

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 робочих деталей штампу»

«Dimensional processing of working parts of a stamp using an electric arc»

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи ПМ-24Мз-2

спеціальності 131

«Прикладна механіка»,

_____ Биченко О. С.

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

Биченку Олександр Сергійовичу

1. Тема роботи: «Розмірна обробка електричною дугою робочих 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 робочих 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 робочих 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

_____ Биченко О. С.

АНОТАЦІЯ

Биченко О. С. «Розмірна обробка електричною дугою робочих 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 робочих деталей штампу.

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

Досліджено та описано технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою робочих 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, робочі деталі штампа, електрод-інструмент, технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою

ANNOTATION

BYCHENKO OLEKSANDR. "Dimensional processing of working parts of a stamp 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 working parts of a stamp using an electric arc.

A technology for dimensional processing of working parts of a die by electric arc has been developed, and the possibility of manufacturing working parts of a dividing die with the required quality and accuracy of processing has been tested.

The technological characteristics of the process of Dimensional processing of working parts of a stamp using an electric arc have been studied and described, namely its electrical and hydrodynamic characteristics, 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, working parts of a stamp, electrode-tool, technological characteristics of process of dimensional processing by electric arc.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 6 |
| РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ТА ОБЛАСТІ РАЦІОНАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ РОБОЧИХ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПА | 9 |
| 1.1. Матеріали для виготовлення робочих деталей штампа..... | 9 |
| 1.2. Визначення початкової експлуатаційний шорсткості робочих поверхонь розділових штамів..... | 11 |
| 1.3. Електроерозійна обробка розділових штамів..... | 15 |
| 1.4. Розмірна обробка електричною дугою робочих деталей розділових штамів | 22 |
| РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 22 |
| 2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень..... | 22 |
| 2.2. Обладнання, пристрої, апаратура..... | 28 |
| 2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів..... | 31 |
| 2.4 Охорона праці при роботі на верстатах РОД..... | 35 |
| 2.5. Висновки..... | 36 |
| РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД | 37 |
| 3.1. Визначення технологічних характеристик РОД отворів в матриці..... | 37 |
| 3.2. Визначення технологічних характеристик РОД пуансона..... | 48 |
| 3.3. Висновки..... | 59 |
| РОЗДІЛ 4. РОД РОБОЧИХ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПА | 62 |
| 4.1. Дослідження можливості виготовлення робочих деталей штампа способом РОД | 63 |
| 4.2. Пристрій для експериментальних досліджень..... | 65 |
| 4.3. Висновки..... | 67 |
| РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД | 68 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 73 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 76 |

ВСТУП

Актуальність теми. Все частіше листові деталі, які раніше виготовляли штампуванням в розділових штампах, виготовляють методами плазмового і лазерного різання. Проте зазначені технології є ефективними в одиничному і дрібносерійному виробництві. На виробництвах де превалює крупносерійне і масове виробництво такі деталі економічно ефективніше виготовляти штампуванням в розділових штампах.

Виготовлення розділових штамків є трудомістким і вартісним, а також потребує залучення до їх виготовлення висококваліфікованих спеціалістів. Значну вартість у виготовленні штампа вносить виготовлення його робочих деталей (пуансонів, матриць), які, зазвичай, виготовляють з легованих вуглецевих сталей. Зазвичай такі деталі виготовляють механічною обробкою з подальшою слюсарною підгонкою. Що вимагає значних матеріальних витрат і значних витрат часу.

Для зниження вартості виготовлення розділових штамків необхідно застосувати технології, які дозволять виготовляти їх робочі деталі з найвищою економічною ефективністю.

Широкого розповсюдження для виготовлення робочих деталей розділових штамків набули процеси електроерозійної (електроіскрової та електроімпульсної) обробки. В порівняно з механічною обробкою процеси електроерозійної обробки забезпечують більш високу економічну ефективність виготовлення таких деталей без подальшої слюсарної доводки. Основним недоліком електроіскрової обробки є порівняно невисока продуктивність обробки.

Альтернативою процесу електроіскрової та електроімпульсної обробки є спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД), який дозволяє підвищити продуктивність в 5-10 разів [1], і отримати робочі деталі розділових штамків з високими показниками економічної ефективності необхідних точності і якості обробленої поверхні.

Для застосування процесу РОД при виготовленні робочих деталей штампів необхідно виявлення закономірностей між технологічними характеристиками процесу РОД та якісними показниками поверхні робочих деталей штампів та зазору між ними, а також перевірити можливість виготовити сряжених пар робочих деталей.

Таким чином робота спрямованих на розробку технології виготовлення робочих деталей розділових штампів є актуальним науково-прикладним завданням, що дозволить більш широко застосовувати процес РОД в інструментальному виробництві.

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

Задачі дослідження:

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД та визначення меж його раціонального застосування;
2. Розробка технології обробки деталей робочих 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 робочі деталі штампа заданих розмірів з необхідною якістю обробленої поверхні.

Запропоновано та розроблено технології для розмірної обробки електричною дугою робочих 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 РОБОЧИХ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПА

1.1. Матеріали для виготовлення робочих деталей штампа

В штампах для холодного штампування робочі деталі штампа (пуансон і матрицю), виготовляють з інструментальної сталі; в штампах для гарячого штампування з інструментальної сталі виготовляють або всі деталі, або тільки вставки. В якості матеріал для робочих деталей формозмінюючих штампів використовують інструментальні сталі, тверді сплави, пластмаси та інші матеріали [17].

Вуглецеві інструментальні сталі У7...У10 використовують для виготовлення робочих деталей штампів для холодного штампування, що мають відносно просту форму робочого контуру. Це пов'язано з тим, що такі сталі деформуються при загартовуванні, що призводить до утворення тріщин.

Робочі деталі штампів для холодного штампування, що мають більш складний профіль, виготовляють з сталей марок 9ХС, ХВГ, ХГС та інших.

Робочі деталі штампів для холодного штампування дуже складного профілю виготовляють з сталей марок Х12Ф, Х12Т, Х12М. Ці сталі, наближені за своїми властивостями до швидкорізальних сталей, містять близько 1% вуглецю, 12% хрому і близько 1% ванадію (титану або молібдену), мають високу міцність, зносостійкість, теплостійкість (близько 500 °С). Їх важливою перевагою є мала деформація і, отже, збереження розмірів їх робочого контуру при загартуванні. Недоліками таких сталей є схильність до карбідної неоднорідності і погана оброблюваність методами різання. А також значно вища вартість, наприклад, сталь Х12Ф майже в 25 раз дорожче, ніж сталь У10.

Тонкі і довгі пуанسونи пробивних штампів для холодного штампування та інші нежорсткі деталі виготовляють з сталей марок 4ХС, 5ХС, 4ХВ2С, 5ХВ2С і інші, що мають підвищену в'язкість. Зменшенням вмісту вуглецю в

сталі (не більше 05%) зменшує крихкість, хром і вольфрам підвищують зносостійкість. Теплостійкість таких сталей близько 300 °С; гартують їх в мастилі, наскрізне гартування отримують в деталях діаметром до 50 мм.

Штампи і вставки для гарячого штампування (молотові штампи) виготовляють з сталей марок 5ХНВ, 5ХНТ, 5ХНС, 5ХНСВ, 5ХНМ та інших сталей, що мають підвищену в'язкість при нагріванні. Штампи для гарячого штампування працюють в умовах ударного навантаження деформуючи метал нагрітий до 900-1200 °С. Тому сталі для таких штамсів повинні мати високу в'язкість, теплостійкість і чинити опір утворенню окалини.

