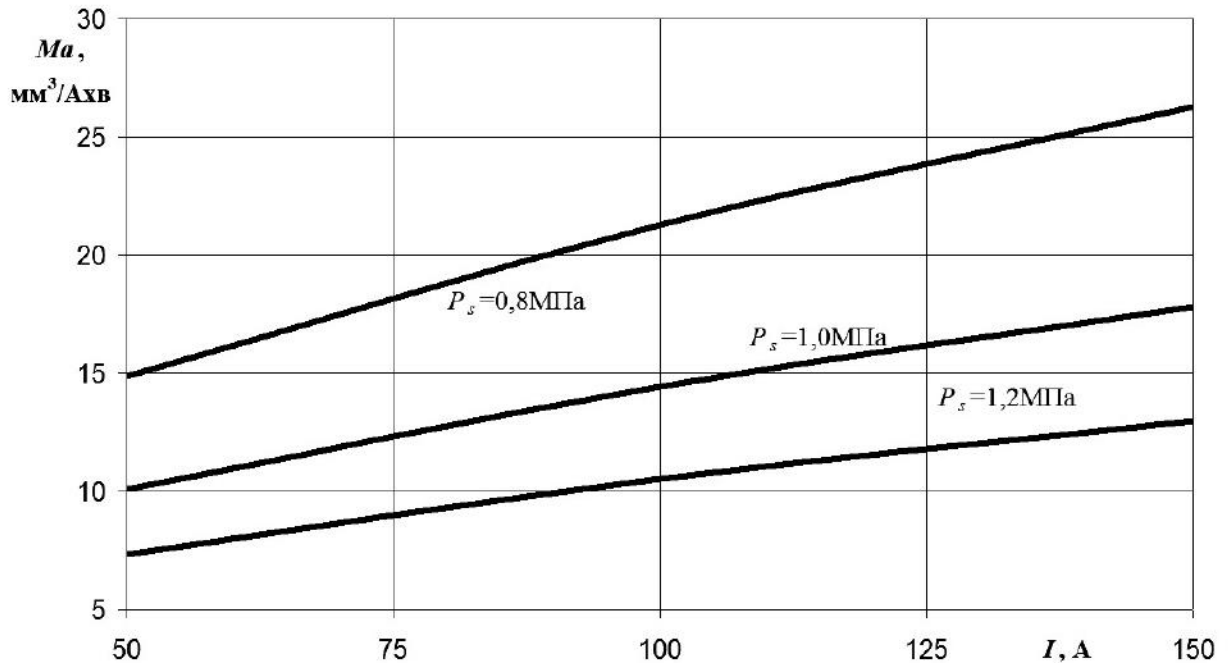


Рисунок 3.16. Залежність  $Ma$  від  $I$  та  $P_s$

На підставі ранжування факторів (рис.3.15) встановлено, що питома продуктивність процесу визначається перш за все статичним тиском робочої

рідини  $P_s$ , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму  $I$ .

### Шорсткість поверхні стержнів

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ra) = 7,2 + 0,65x_1 - 0,6x_2 - 3,6x_3 \quad (3.15)$$

Математична модель шорсткості має наступний вигляд, мкм:

$$Ra = 3,492 \cdot I^{0,158} \cdot P_s^{-0,455} \cdot h^{0,969} \quad (3.16)$$

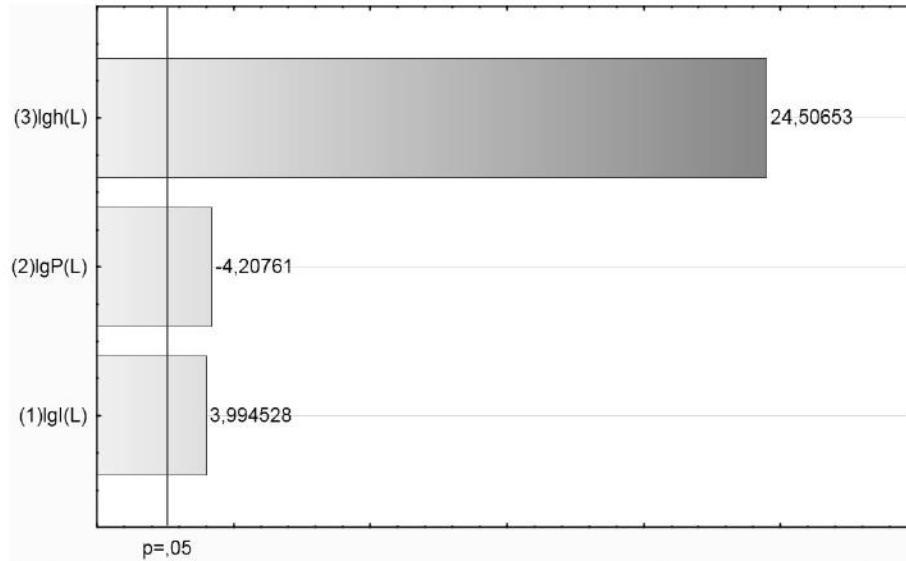


Рисунок 3.17. Степень впливу факторів на шорсткість поверхні стержня  $Ra$

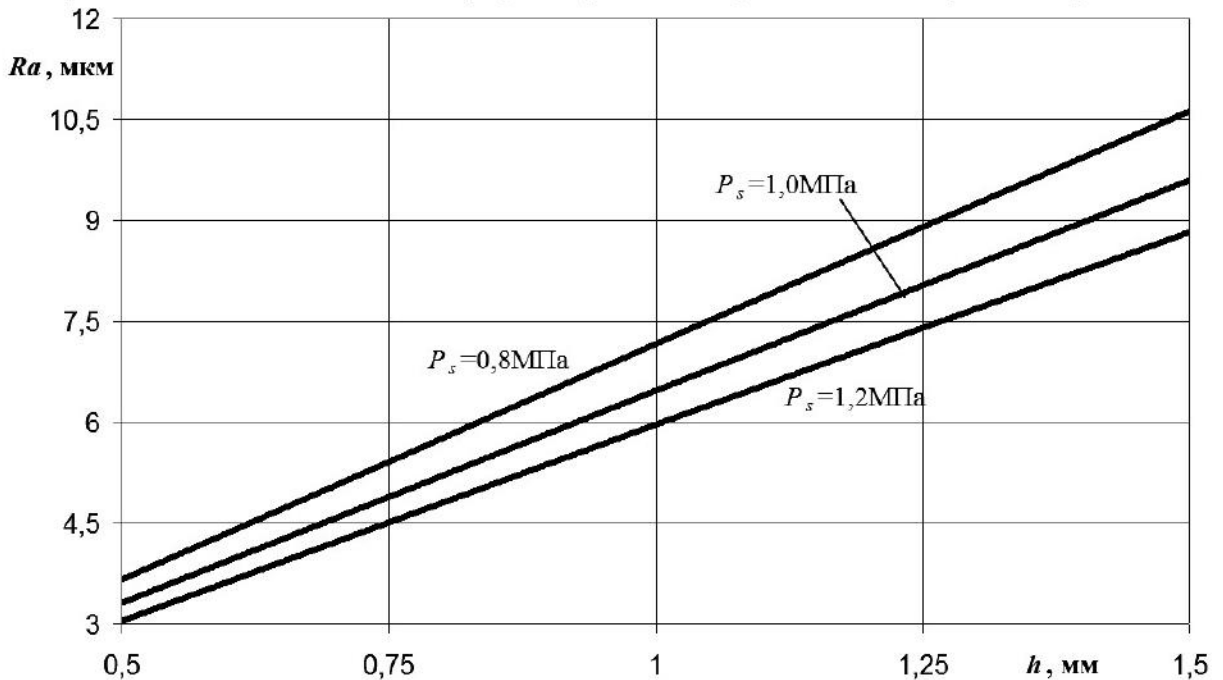


Рисунок 3.18. Залежність  $Ra$  від  $h$  та  $P_s$  ( $I=50A$ )

На підставі ранжування факторів (рис.3.17) встановлено, що шорсткість поверхні визначається перш за все висотою робочого пояса  $h$  та

статичним тиском робочої рідини  $P_s$ , третім по степеню впливу фактором є сила технологічного струму  $I$ .