Штампи середніх розмірів виготовляють з сталей 5ХНВ, 5ХНС і 5ХНСВ. Вони леговані вольфрамом або кремнієм, за властивостями наближені до сталі 5ХНМ, але володіють меншою прогартуваністю. Твердість таких сталей 37-42 HRC.

Нижче теплостійкість і прогартуваність у сталі 5ХНТ, яку застосовують для виготовлення молотових штамсів малих розмірів (сторона куба до 300мм). Твердість таких штамсів 41-45 HRC.

Робочі деталі штамсів для гарячого штампування (матриці для обрання облою, тонкі прошивні пуансони, ножі для гарячого відрізання і інші), виготовляють з сталей 3Х2В8 4Х2В8 4Х8В8 і інших. Ці сталі володіють високою міцністю, зносостійкістю, теплостійкістю (до 650 °С).

Широкого застосування для виготовлення деталей штамсів для формозмінюючих операцій отримують тверді сплави ВК10, ВК15 ВК20 ВК25 і ВК30. Ці сплави відрізняються від сплавів для ріжучих інструментів, великим вмістом кобальту (10-30%), володіють підвищеною міцністю і в'язкістю, але зниженою твердістю і зносостійкістю.

Твердий сплав застосовують для виготовлення пуансонів і матриць пробивних і вирубних штамсів. Такі штампи застосовують для штампування пластин трансформаторних осердь, статорів і роторів електродвигунів та інші.

1.2. Визначення початкової експлуатаційної шорсткості робочих поверхонь розділових штампів

У сучасному машинобудуванні до 70% деталей одержують листовим штампуванням в розділових штампах. Вартість таких деталей значною мірою визначається вартістю штампа та його стійкістю. Щоб знизити собівартість одержуваних деталей необхідно максимально продовжити термін служби штампа та знизити його вартість. Підвищення терміну служби штампа здійснюють шляхом збільшення стійкості робочих деталей штампа: пуансонів і матриць. Стійкість останніх визначається їх матеріалом, термообробкою, і перш за все величиною зазорів та їх рівномірністю, а отже і точністю їх спряження.

Спряжені робочі деталі штампа, пуансон і матрицю, звичайно отримують способами обробки різанням при значній собівартості штампа, особливо при складній формі робочих деталей штампа, але ці способи не забезпечують достатньої рівномірності зазору між пуансоном і матрицею.

Величина зазору між матрицею і пуансоном штампів для вирубування та пробивання впливає на протікання процесу штампування і на стійкість штампа, а також на якість поверхні зрізу і точність одержуваної деталі. Для кожного матеріалу певної товщини є свої оптимальні зазори. При штампуванні з оптимальними зазорами досягаються мінімальні зусилля вирубування і виходить найбільш задовільна форма зрізу. Розміри деталі, що вирубуютьнабувають найбільш близького значення розмірів матриці, а отвори, що пробивають розмірів пуансона.



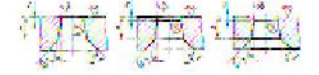
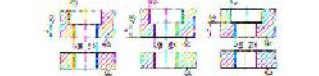
При вирубці (пробиванні) з підвищеним числом ходів преса оптимальна величина зазору повинна бути збільшена в порівнянні з табличними даними. Однак загальна точність виготовлення штампа повинна бути при цьому більш високою, інакше можливе «заїдання» або «зарубание» штампу. Двухсторонні зазори при штампуванні слід вибирати за табл.1.1.

Таблиця 1.1.

| Товщина матеріалу S, мм | Опір зрізу t_{cp} , МПа (кгс/мм ²) | | | | | | | |
|-------------------------------|--|----------------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|----------------|--------------|----------------|
| | До 200 (20) | | Св. 200 до 360 (Св. 20 до 36) | | Св. 360 до 520 (Св. 36 до 52) | | Св. 520 (52) | |
| | Двухсторонній зазор z | | | | | | | |
| | Номін. | Пред. откл. | Номін. | Пред. откл. | Номін. | Пред. откл. | Номін. | Пред. откл. |
| 0,1 | 0,004 | - | 0,005 | - | 0,006 | - | 0,007 | - |
| 0,2 | 0,008 | | 0,010 | +0,010 | 0,012 | + 0,010 | 0,014 | +0,010 |
| 0,3 | 0,012 | 0,015 | 0,018 | | 0,021 | | | |
| 0,4 | 0,016 | 0,020 | 0,024 | | 0,028 | | | |
| 0,5 | 0,020 | +0,010 | 0,025 | 0,030 | 0,035 | +0,020 | 0,042 | +0,020 |
| 0,6 | 0,024 | | 0,030 | 0,036 | 0,042 | | 0,049 | |
| 0,7 | 0,028 | +0,020 | 0,035 | +0,020 | 0,042 | +0,020 | 0,056 | +0,020 |
| 0,8 | 0,032 | | 0,040 | | 0,048 | | 0,056 | |
| 0,9 | 0,036 | | 0,045 | | 0,054 | | 0,063 | |
| 1,0 | 0,040 | +0,020 | 0,050 | +0,030 | 0,060 | +0,030 | 0,070 | +0,030 |
| 1,2 | 0,060 | | 0,070 | | 0,080 | | 0,100 | |
| 1,5 | 0,080 | +0,030 | 0,090 | +0,050 | 0,110 | +0,050 | 0,120 | +0,050 |
| 1,8 | 0,090 | | 0,110 | | 0,130 | | 0,140 | |
| 2,0 | 0,100 | +0,050 | 0,120 | +0,050 | 0,140 | +0,050 | 0,160 | +0,050 |
| 2,2 | 0,130 | | 0,160 | | 0,180 | | 0,200 | |
| 2,5 | 0,150 | | 0,180 | | 0,200 | | 0,230 | |
| 2,8 | 0,170 | +0,050 | 0,200 | +0,100 | 0,220 | +0,100 | 0,250 | +0,100 |
| 3,0 | 0,180 | | 0,210 | | 0,240 | | 0,270 | |
| 3,5 | 0,240 | +0,100 | 0,280 | +0,100 | 0,320 | +0,100 | 0,350 | +0,100 |
| 4,0 | 0,280 | | 0,320 | | 0,360 | | 0,400 | |
| 4,5 | 0,320 | | 0,360 | | 0,450 | | 0,540 | |
| 5,0 | 0,350 | +0,100 | 0,400 | +0,200 | 0,500 | +0,200 | 0,600 | +0,200 |
| 6,0 | 0,420 | | 0,500 | | 0,600 | | 0,700 | |
| 7,0 | 0,490 | +0,200 | 0,700 | +0,200 | 0,900 | +0,200 | 1,000 | +0,200 |
| 8,0 | 0,700 | | 0,800 | | 1,000 | | 1,100 | |
| 9,0 | 0,900 | | 1,100 | | 1,300 | | 1,400 | |
| 10,0 | 1,000 | +0,200 | 1,200 | +0,200 | 1,400 | +0,200 | 1,600 | +0,200 |
| | | | | | | | | |

Профіль, розміри елементів профілю, шорсткість поверхонь робочого отвору матриці для вирубкки і пробивки слідує обирати за табл.1.2.