### МЕЗ при виготовленні стержнів

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\delta) = 0,077 + 0,0070x_1 - 0,0035x_2 + 0,0305x_3 \quad (3.17)$$

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

$$\delta = 0,037 \cdot I^{0,1661} \cdot P_s^{-0,1996} \cdot h^{0,1719} \quad (3.18)$$

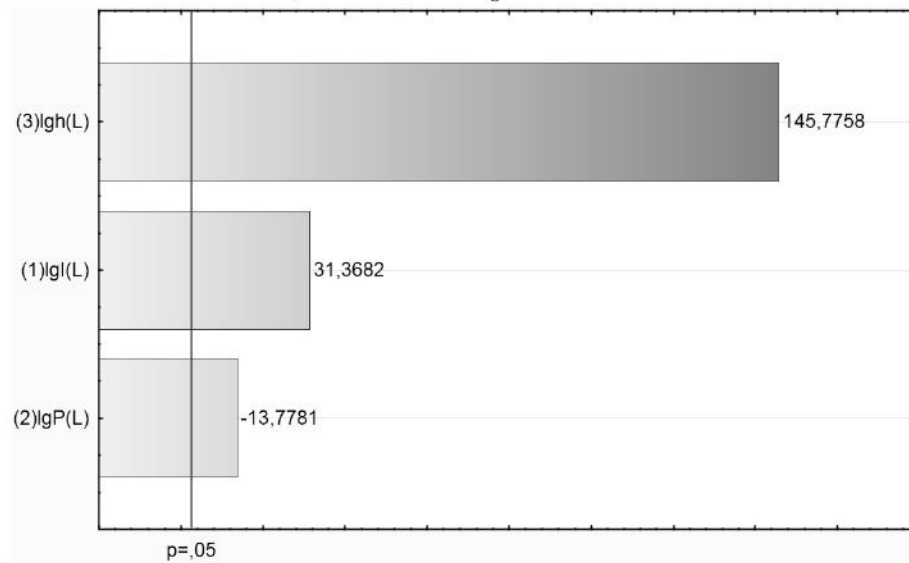


Рисунок 3.19. Степень впливу факторів на МЕЗ  $\delta$

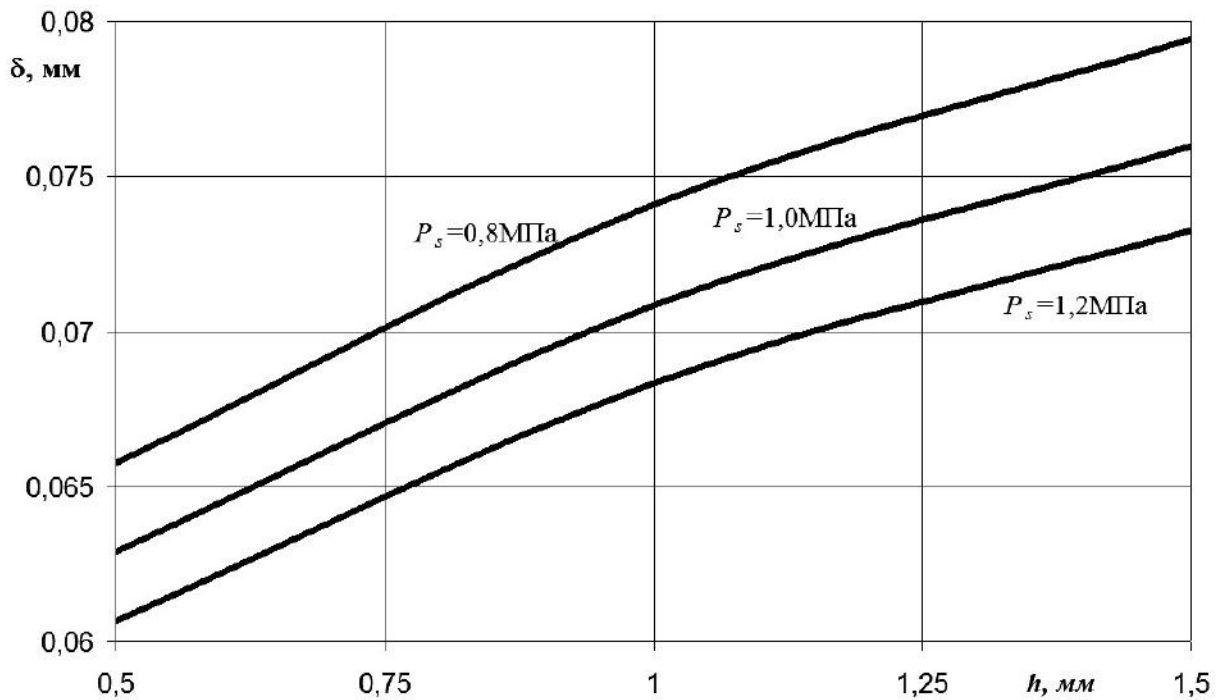


Рисунок 3.20. Залежність  $\delta$  від  $h$  та  $P_s$  ( $I=50A$ )

На підставі ранжування факторів (рис.3.19) встановлено, що МЕЗ  $\delta$  визначається перш за все все висотою робочого пояса  $h$  та статичним тиском робочої рідини  $P_s$ , третім по степеню впливу фактором є сила технологічного струму  $I$ .

**Відносний об'ємний знос EI при виготовленні стержнів**

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\gamma) = 0,0569 - 0,0215x_1 + 0,0290x_2 + 0,0085x_3 \quad (3.19)$$

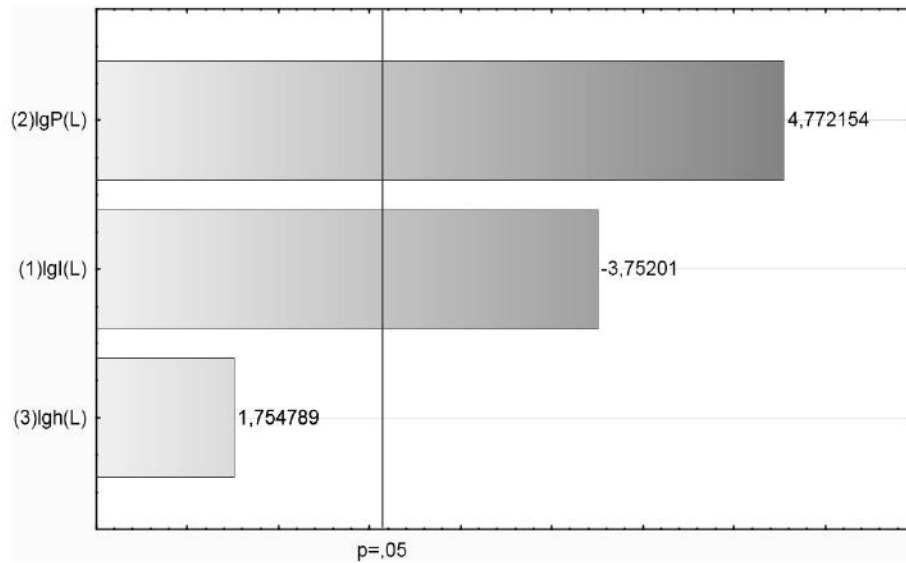


Рисунок 3.21. Степінь впливу факторів на знос EI  $\gamma$

Як видно з рис. 3.21 один із факторів, а саме висота робочого пояса  $h$ , знаходиться нижче лінії  $p=0,05$  тобто він є статистично не значимим і його потрібно вивести з математичної моделі.