Таблиця 1.2

| Типи профілей отворів | Профіль отвору | Використання (яке рекомендують) |
|--|---|--|
| 1 |  | Для матриць з отвором до 10 мм і для матриць, у яких відсутні консольно розташовані елементи по контуру отвору |
| 2 |  | Для матриць, у яких є консольно розташовані елементи по контуру отвору |
| 3 |  | Для матриць підвищеної стійкості, точності і при застосуванні складових матриць |
| 4 |  | Для матриць із зворотним виштовхуванням деталі або відходу |
| <p>Примітка. При штампуванні м'яких матеріалів $\sigma_{\text{пр}}$ знаходимо < 200 МПа (20 кгс/мм²) значення шорсткості робочих поверхонь матриць не повинні перевищувати $Ra = 0,10$ мкм.</p> | | |

Двухсторонній зазор повинен бути рівномірно розподілений між пуансоном і матрицею (рис.1.1)

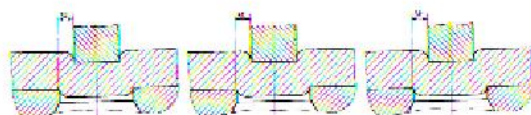
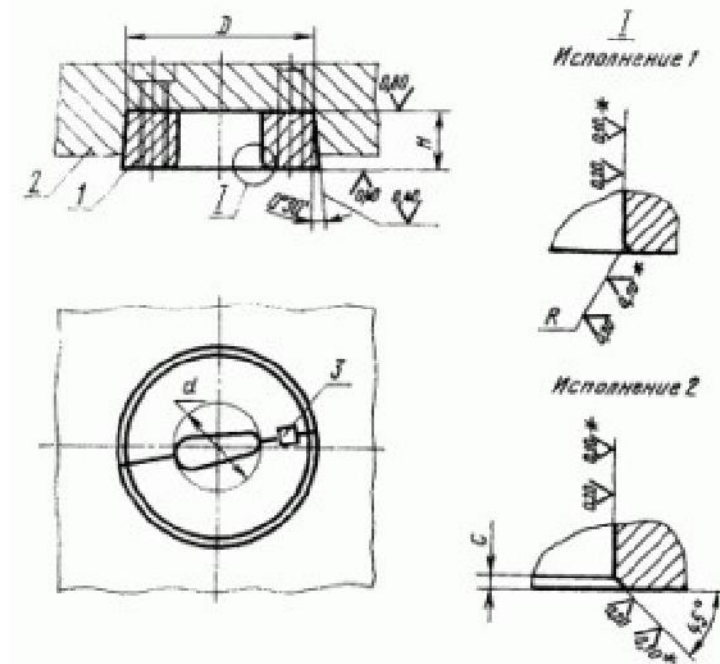


Рисунок 1.1 Двухсторонній зазор

Матриці штампів для чистої штампування (рис. 1.2) повинні відповідати наступним вимогам:



1 – матриця, 2 - обойма, 3 - шпонка , d - умовний діаметр робочого отвори

Рисунок 1.2 Матриці штампів для чистої штампування деталей з шорсткістю поверхні зрізу $Ra = 1,6$ мкм.

Ріжучі кромки пуансонів для пробивання отворів виконують округленими і встановлюють у пуансонотримач з зазором (рис. 1.3).

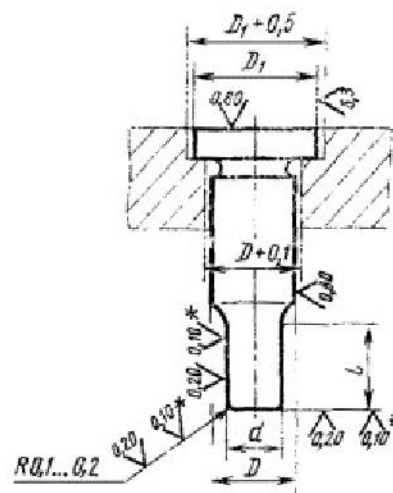


Рисунок.1.3 Пуансон

У пуансон-матриці отвору d_1 під виштовхувач приймають на 0,2 мм більше розміру діаметра виштовхувача (рис.1.4).

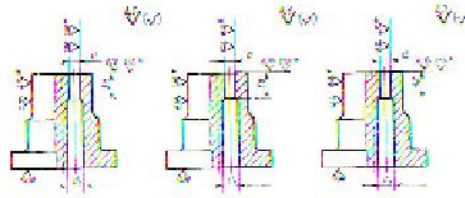


Рисунок 1.4 Пуансон-матриця.

1.3. Електроерозійна обробка розділових штамів

В теперішній час для виготовлення спряжених робочих деталей штампа все частіше застосовують електрофізичні способи, перш за все електроерозійні способи обробки.

Сучасні технології електроерозійної обробки (ЕЕО) пуансонів і матриць дозволяють знизити собівартість виготовлення штампа, отримувати ексцентрисні контури з більш високою точністю, аніж при використанні послідовної обробки пуансонів і матриць в умовах обробки різанням.

ЕЕО широко використовується для вирізування фасонних деталей штамів електрод-дротом, що безперервно рухається [2]. Використання декількох робочих ділянок електрод-дроту, що проходить крізь декілька пар напрямляючих роликів, дозволяє обробляти заготовки конічних та призматичних деталей. Використання цієї схеми дозволяє оброблювати зовнішні та внутрішні поверхні заготовок; зовнішні поверхні, спряжені з внутрішніми, а також внутрішню та зовнішню поверхні однієї заготовки. Але даний процес у ряді випадків не гарантує отримання без ручних підгінних робіт рівномірних зазорів між основними деталями штампа: матрицею та пуансоном; матрицею та виштовхувачем; пуансоном та знімачем. Тому застосовують процеси вирізування робочих контурів одночасно в пуансоні, матриці, знімачі, виштовхувачі, пуансонотримачі, підматричної пластині,

нижній плиті будь-яких типів штампів для вирубування та пробивання з забезпеченням рівномірного зазору між ними при збиранні. Переміщення електрода-дроту здійснюється по контуру, кресленню, чи програмі з застосуванням будь-яких інших пристроїв.

При цьому одним з електродів є оброблювана деталь, другим електродом є інструмент. Розряди між електродами здійснюються періодично, імпульсами так, щоб середовище між ними встигло відновити свою електричну міцність. З метою зменшення ерозії електроду-інструменту (ЕІ) для створення розрядів використовуються уніполярні імпульси струму. Полярність електродів пов'язана із тривалістю імпульсу, оскільки при малій тривалості імпульсу переважає ерозія аноду, а при великій тривалості імпульсу переважає ерозія катоду. Тому на практиці використовуються обидва способи подачі уніполярних імпульсів: з під'єднанням деталі до додатнього полюса генератора імпульсів (так зване під'єднання на пряму полярність), і з під'єднанням деталі до від'ємного полюса (під'єднання на зворотню полярність).

Електричні розряди виникають при пропусканні імпульсного електричного струму в проміжку величиною 0,01...0,05 мм між електродом-заготовкою (ЕЗ) і ЕІ. Під дією електричних розрядів матеріал заготовки плавиться, випаровується і видаляється з між електродного проміжку в рідкому чи пароподібному стані. Такі процеси руйнування електродів (заготовок) носять назву — «електрична ерозія».

Для виготовлення спряжених робочих деталей штампа застосовують традиційні методи – механічну обробку. До того ж відомо, що при отриманні робочих деталей механічною обробкою шорсткість поверхонь на початковому етапі роботи штампу погіршується, порівняно з шорсткістю поверхонь отриманих методами ЕЕО.

Використання робочих поверхонь розділових штампів при вирубуванні та пробиванні, отриманих ЕЕО без якої-небудь наступної доробки дозволяє

знизити трудомісткість виготовлення штампа, та в три – п'ять разів підвищити його зносостійкість [3].