Математична модель об'ємного зносу EI при виготовленні стержня має наступний вигляд, %:

$$\gamma = 1,768 \cdot I^{-0,794} \cdot P_s^{2,762} \quad (3.20)$$

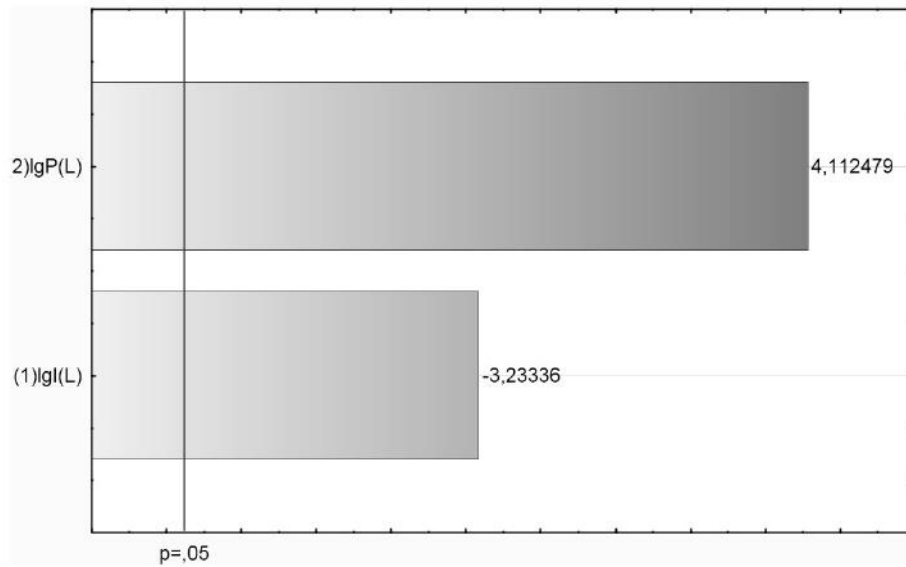


Рисунок 3.22. Степень впливу факторів на лінійний знос ЕІ  $\gamma_1$

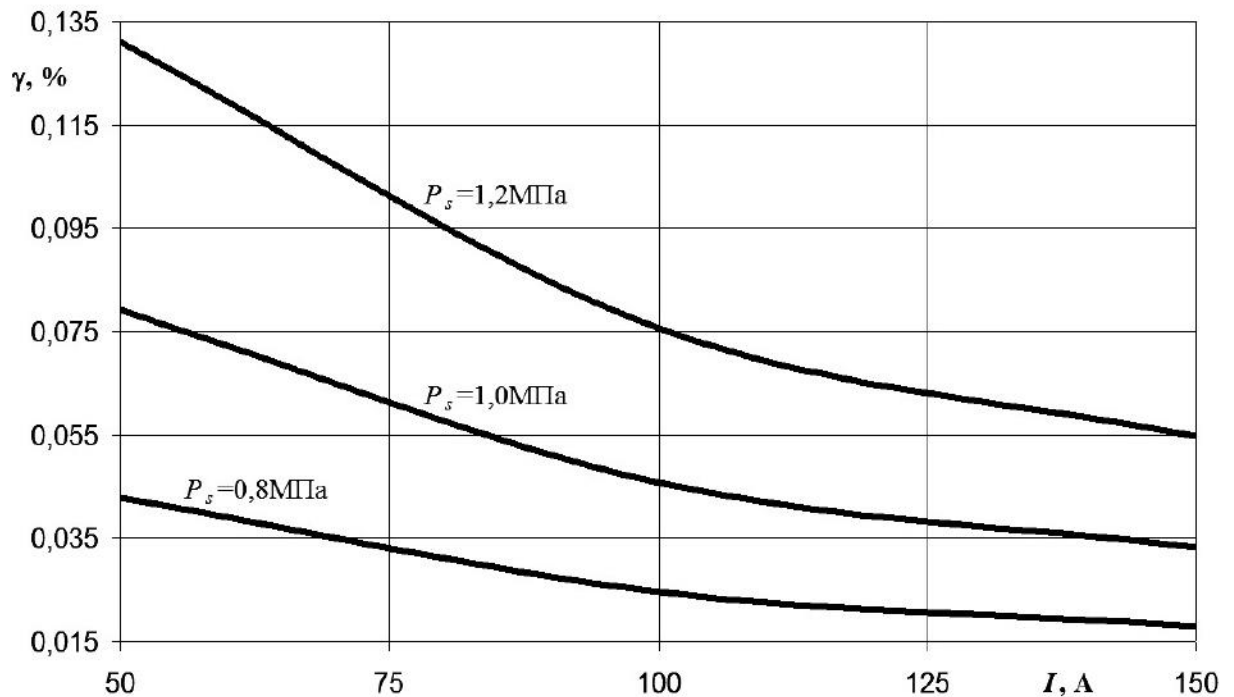


Рисунок 3.23. Залежність  $\gamma$  від  $I$  та  $P_s$

На підставі ранжування факторів (рис.3.22) встановлено, що відносний об'ємний знос ЕІ  $\gamma$  визначається перш за все статичним тиском робочої рідини  $P_s$ , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму  $I$ .

### 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. Розроблено методику розрахунків технологічних процесів. Досліджено і описано технологічні характеристики процесу. Залежно від режиму обробки продуктивність при виготовленні отворів складає  $250\text{...}4000\text{мм}^3/\text{хв}$ ; питома продуктивність процесу складає  $5\text{...}27\text{мм}^3/\text{Ахв}$ ; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах  $5\text{...}12,5\text{мкм}$ ; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах  $75\text{...}81\%$ , міжелектродний зазор в межах  $0,045\text{...}0,1\text{мм}$ .

3.3.2. Теоретично і експериментально досліджено, обґрунтовано і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу: продуктивності процесу обробки стержнів, шорсткості обробленої поверхні пуансона, точності розмірів пуансона, стійкості ЕІ. Розроблено методику розрахунків технологічних процесів. Досліджено і описано технологічні характеристики процесу. Залежно від режиму обробки продуктивність при виготовленні стержнів складає  $360\text{...}4000\text{мм}^3/\text{хв}$ ; питома продуктивність процесу складає  $7\text{...}27\text{мм}^3/\text{Ахв}$ ; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах  $3\text{...}11\text{мкм}$ ; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах  $0,017\text{...}0,13\%$ , міжелектродний зазор в межах  $0,06\text{...}0,08\text{мм}$ .

## РОЗДІЛ 4. РОД ДЕТАЛЕЙ ШТАМПА

### 4.1. Послідовність обробки деталей штампа

Складний профіль елементів деталей штампа може бути виготовлений за допомогою ЕІ виготовленого з металу (сталі) або графіту.