Була експериментально досліджена довговічність поверхонь розділових штампів, підданих ЕЕО, на моделях з перевіркою адекватності моделі натурним зразком. Результати цих досліджень дозволили визначити область зносостійкості штампів, що мають різну шорсткість поверхні після ЕЕО. Було встановлено, що підвищення стійкості поверхні, отриманої ЕЕО, зберігається доти, поки вона не зношується до дна лунок, отриманих у результаті дії електричного розряду. Тому оцінкою довговічності інструмента з поверхнею, підданої ЕЕО, може служити знос поверхневого шару в межах найбільшої висоти мікронерівностей R_{max} . Оцінити довговічність інструмента можна також з використанням середньоарифметичного відхилення профілю Ra отриманого при безпосередніх вимірах. Для експериментальних зразків після ЕЕО $R_{max} / Ra = 5,1...7$, у середньому можна прийняти $R_{max} \approx 6Ra$.

Дослідження показали, що довговічність штампа тим вище, чим більше висота шорсткості поверхні, отриманої при ЕЕО. Дослідження поверхні з великим значенням Ra обмежує задана точність виготовлення штампа, яку можна оцінити величиною робочого зазору Z , що визначається як різниця робочих розмірів матриці і пуансона.

Зазор, що збільшується зі зносом штампа, впливає на зусилля вирубування-пробивання, якість поверхні зрізу, точність одержуваної деталі, знос і стійкість штампа. Величину початкового зазору задають у залежності від механічних властивостей, товщини матеріалу, класу точності деталі, що вирубується чи пробивається, і виражають у відсотках стосовно товщини обумовленого матеріалу.

На основі аналізу даних різних авторів для випадку вирубування чи пробивання низьковуглецевих сталей установлена наявність двох оптимальних зазорів. Перший використовують для одержання високоякісних деталей при зниженій стійкості штампа.

Його початкова однобічна величина складає 2,5 - 5% товщини матеріалу, що вирубується чи пробивається, для товщини 0,2 - 1мм і 3 - 4% для товщини 1,1 -5мм.

Другий оптимальний зазор використовується для одержання гарної і задовільної якості при максимальній стійкості штампа і малих енергетичних витрат процесу вирубування-пробивання. Початкова величина однобічного зазору складає 5 – 11% товщини матеріалу, що вирубується чи пробивається, для товщини 0,2 – 5мм. Гранична величина першого і другого оптимальних зазорів складає 21% товщини матеріалу, що вирубується чи пробивається, для товщини 0,2 – 5мм.

При вирубці зовнішнього контуру і пробиванню отвору величина зносу пуансона впливає на збільшення робочого зазору штампа тільки між переточуванням. Після зішліфування пуансона на висоту його бічного зносу практично відбувається відновлення первісного розміру, тому вплив зносу пуансона на збільшення робочого зазору штампа варто враховувати лише на значній стадії зносу. Основне збільшення робочого зазору штампа відбувається внаслідок зносу матриці, що залежить також від його конструктивних особливостей.

Робоче вікно матриці може бути виконане з вертикальними стінками по усій висоті (рис.1.5, а) з вертикальними стінками на робочому пояску (рис.1.5,б), з невеликим нахилом на робочому пояску, що переходить у великий ухил на провальній частині матриці (рис.1.5, в) чи з загальним ухилом по усій висоті (рис.1.5, г).

Оптимальні значення шорсткості поверхні, одержувані при ЕЕО, визначають виходячи з величини зазору і зв'язку його з допусками на виготовлення матриці, пуансона і деталі, що штампується. Звичайно вважається, що до повного зносу матриці чи пуансона може бути зроблено 15– 20 переточувань. Тому максимальна шорсткість поверхні після ЕЕО повинна бути менше чи дорівнювати половині допуску на знос частини штампа (при вирубці контуру - матриці, при пробиванні - пуансона).

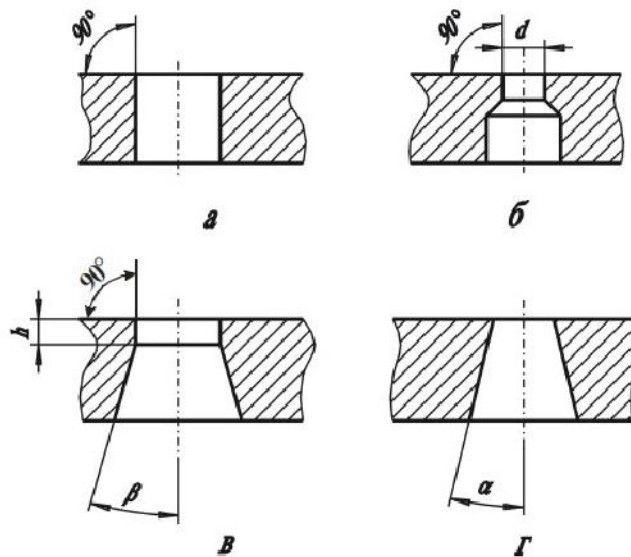


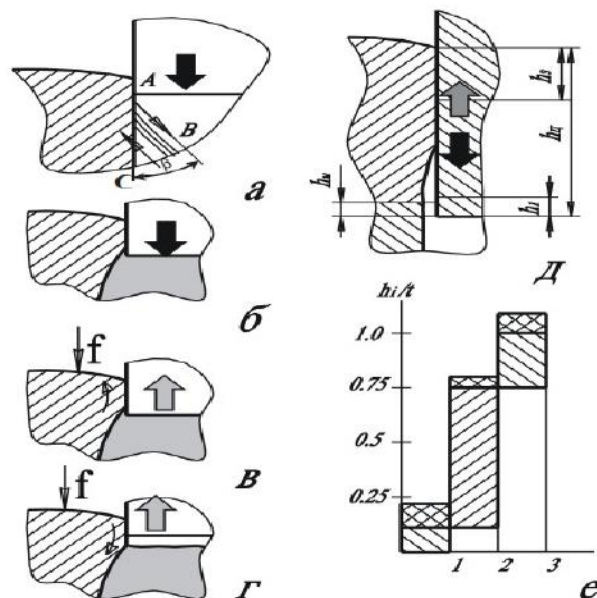
Рисунок 1.5 Різноманітні форми ріжучих частин матриць

Визначення й округлення до тих, що рекомендуються ГОСТом значень величини приведені в табл.1.3. Проміжне значення шорсткості поверхонь деталей, виготовлених ЕЕО, можна визначити для матриць типу а і б (рис.1.6) згідно залежності

$$Ra = 1,4e^{2s}, \quad (1.1)$$

а для матриць типу в и г по залежності

$$Ra = 0,9e^{(1.5 \dots s)s} \quad (1.2)$$



1, 2, 3 – зони характерного зносу бічної поверхні

Рисунок 1.6 Схема взаємодії пуансона і метала, що штампується під час робочого ходу

Були проаналізовані зазори на деталь для великої групи деталей, що вирубуються-пробивається. Для більшості деталей, що вирубуються-пробивається з матеріалу товщиною 0,2...1,2мм, за половину допуску на знос можна прийняти різниця між максимальним другим оптимальним зазором і максимальним початковим зазором на сторону. Для деталей, що вирубуються-пробиваються з матеріалу товщиною 1,5...5,0 мм, половину поля допуску на знос, визначають по допуску на деталь, який буде, як правило, менше різниці між максимальним початковим зазором на сторону і максимальним другим оптимальним зазором і буде складати приблизно 0,1мм, різниці між першим мінімальним і максимальної початковим зазорами на сторону визначає значення половини поля допуску на виготовлення штампа.