Якщо виготовлення пуансона і матриці здійснювалось з використанням способу керованого зносу ЕІ [1] то є можливість використати графітовий ЕІ яким виготовляли пуансон для виготовлення металевих ЕІ для виготовлення отворів складного профілю в деталях штампа.

Розглянемо типову технологію виготовлення деталей штампів на прикладі розділового штампа наведеного на рис. 4.1.

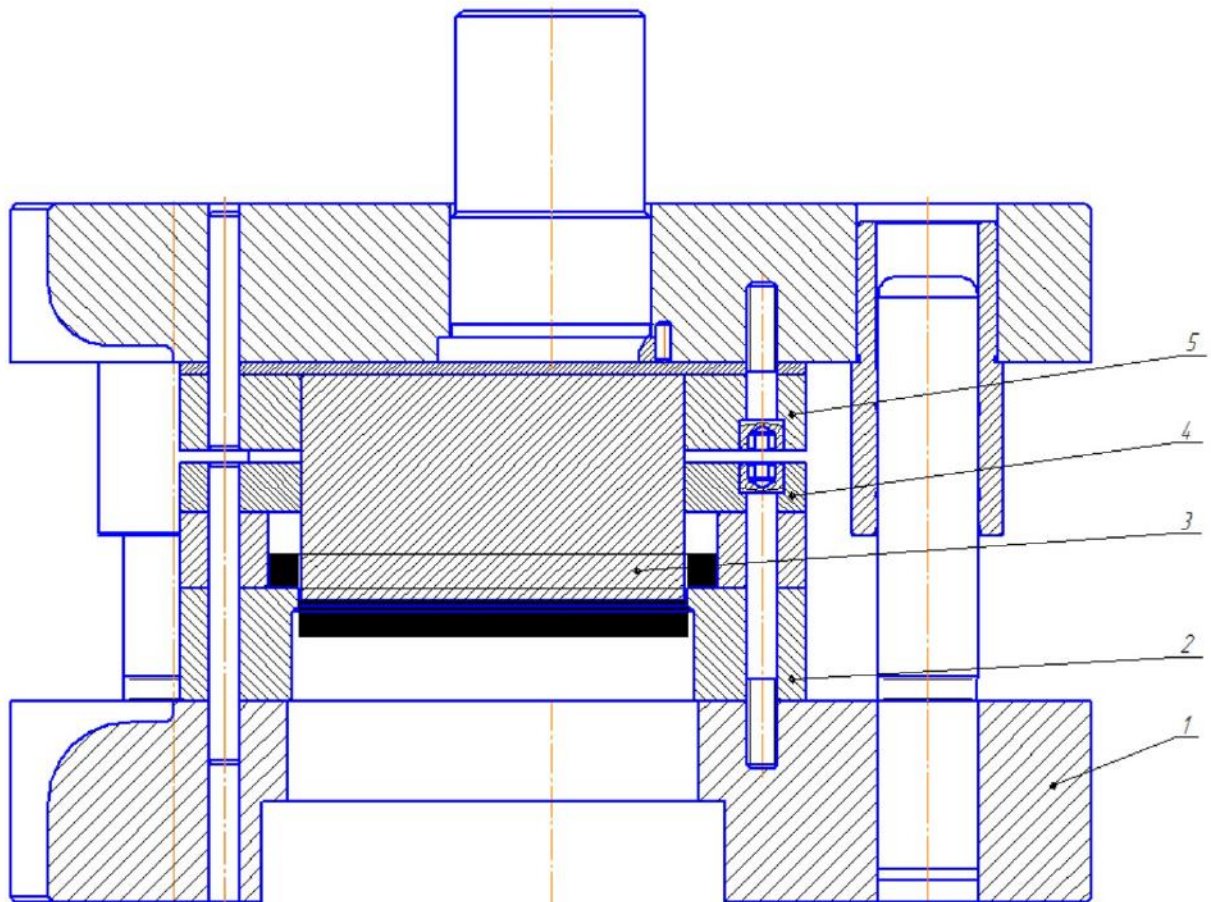


Рисунок 4.1. Розділовий штамп загальний вигляд

Деталі штампа, які мають складний профіль отворів, що наближений до профілю деталі, яку штамнують, будемо виготовляти металевими ЕІ отриманими за допомогою графітового ЕІ яким виготовляють пуансон.

Штамп призначений для штампування деталі, що має складний профіль, наведено на рис. 4.2

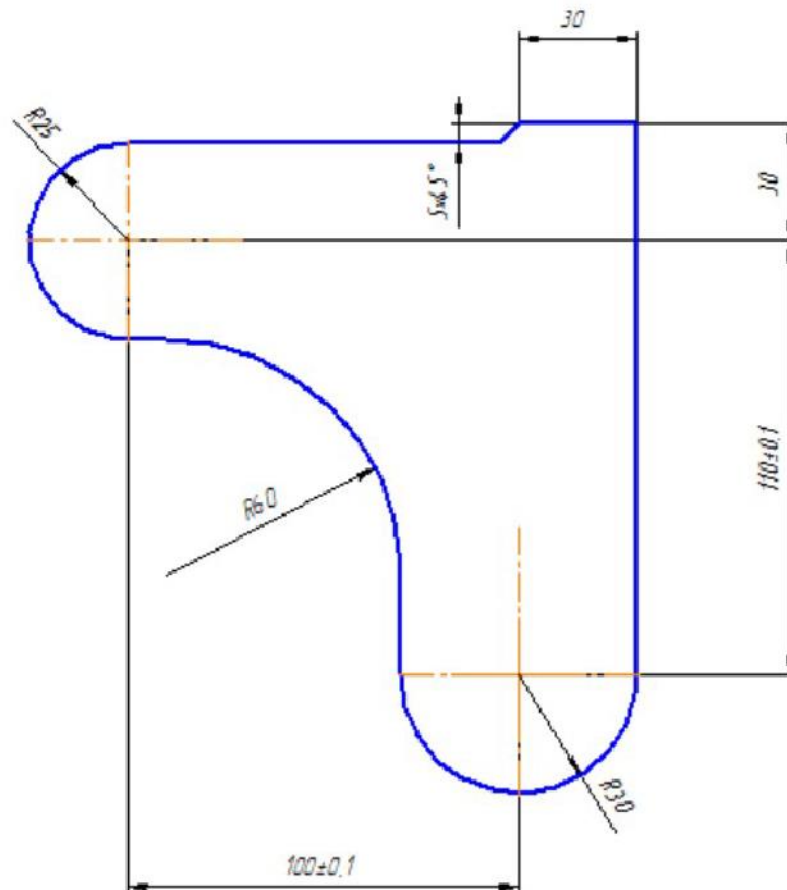


Рисунок 4.2. Ескіз деталі, що штамнують

До таких деталей відносяться: пуансонотримач 5 рис. 4.3; нижня плита штампа 1 рис. 4.4; знімач 4 рис. 4.5.

Виготовлення пуансона і матриці в даній роботі не розглядаються. Для забезпечення необхідних розмірів складного профілю деталей штампа необхідно забезпечити правильну послідовність обробки.

Зважаючи на те, що отвір складного профілю в графітовому ЕІ в процесі обробки збільшується, а отже кожен наступних оброблений ним стержень (металевий ЕІ, або пуансон) буде мати більші розміри в плані. Величина зносу графітового та металевого ЕІ наведено в розділі 3.