Основні недоліки електроерозійної обробки це мала продуктивність (швидкість подачі зазвичай є меншою за 1 мм/хв) і значне електроспоживання. За режимами здійснення електроерозійна обробка поділяється на електроіскрову і електроімпульсну.

Величини допуску приведені в табл.1.3.

Основні недоліки електроерозійної обробки це мала продуктивність (швидкість подачі зазвичай є меншою за 1 мм/хв) і значне електроспоживання. За режимами здійснення електроерозійна обробка поділяється на електроіскрову і електроімпульсну.

На рис.1.7 показано технологічну схему формоутворення пуансона і матриці, коли пуансон 1 і проміжний ЕІ 2 оброблюються методом зворотного копіювання з використанням одного блоку попередніх пластинчатих електродів 3. Потім проміжним ЕІ 2 методом прямого копіювання оброблюється матриця 4. Як наслідок між матрицею і пуансоном утворюється зазор $z_{\text{п}} = \delta_1 - \delta_2 - \delta_3$.

Таблиця 1.3

| Товщина матеріалу, що вирубється чи пробивається, мм | Початковий однобічний зазор, мм | Половина поля допуску на виготовлення, мм | Для конструкцій матриці | | |
|--|---------------------------------|---|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| | | | Позиції на рис.1.1 | Половина поля допуску на знос, мм | Шорсткість, що рекомендується ЕЕО, мм |
| 0,2 | 0,005 | 0,007 | а, б | 0,010 | 1,6 |
| | | | в, г | 0,006 | 1,0 |
| 0,3 | 0,008 | 0,010 | а, б | 0,015 | 2,5 |
| | | | в, г | 0,009 | 1,25 |
| 0,4 | 0,01 | 0,010 | а, б | 0,024 | 4,0 |
| | | | в, г | 0,018 | 2,5 |
| 0,5 | 0,013 | 0,012 | а, б | 0,030 | 5,0 |
| | | | в, г | 0,024 | 2,5 |
| 0,6 | 0,016 | 0,015 | а, б | 0,036 | 5,0 |
| | | | в, г | 0,018 | 2,5 |
| 0,7 | 0,018 | 0,017 | а, б | 0,042 | 6,3 |
| | | | в, г | 0,024 | 4,0 |
| 0,8 | 0,02 | 0,020 | а, б | 0,048 | 8,0 |
| | | | в, г | 0,030 | 4,0 |
| 0,9 | 0,023 | 0,022 | а, б | 0,054 | 8,0 |
| | | | в, г | 0,036 | 5,0 |
| 1,0 | 0,025 | 0,025 | а, б | 0,060 | 10,0 |
| | | | в, г | 0,042 | 6,3 |
| 1,2 | 0,036 | 0,030 | а, б | 0,066 | 10,0 |
| | | | в, г | 0,046 | 6,3 |
| 1,5-5 | 0,045-0,175 | 0,037 0,125 | а, б | 0,083 | 12,5 |
| | | | в, г | 0,063 | 10,0 |

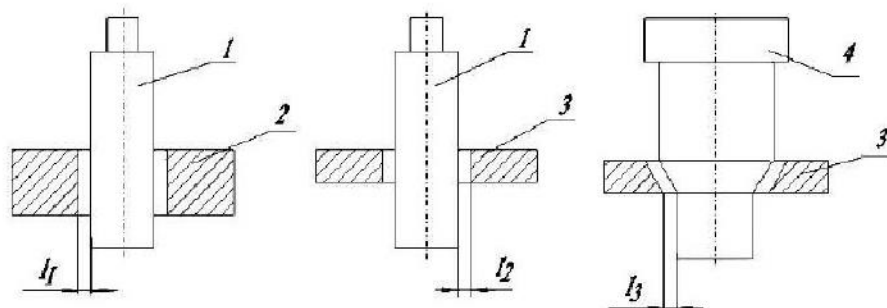


Рисунок 1.7 Технологічна схема формоутворення пуансона і матриці відповідно методами прямого і зворотного копіювання

На рис.1.8 показано технологічну схему формоутворення пуансона і матриці коли матрицю 2 і пластинчаті ЕІ 3 виготовляють методами прямого копіювання ЕІ 1. Пластинчатими ЕІ 3 оброблюється пуансон 4 методом зворотного копіювання.. зазор, що отримується між спряженими деталями, $z_{п} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_a$.

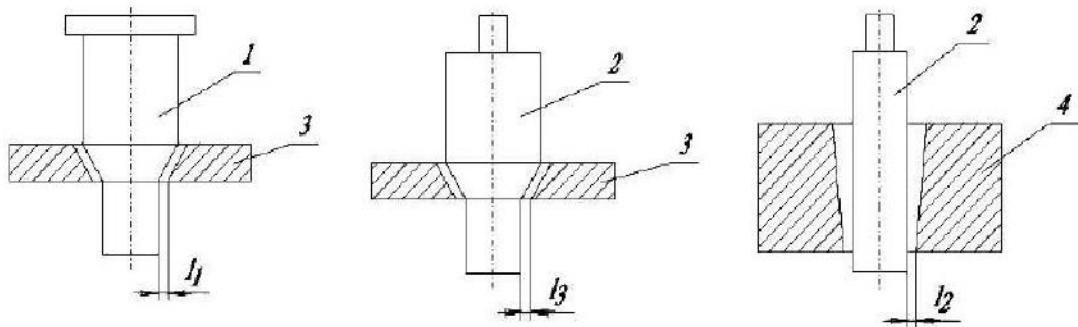


Рисунок 1.8 Технологічна схема формоутворення матриці і проміжного ЕІ методом прямого копіювання, а пуансона – методом зворотного копіювання.

Краща якість спряження пуансона з матрицею забезпечується при застосуванні технологічних схем формоутворення за принципом прошивання матриці пуансоном, при застосуванні способів електроіскрової та електроімпульсної обробки. Хоча ці способи мають трохи більшу продуктивність порівняно з вирізанням електрод-дротом, але все одно продуктивність їх невелика, час виготовлення спряженої пари може сягати доби і більше [3,4].

1.4. Розмірна обробка електричною дугою робочих деталей розділових штамів

Розмірна обробка електричною дугою робочих деталей розділових штамів

В умовах сучасного виробництва робочих деталей розділових штамів високоефективну альтернативу традиційним процесам обробки металів різанням і електроерозійним методам металообробки складає розмірна обробка електричною дугою (РОД). Пояснюється це тим, що обробка робочих деталей розділових штамів традиційними процесами обробки металів різанням низько продуктивний процес, що не забезпечує рівномірність зазору між спряженими парами (пуансоном і матрицею) і потребує подальшої слюсарної доводки, яка є тривалим процесом, що потребує для її реалізації спеціалістів високої кваліфікації. Процеси електроерозійної обробки дозволяють отримувати пуансони і матриці без наступної слюсарної доводки, проте процеси послідовної обробки спряжених

пар пуансонів і матриць 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 робочих деталей розділових 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. [5].

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...2кПа (що відповідає швидкості потоку приблизно 1,5...2м/с). Звичайно РОД здійснюють дуговим розрядом, що горить в поперечному, по суті, потоці робочої рідини (рис. 1.9).

Одержаний таким чином дуговий розряд має високі енергетичні характеристики і переміщується по поверхні електродів. При цьому відбувається інтенсивне локальне руйнування металу за рахунок випаровування і крапельного викидання розплаву, а потік рідини видаляє із зони обробки отримані продукти ерозії. Все це в сукупності забезпечує оптимальне протікання процесу розмірної обробки.

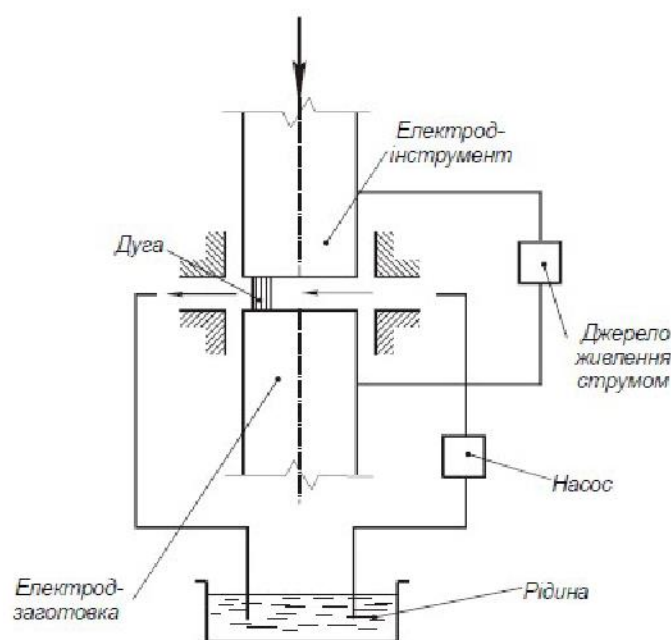


Рисунок 1.9 Принципова схема РОД

Процес РОД порівняно з традиційними способами металообробки (різанням, тиском) забезпечує такі переваги:

1. Вихідний енергоносій (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, штамп).

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.

Для забезпечення необхідного штампувального зазору між пуансоном і матрицею може бути застосований спосіб одержання спряжених пар робочих деталей розділових штампів (СКЗ EI) [11], коли пуансон-інструмент і проміжний пуансон електрод виготовляють методом зворотного копіювання із застосуванням первинного пластинчатого електрода, а матрицю отримують методом прямого копіювання проміжним пуансон-електродом.

Таким чином процес РОД дозволяє підвищити продуктивність виготовлення розділових штампів, та дає можливість отримувати робочі деталі розділових штампів із заданою геометричною точністю, отримувати необхідний зазор між пуансоном і матрицею, забезпечує можливість варіювання зазору в найбільш широких межах, отримувати якість робочої поверхні 5 класу шорсткості, і тому є актуальним.

В зв'язку з викладеними можливостями способу РОД він може бути використаний для виготовлення робочих деталей.

Таким чином робота спрямованих на розробку технології виготовлення робочих деталей штампа є актуальним науково-прикладним завданням, що дозволить більш широко застосовувати процес РОД у інструментальному виробництві.

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

Задачі дослідження:

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

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.

Для обробки робочих деталей розділових штампів спосіб РОД раніше застосовувався не в повному обсязі. Тому необхідні дослідження фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД, розробка технології та пристроїв, приклади реалізації конкретних технологій виготовлення робочих деталей розділових штампів, впровадження цих технологій у виробництво та визначення області раціонального практичного застосування процесу і його конкуренто спроможності порівняно з іншими способами виготовлення робочих деталей розділових штампів.

"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, в рівних частинах: 50% масло "Індустріальне - 12" і 50% гас освітлювальний. 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 геометрії робочої кромки ЕІ на технологічні характеристики процесу. Встановлено, що при

застосуванні уніфікованих ЕІ для визначених технологічних схем формоутворення 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 робочих деталей розділових штампів використано математичні методи планування експерименту [6,7,8,9], 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 робочих деталей розділових штампів. Експериментально досліджено технологічні характеристики процесу, такі як продуктивність, якість обробленої поверхні, що характеризується шорсткістю та глибиною зони термічного впливу, точність обробки, стійкість ЕІ.

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

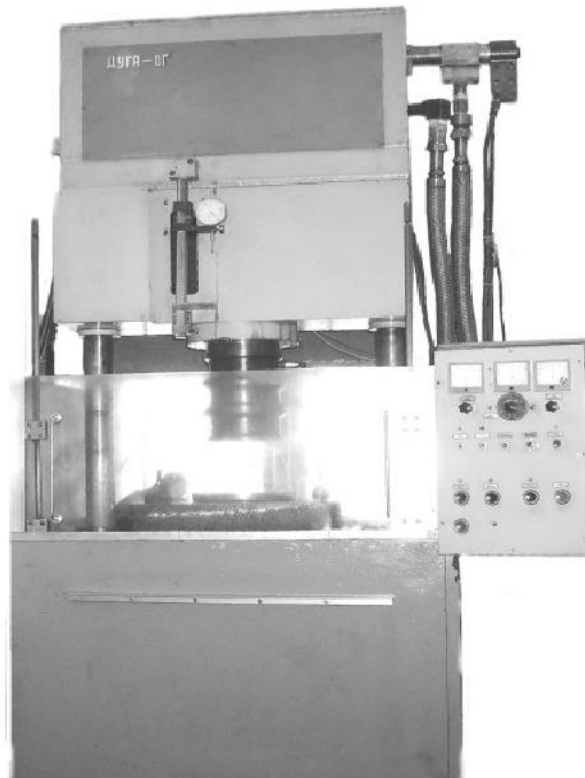


Рисунок 2.1. Універсальний копіювально-прошивний верстат "Дуга-8Г"

2.2. Обладнання, пристрої, апаратура

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

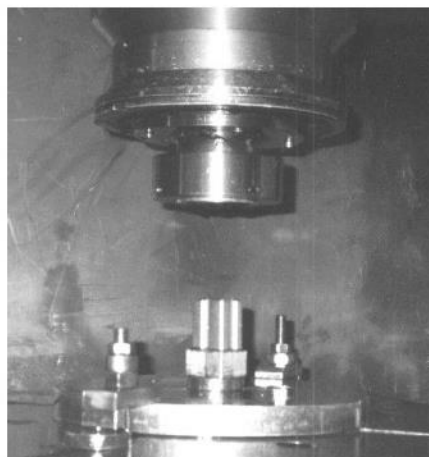


Рис.2.2. Деталь, оброблена в пристрої

Експериментальні дослідження процесу РОД робочих деталей розділових 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 ³ /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 ² | 17 |

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 [10], встановленої на персональному комп'ютері 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.

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 | ± 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 | ± 0,8 МЗР; макс. ±1,2 МЗР |
| Диференційна не лінійність перетворення | ± 0,5 МЗР; макс. ± 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 | ± 0,5 МЗР, макс. 1 МЗР |

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 [7,14]. 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 робочої деталі. На підставі попередньої інформації було відібрано ряд факторів, що впливають на

функцію відгуку: технологічний струм I ($X1$), А; статичний тиск робочої рідини на вході в зазор P_s ($X2$), 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 $I_{max}=200$ А, які при безперервній роботі працюють при $I_{max}=150$ 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 при виготовленні безступеневого пуансона

| Фактори | X_{max} | X_{min} | X_0 | ΔX |
|----------------------------|-----------|-----------|-------|------------|
| Сила току I , А | 150 | 50 | 100 | 50 |
| Статичний тиск P_s , МПа | 14 | 10 | 12 | 12 |