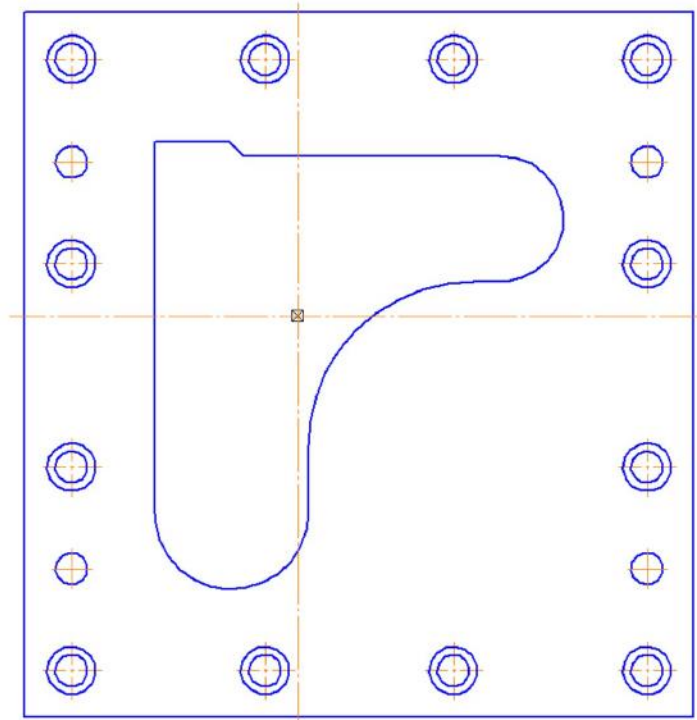


Рисунок 4.3. Пуансонотримач

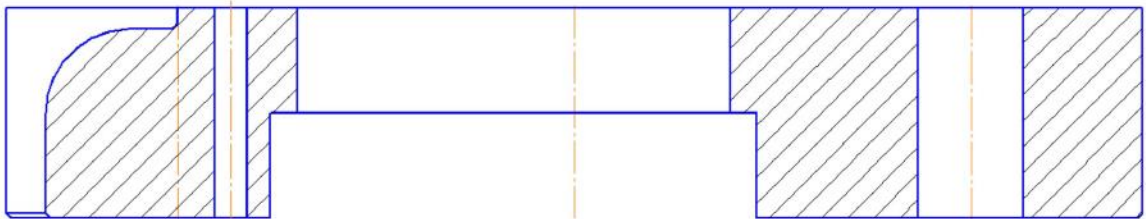


Рисунок 4.4. Нижня плита штампа

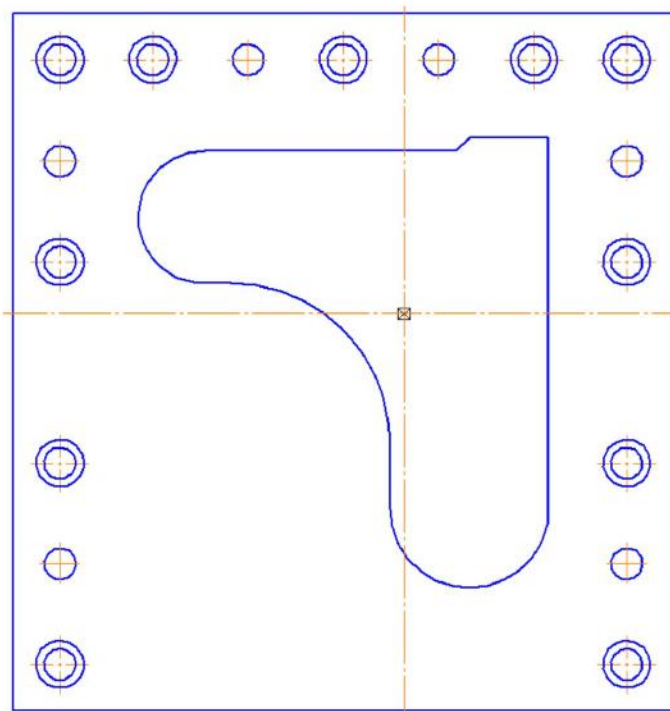


Рисунок 4.5. Знімач

Зважаючи на знос графітового ЕІ та розміри в плані складного контуру на деталях штампа послідовність обробки металевих ЕІ та деталей штампа буде мати наступну послідовність:

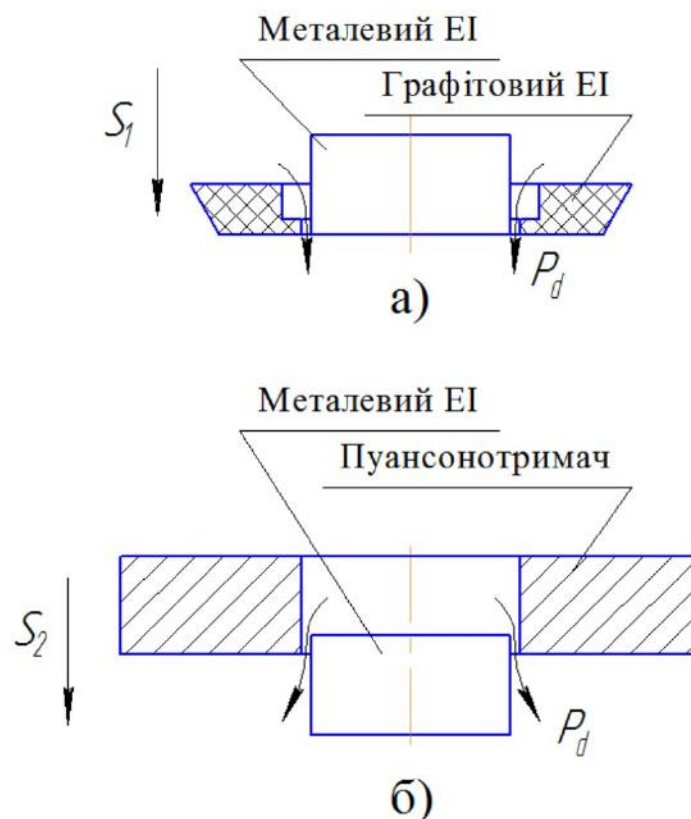
1 етап – графітовим ЕІ виготовляють металевий ЕІ для виготовлення отвору в пуансонотримачі рис. 4.6;

2 етап - графітовим ЕІ виготовляють пуансон рис 4.7;

3 етап – графітовим ЕІ виготовляють металевий ЕІ для виготовлення отвору в матриці рис. 4.8;

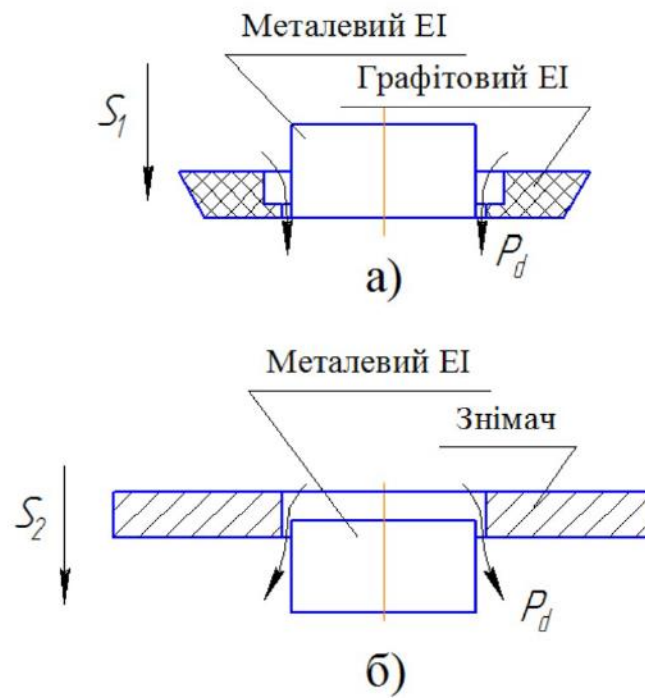
4 етап – графітовим ЕІ виготовляють металевий ЕІ для виготовлення отвору в знімачі рис. 4.9;