Таблиця 2.3 Матриця планування експерименту

| Номер експерименту | $X1 (I)$ | $X2 (P_s)$ мм ³ /хв | $Y1 (M)$ |
|--------------------|----------|-----------------------------------|----------|
| 1 | - | - | 331,37 |
| 2 | - | 0 | 251,48 |
| 3 | - | + | 199,17 |
| 4 | 0 | - | 1289,23 |
| 5 | 0 | 0 | 978,43 |
| 6 | 0 | + | 774,89 |
| 7 | + | - | 2854,11 |
| 8 | + | 0 | 2166,05 |
| 9 | + | + | 1715,45 |

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, статистична обробка отриманих результатів, побудова та аналіз математичних моделей виконані за допомогою програмного пакету 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

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

де $Y = \lg y$

$$b_{10} = \lg k \quad (k = \text{[10]} \cdot (b_{10}))$$

$$b_1 = \beta_1$$

$$X_1 = \lg I$$

$$b_2 = \beta_2$$

$$X_2 = \lg P_s \text{ і т.д.}$$

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

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

У відповідності з вибраним планом (3^3) було проведено 9 експериментів, кожний з яких виконувався один раз. Розрахунок моделі виконують згідно

відомих методик [2,7] і застосуванням програмного пакету STATISTICA 6.0 [6]. В табл. 2.4–2.5 представлено значення оцінок коефіцієнтів регресії (*BETA*) та значення коефіцієнтів регресії (*B*), значення критерію Стьюдента (*t*) для коефіцієнтів регресії та рівні його значимості (*p*). В табл. 2.4 розраховано значення критерію Фішера (*F*). Побудовано довірчі інтервали ($\pm 95\%$). Позначки в таблицях:

Таблиця 2.4 Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

| STAT. MULTIPLE REGRESS | Regression Summary for Dependent Variable: lg_M (NEW_VIT00) R= ,96913126 R ² = ,93921541 Adjusted R ² = ,93128698 F(3,23)=118,46 p<,00000 Std.Error of estimate: ,06437 | | | | | |
|------------------------|---|------------------|----------|---------------|----------|----------|
| N=9 | BETA | St. Err. of BETA | B | St. Err. of B | t(23) | p-level |
| Intercpt | | | 0,70332 | 0,000023 | 30648,5 | 0,000000 |
| lg I | 0,973689 | 0,000003 | 1,96000 | 0,000006 | 346398,4 | 0,000000 |
| lg P _s | -0,227880 | 0,000003 | -1,51299 | 0,000019 | -81070,1 | 0,000000 |

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; *Intercpt* - 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 прорівність 0 вільного члена регресії; *F* - значення *F*-критерія; *df* - число ступенів свободи *F*- критерія; *p* - рівень значимості; *SS*-квадратичне відхилення середнього експерименту; *BETA* - оцінка коефіцієнта регресії; *B* - значення коефіцієнта регресії.

Відповідно, математична модель в функції двох факторів, мм

$$M = 0,155 \cdot I^{1,96} \cdot P_s^{-1,51}, \quad (2.5)$$

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;

- 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.

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 верстаті для РОД "Дуга-8Г".

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД

3.1. Визначення технологічних характеристик РОД отворів в матриці

Таблиця 3.1 Межі варіювання факторів при виготовленні отворів в матриці

| Фактори | X_{max} | X_{min} | X_0 | ΔX |
|---------------------------|-----------|-----------|-------|------------|
| Сила току I, A | 150 | 50 | 100 | 50 |
| Статичний тиск P_s, MPa | 14 | 10 | 12 | 12 |

Таблиця 3.2 Матриця планування експерименту

| Номер експерименту | $X1(I)$ | $X2(P_s)$ | $Y1(M),$ мм ³ /хв | $Y2(Ra),$ мкм | $Y3(\delta),$ мм | $Y4(\gamma),$ % |
|--------------------|---------|-----------|---------------------------------|------------------|---------------------|--------------------|
| 1 | - | - | 331,37 | 5,8 | 0,15 | 80 |
| 2 | - | 0 | 251,48 | 5,15 | 0,13 | 78,5 |
| 3 | - | + | 199,17 | 4,5 | 0,1 | 77 |
| 4 | 0 | - | 1289,23 | 7,5 | 0,18 | 89 |
| 5 | 0 | 0 | 978,43 | 7,3 | 0,14 | 83 |
| 6 | 0 | + | 774,89 | 7 | 0,11 | 78,5 |
| 7 | + | - | 2854,11 | 9 | 0,2 | 98 |
| 8 | + | 0 | 2166,05 | 8,5 | 0,15 | 89 |
| 9 | + | + | 1715,45 | 8 | 0,12 | 80 |

Продуктивність обробки при зворотній полярності електродів

Таблиця 3.3 Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

| Factor | Regr. Coefficients; Var.:LogM; R-sqr=1.; Adj:1, (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=0 DV: LogM: =Log10(M) | | | | | |
|---------------|---|----------|----------|----------|------------------|------------------|
| | Regressn - Coeff. | Std.Err. | t(6) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean /Interc. | 0,70332 | 0,000023 | 30648,4 | 0,000000 | 0,70326 | 0,70338 |
| LogI(L) | 1,96000 | 0,000006 | 346397,7 | 0,000000 | 1,95999 | 1,96002 |
| LogP(L) | -1,51299 | 0,000019 | -81069,9 | 0,000000 | -1,51304 | -1,51295 |