5 етап – графітовим ЕІ виготовляють металевий ЕІ для виготовлення отвору в нижній плиті рис. 4.10;



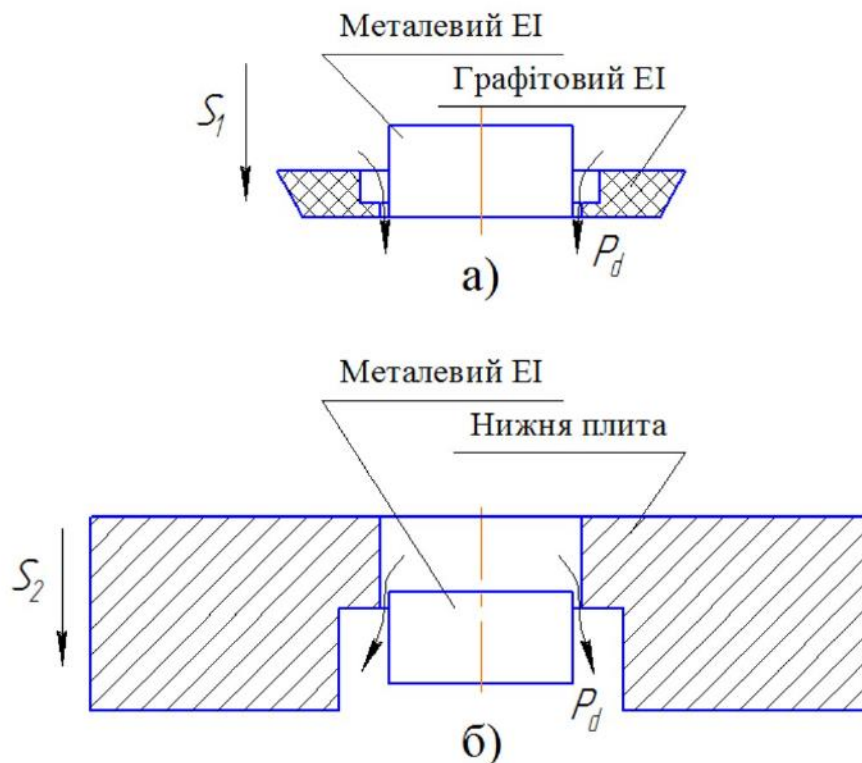
$S_1$  – напрям руху графітового ЕІ,  $S_2$  – напрям руху металевого ЕІ,  $P_d$  – напрям руху робочої рідини

Рисунок 4.6. Схема обробки металевого ЕІ для обробки пуансонотримача графітовим ЕІ (а), і обробки пуансонотримача металевим ЕІ



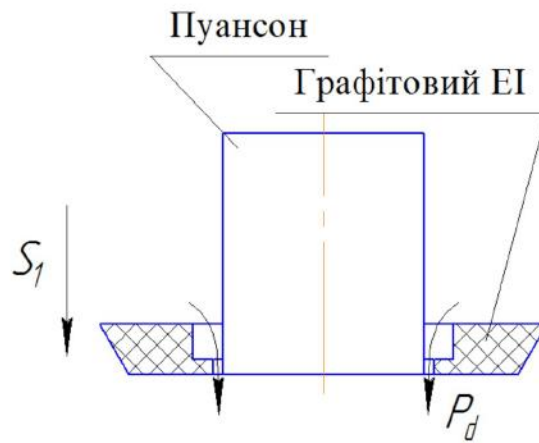
$S_1$  – напрям руху графітового ЕІ,  $S_2$  – напрям руху металевого ЕІ,  $P_d$  – напрям руху робочої рідини

Рисунок 4.9. Схема обробки металевого ЕІ для обробки знімача графітовим ЕІ (а), і обробки знімача металевим ЕІ



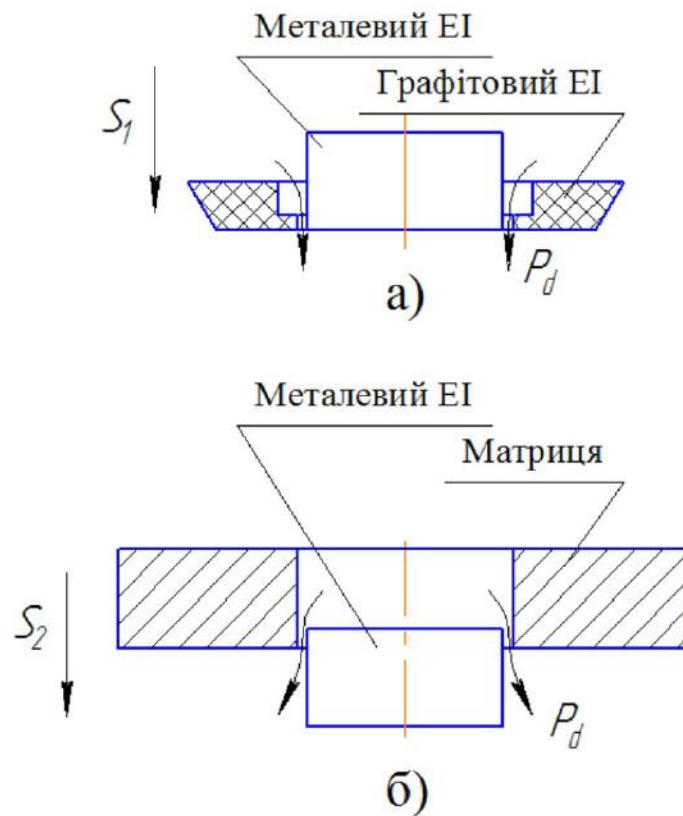
$S_1$  – напрям руху графітового ЕІ,  $S_2$  – напрям руху металевого ЕІ,  $P_d$  – напрям руху робочої рідини

Рисунок 4.10. Схема обробки металевого ЕІ для обробки нижньої плити графітовим ЕІ (а), і обробки нижньої плити металевим ЕІ



$S_1$  – напрям руху графітового ЕІ,  $P_d$  – напрям руху робочої рідини

Рисунок 4.7. Схема обробки пуансона графітовим ЕІ



$S_1$  – напрям руху графітового ЕІ,  $S_2$  – напрям руху металевого ЕІ,  $P_d$  – напрям руху робочої рідини

Рисунок 4.8. Схема обробки металевого ЕІ для обробки матриці графітовим ЕІ (а), і обробки матриці металевим ЕІ

У відповідності до наведеної послідовності обробки визначають початкові розміри графітового ЕІ з урахуванням його зносу та міжелектродного зазору, а також підбирають висоту його робочого пояса.

Таким чином, в загальному випадку, початковий розмір отвору графітового ЕІ в плані  $A_{EI}$  визначатиметься за формулою:

$$A_{EI} = A_n + 2 \cdot \delta - \gamma, \quad (4.1)$$

де  $A_n$  – відповідний розмір в плані пуансона;

$\delta$  – величина міжелектродного зазору між пуансоном і графітовим ЕІ, величину якого визначають за математичними моделями наведеними в розділі 3 визначивши режими обробки в залежності від необхідних параметрів якості обробки;

$\gamma$  – величина знос графітового ЕІ в процесі обробки металевих ЕІ для обробки пуансон тримача.

## 4.2. Висновки

Розроблено послідовність обробки графітовим ЕІ металевих ЕІ та деталей штампа, та наведено алгоритм визначення початкового розміру отвору графітового ЕІ в плані.

## РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД

В розділі наведений порівняльний аналіз варіантів виготовлення отворів за двома різними технологічними процесами. Згідно базового варіанту отвори виготовляються фрезеруванням на металорізальному верстаті з подальшим шліфуванням по контуру на внутрішньо-шліфувальному верстаті.

Запропоновано об'єднати ці дві операції в одну і застосовувати електроерозійну обробку на верстаті розмірної обробки дугою.

Розрахунок економічної ефективності РОД деталей штампа виконується за умов виготовлення елементів деталей штампа розміром в плані 26×30. Довжина частини пуансона, що обробляють 40мм, глибина отвору в деталі штампа 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 деталей штампа базується на наступних умовах:

- за базовий варіант прийнято найбільш розповсюджений метод виготовлення пуансона методами механічної обробки. Для зовнішньої поверхні пуансона фрезерна обробка на універсально фрезерному верстаті кінцевою фрезою з подальшим шліфуванням і внутрішньої поверхні деталі штампа з отвором на універсально фрезерному верстаті кінцевою фрезою з подальшим шліфуванням. Час виконання зазначених операцій згідно норм штучного часу складає для фрезерної операції 27,6 хв, для шліфовальної операції 40 хв. Середня продуктивність для фрезерувальної операції  $M_{баз(c)} = 390 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ , для довбальної операції  $M_{баз(o)} = 30 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ ;

- за проектний варіант обробку здійснюють розмірною обробкою електричною дугою з середньою продуктивністю обробки стержня  $M_{np(c)} = 850 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ , що відповідає силі технологічного струму  $I = 100 \text{ А}$  і статичному тиску робочої рідини  $P_s = 1,2 \text{ МПа}$ , та середньою продуктивністю обробки отвору металевим електродом  $M_{np(c)} = 750 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ , що відповідає

силі технологічного струму  $I = 100 \text{ A}$  і статичному тиску робочої рідини  $P_s = 1,2 \text{ МПа}$ ;

- річний об'єм виробництва деталей штампа способами механічної обробки становить 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	500	500
2	Середня трудомісткість обробки	$t$	хв/шт		
	- пуансон			27,6	19,76
	- отвір		40	10,4	
	Середня трудомісткість обробки	$t$	год/шт		
	- пуансон			0,460	0,279
	- отвір		0,667	0,173	
3	Вартість обробки пуансона і отвору	$T$	грн/шт	180	80
4	Дійсний фонд часу обладнання при однозмінній роботі	$F$	год	2008	2008
5	Вартість обладнання	$K$	грн	185550+800000	700000
6	Виробнича площа, що займає одиниця обладнання	$S$	м <sup>2</sup>	1,527+2,413	2,5
7	Коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу на одну одиницю обладнання	$\kappa_d$	-	1,1	1,1
8	Вартість 1 м <sup>2</sup> виробничої площі	$C_n$	грн/м <sup>2</sup>	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	$\kappa_n$	-	0,9	0,7
11	Вартість однієї кВт/год електроенергії	$C_e$	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	$K_{dz}$	-	1,089	1,089
16	Коефіцієнт завантаження обладнання	$\kappa_{zo}$	-	0,75	0,75
17	Сума витрат на НДР	$E_{НДР}$	грн	-	120 000

Для розрахунку суми капітальних вкладень необхідно визначити: розрахункову та прийнятну кількість потрібного обладнання для обробки деталей штампа за програмою  $n$ ; вартість всього обладнання  $K_{об}$ ; вартість виробничих приміщень  $K_{вн}$ . Дані розрахунки наведено нижче в табл. 5.2

Таблиця 5.2 - Розрахунок суми капітальних вкладень у виробництво

№ пп	Найменування показників	Умовні познач.	Одиниці виміру	Варіанти		Формули, розрахунок
				Базовий	Проектний	
1	Розрахункова кількість обладнання	$H_p^c$ $H_p^o$	шт	0,115 0,166	0,069 0,442	$H_p = \frac{n \cdot t}{F}$ $H_{p(\bar{o})}^c = \frac{500 \cdot 0,46}{2008} = 0,115$ $H_{p(\bar{o})}^o = \frac{500 \cdot 0,667}{2008} = 0,166$ $H_{p(n)}^c = \frac{500 \cdot 0,279}{2008} = 0,069$ $H_{p(n)}^o = \frac{500 \cdot 0,173}{2008} = 0,043$
2	Прийнята кількість обладнання	$H_n^c$ $H_n^o$	шт	1 2	1	-
3	Вартість всього обладнання	$K_{об}$	грн	1 785 550	700 000	$K_{об} = K \cdot H_n$ $K_{об(\bar{o})} = 185\,550 \cdot 1 + 800\,000 \cdot 2 = 1\,785\,550$ $K_{об(n)} = 700\,000 \cdot 1 = 700\,000$
4	Вартість виробничих приміщень	$K_{вн}$	грн	31 447,35	12 375	$K_{вн} = S \cdot \kappa_{\delta} \cdot H_n \cdot \Pi_n$ $K_{вн(\bar{o})} = (1,527 \cdot 1 + 2,413 \cdot 2) \cdot 1,1 \cdot 4500 = 31\,447,35$ $K_{вн(n)} = (2,5 \cdot 1) \cdot 1,1 \cdot 4500 = 12\,375$
5	Загальна сума капітальних вкладень	$K_{кв}$	грн	1 816 997,35	712 375	$K_{кв} = K_{об} + K_{вн}$ $K_{кв(\bar{o})} = 1\,785\,550 + 31\,447,35 = 1\,816\,997,35$ $K_{кв(n)} = 700\,000 + 12\,375 = 712\,375$

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

утриманням виробничою площею  $C_{пл}$ . Дані показники є складовими частинами собівартості одиниці продукції, розрахунок якої наведено у 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	98 010	43 560	$C_{зн} = n \cdot T \cdot K_{дз}$ $C_{зн(б)} = 500 \cdot 180 \cdot 1,089 = 98\ 010$ $C_{зн(п)} = 500 \cdot 80 \cdot 1,089 = 43\ 560$
2	Амортизація, утримання та ремонт обладнання	$C_{ам}$	грн	149 015,16	105 840	$C_{ам} = \frac{K \cdot H_n \cdot (a_a + a_y)}{100}$ $C_{ам(б)} = \frac{(185\ 550 \cdot 1 + 800\ 000 \cdot 1) \cdot (11,48 + 3,64)}{100} = 149\ 015,16$ $C_{ам(п)} = \frac{(700\ 000 \cdot 1) \cdot (11,48 + 3,64)}{100} = 105\ 840$
3	Вартість електроенергії	$C_e$	грн	18 890,21	50 564,70	$C_e = N \cdot \kappa_n \cdot F \cdot H_n \cdot C_e \cdot \kappa_{зо}$ $C_{e(б)} = (3,7 \cdot 1 + 4 \cdot 1) \cdot 0,9 \cdot 2\ 008 \cdot 1,81 \cdot 0,75 = 18\ 890,21$ $C_{e(п)} = (26,5 \cdot 1) \cdot 0,7 \cdot 2\ 008 \cdot 1,81 \cdot 0,75 = 50\ 564,70$
4	Ремонт та утримання виробничої площі	$C_{пл}$	грн	468,07	297	$C_{пл} = \frac{S \cdot \kappa_{д} \cdot H_n \cdot C_n \cdot a_n}{100}$ $C_{пл(б)} = \frac{(1,527 \cdot 1 + 2,413 \cdot 1) \cdot 1,1 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 468,07$ $C_{пл(п)} = \frac{(2,5 \cdot 1) \cdot 1,1 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 297$
5	Собівартість випуску продукції	$C$	грн	364 393,44	200 261,70	$C = C_{зн} + C_{ам} + C_e + C_{пл}$ $C_{(б)} = 2 \cdot 98\ 010 + 149\ 015,16 + 18\ 890,21 + 468,07 = 364\ 393,44$ $C_{(п)} = 1 \cdot 43\ 560 + 105\ 840 + 50\ 564,70 + 297 = 200\ 261,70$

Очікуваний річний економічний ефект від впровадження у виробництво способу РОД визначаємо за формулою, грн

$$\begin{aligned} E_p &= [C_{(\bar{o})} - C_{(n)}] + E_n [K_{кв(\bar{o})} - K_{кв(n)}] = \\ &= (364\,399,44 - 200\,261,70) + 0,15(1\,816\,997,35 - 712\,375) = 329\,831,09 \end{aligned}$$

При цьому коефіцієнт ефективності НДР:

$$K_{ef} = \frac{E_p}{E_{НДР}} = \frac{329831,09}{120\,000} = 2,75$$

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень РОД.
2. Теоретичні дослідження виконано на основі теорії електроерозійної обробки, теорії математичного планування експерименту та засобів математичного моделювання.
3. Експерименти виконано на верстаті для РОД «Дуга-8Г».
4. Теоретично і експериментально досліджено, обґрунтовано і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу: продуктивності, шорсткості обробленої поверхні, міжелектродного зазору, стійкості ЕІ.

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. Розроблено методику розрахунків технологічних процесів. Досліджено і описано технологічні характеристики процесу. Залежно від режиму обробки продуктивність при виготовленні отворів складає  $250...4000\text{мм}^3/\text{хв}$ ; питома продуктивність процесу складає  $5...27\text{мм}^3/\text{Ахв}$ ; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах  $5...12,5\text{мкм}$ ; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах  $75...81\%$ , міжелектродний зазор в межах  $0,045...0,1\text{мм}$ .

Теоретично і експериментально досліджено, обґрунтовано і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу: продуктивності процесу обробки стержнів, шорсткості обробленої поверхні пуансона, точності розмірів пуансона, стійкості ЕІ. Розроблено методику розрахунків технологічних процесів. Досліджено і описано технологічні характеристики процесу. Залежно від режиму обробки продуктивність при виготовленні стержнів складає  $360...4000\text{мм}^3/\text{хв}$ ; питома продуктивність процесу складає  $7...27\text{мм}^3/\text{Ахв}$ ; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах  $3...11\text{мкм}$ ; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах  $0,017...0,13\%$ , міжелектродний зазор в межах  $0,06...0,08\text{мм}$ .

5. Розроблено послідовність обробки графітовим ЕІ металевих ЕІ та деталей штампа, та наведено алгоритм визначення початкового розміру отвору графітового ЕІ в плані.

6. Виконано розрахунок економічної ефективності впровадження способу РОД у виробництво.

## 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. Носуленко В.І., Шмельов В.М. Розмірна обробка металів електричною дугою // Навчальний посібник ПП „Ексклюзив-Систем”, Кропивницький, 2017.
3. Зубцов М. Е. Листовая штамповка: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности “Машины и технология обработки металлов давлением”. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1980. – 432 с.
4. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая штамповка / Под ред. А. Д. Матвеева; Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985–1987. – 544 с.
5. Общемашиностроительные нормативы времени на газовую сварку, газовую, газоелектрическую и кислородно-флюсовую резку черных, коррозионно-стойких и цветных металлов – М. Экономика, 1989. – 171 с.
6. Эсибян Э. М. Выбор способов и оборудования для термической резки металлов // Сварщик. – 1999. – № 3 – С. 4...6.
7. Плазменно-дуговая аппаратура. Эсибян Э. М. “Техніка”, 1971, 164 с.
8. Хильчевский В. В. Новая технология производства и ремонта режущих органов сельскохозяйственных машин // Материалы конф. “Высокоэффективные технологии в машиностроении”. – Харьков: АТМ України. – 1998. – С. 91.
9. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.04. / ТПИ. – Тула, 1977. – 26 с.
10. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М. : Машиностроение, 1985. – 264 с.

11. Боровиков В. П., Боровиков И. П. STATISTICA – статистический анализ и обработка данных в среде Windows – М.: Информационно-издательский дом „Филинь”, 1998. – 608 с.
12. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов.  
методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение: София: Техника, 1980. – 304 с.
13. Солонин Н. С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972.
14. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер. М. – 1987. – 610 с.
15. Охрана труда в машиностроении : Т.1.,2 : Сб. норм.-техн. документов / Сост. А.И.Шуминов. - М: Машиностроение, 1990. - 383 с. , 349с
16. Охрана труда и техника безопасности на предприятии: Информационный обзор. - Дн-ск: Укрметаллургинформ, 2005. - 175 с.

## 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. Носуленко В.І., Шмельов В.М. Розмірна обробка металів електричною дугою // Навчальний посібник ПП „Ексклюзив-Систем”, Кропивницький, 2017.
3. Зубцов М. Е. Листовая штамповка: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности “Машины и технология обработки металлов давлением”. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1980. – 432 с.
4. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая штамповка / Под ред. А. Д. Матвеева; Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985–1987. – 544 с.
5. Общемашиностроительные нормативы времени на газовую сварку, газовую, газoeлектрическую и кислородно-флюсовую резку черных, коррозионно-стойких и цветных металлов – М. Экономика, 1989. – 171 с.
6. Эсибян Э. М. Выбор способов и оборудования для термической резки металлов // Сварщик. – 1999. – № 3 – С. 4...6.
7. Плазменно-дуговая аппаратура. Эсибян Э. М. “Техніка”, 1971, 164 с.
8. Хильчевский В. В. Новая технология производства и ремонта режущих органов сельскохозяйственных машин // Материалы конф. “Высокоэффективные технологии в машиностроении”. – Харьков: АТМ України. – 1998. – С. 91.
9. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.04. / ТПИ. – Тула, 1977. – 26 с.
10. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М. : Машиностроение, 1985. – 264 с.

11. Боровиков В. П., Боровиков И. П. STATISTICA – статистический анализ и обработка данных в среде Windows – М.: Информационно-издательский дом „Филинь”, 1998. – 608 с.

12. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов.

методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение: София: Техника, 1980. – 304 с.

13. Солонин Н. С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972.

14. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер. М. – 1987. – 610 с.

15. Охрана труда в машиностроении : Т.1.,2 : Сб. норм.-техн. документов / Сост. А.И.Шуминов. - М: Машиностроение, 1990. - 383 с. , 349с

16. Охрана труда и техника безопасности на предприятии: Информационный обзор. - Дн-ск: Укрметаллургинформ, 2005. - 175 с.