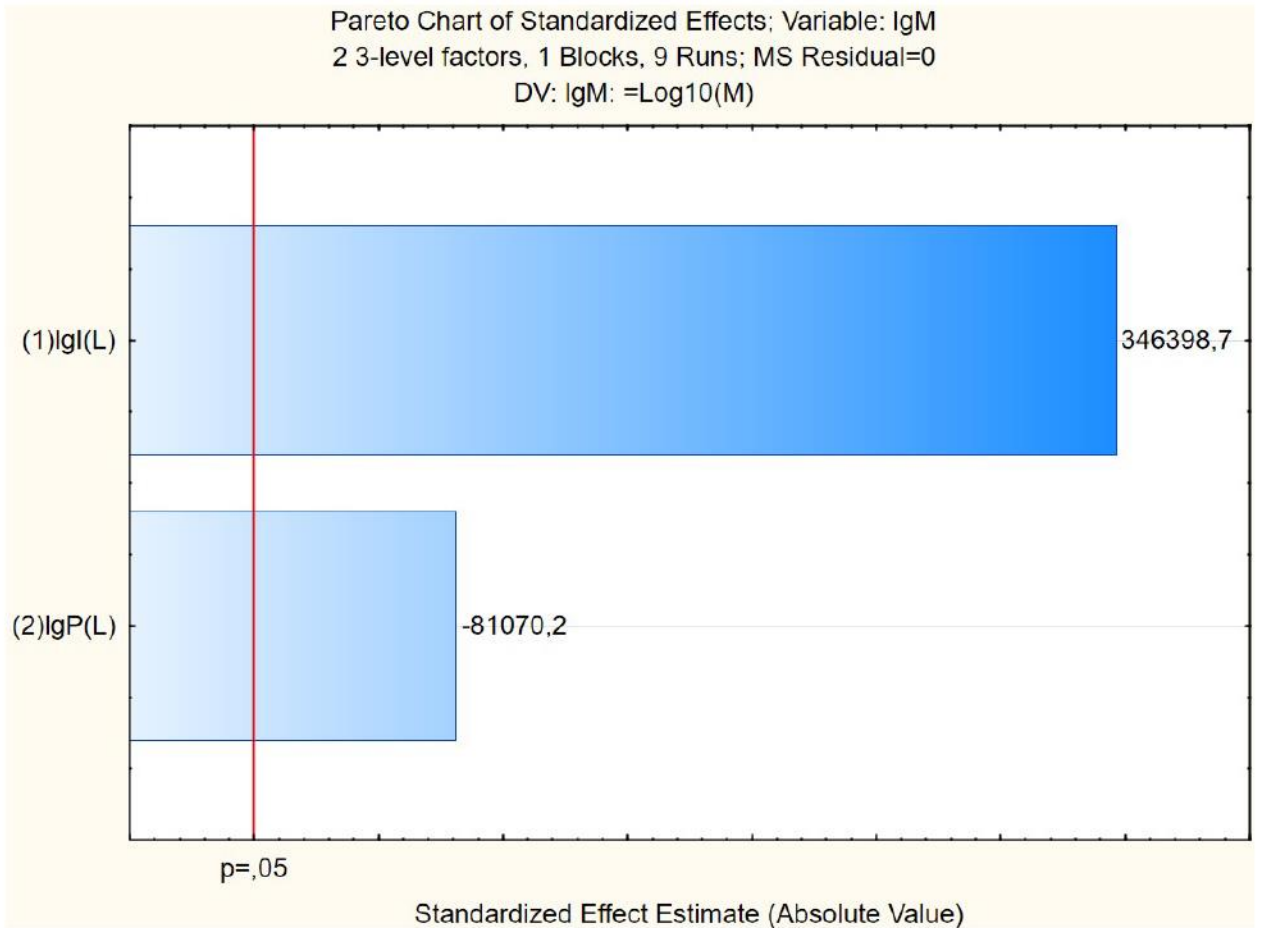


Рисунок 3.1. Карта Порето

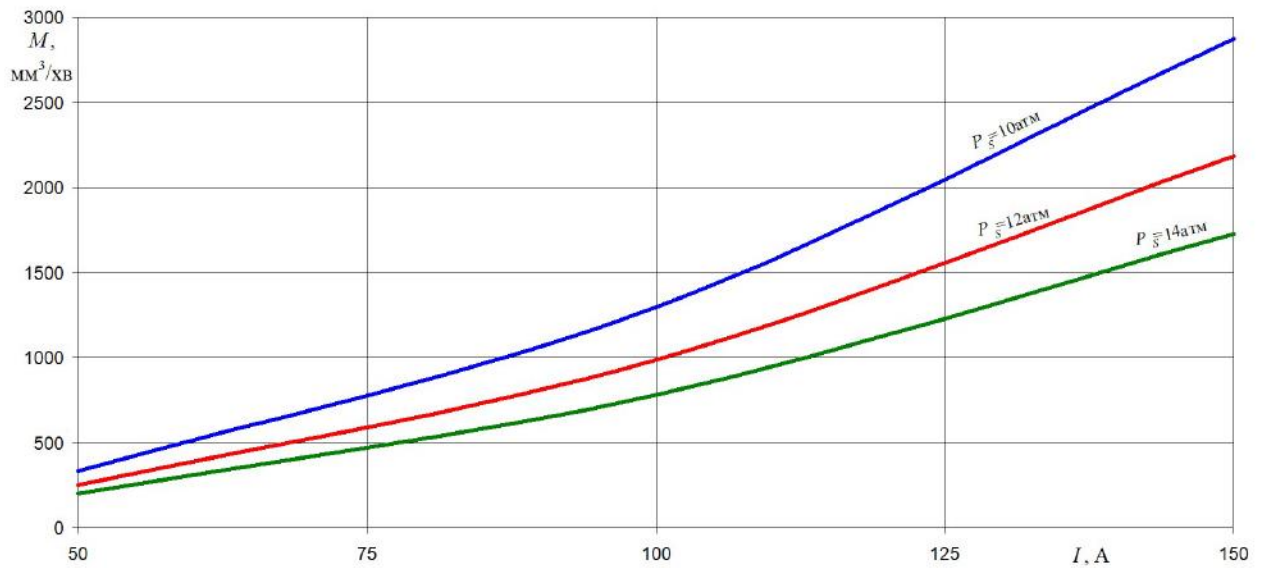


Рисунок 3.2. Залежність продуктивності процесу M при зворотній полярності електродів від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s

Множинна регресія

Таблиця 3.4 Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі

| STAT. MULTIPLE REGRESS | Regression Summary for Dependent Variable: lg_M (NEW_VIT00) R= ,96913126 R?= ,93921541 Adjusted R?= ,93128698 F(3,23)=118,46 p<,00000 Std.Error of estimate: ,06437 | | | | | |
|------------------------------|---|---------------------|----------|------------------|----------|----------|
| N=9 | BETA | St. Err. of BETA | B | St. Err. of B | t(23) | p-level |
| Intercpt | | | 0,70332 | 0,000023 | 30648,5 | 0,000000 |
| lg I | 0,973689 | 0,000003 | 1,96000 | 0,000006 | 346398,4 | 0,000000 |
| lg P _s | -0,227880 | 0,000003 | -1,51299 | 0,000019 | -81070,1 | 0,000000 |

Математична модель в функції двох факторів, мм³/хв

$$M = 5,047 \cdot I^{1,96} \cdot P_s^{-1,51} \quad (3.1)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.5

| Factor | ANOVA; Var.:LogM; R-sqr=1.; Adj:1, (Spreadsheets) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=0 DV: LogM: =Log10(M) | | | | |
|---------------------|---|----|----------|--------------|----------|
| | SS | df | MS | F | p |
| LogI L | 1,341767 | 1 | 1,341767 | 1,199920E+11 | 0,000000 |
| LogP _s L | 0,073493 | 1 | 0,073493 | 6,572374E+09 | 0,000000 |
| Error | 0,000000 | 6 | 0,000000 | | |
| Total SS | 1,415260 | 8 | | | |

Таблиця 3.6

| Factor | Effect Estimates; Var.:LogM; R-sqr=1.; Adj:1, (Spreadsheets) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=0 DV: LogM: =Log10(M) | | | | | | | | | |
|-----------------------|--|----------|---------|----------|---------------------|---------------------|-----------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. - Coeff. | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/ Interc. | 2,877345 | 0,000001 | 2565594 | 0,000000 | 2,877342 | 2,877348 | 2,877345 | 0,000001 | 2,877342 | 2,877348 |
| LogI(L) | 0,935159 | 0,000003 | 346399 | 0,000000 | 0,935152 | 0,935166 | 0,467579 | 0,000001 | 0,467576 | 0,467583 |
| LogP _s (L) | -0,221091 | 0,000003 | -81070 | 0,000000 | -0,221098 | -0,221084 | -0,110545 | 0,000001 | -0,110549 | -0,110542 |

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на продуктивність M процесу РОД матриці при зворотній полярності електродів є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s продуктивність M процесу РОД збільшується (зменшується). В рамках експерименту продуктивність M

процесу РОД матриці при зворотній полярності електродів змінюється в межах від 200 до 3000 мм³/хв.

Шорсткість поверхні матриці при зворотній полярності електродів

Таблиця 3.7 Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

| | Regr. Coefficients; Var.:LogRa; R-sqr=,97454; Adj:,96606 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003547 DV: LogRa: =Log10(Ra) | | | | | |
|-----------------------|---|----------|----------|----------|------------------|------------------|
| | Regressn - Coeff. | Std.Err. | t(6) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | 0,390354 | 0,129243 | 3,02030 | 0,023388 | 0,074107 | 0,706602 |
| LogI(L) | 0,464646 | 0,031867 | 14,58066 | 0,000007 | 0,386670 | 0,542623 |
| LogP _s (L) | -0,434479 | 0,105109 | -4,13359 | 0,006122 | -0,691672 | -0,177285 |

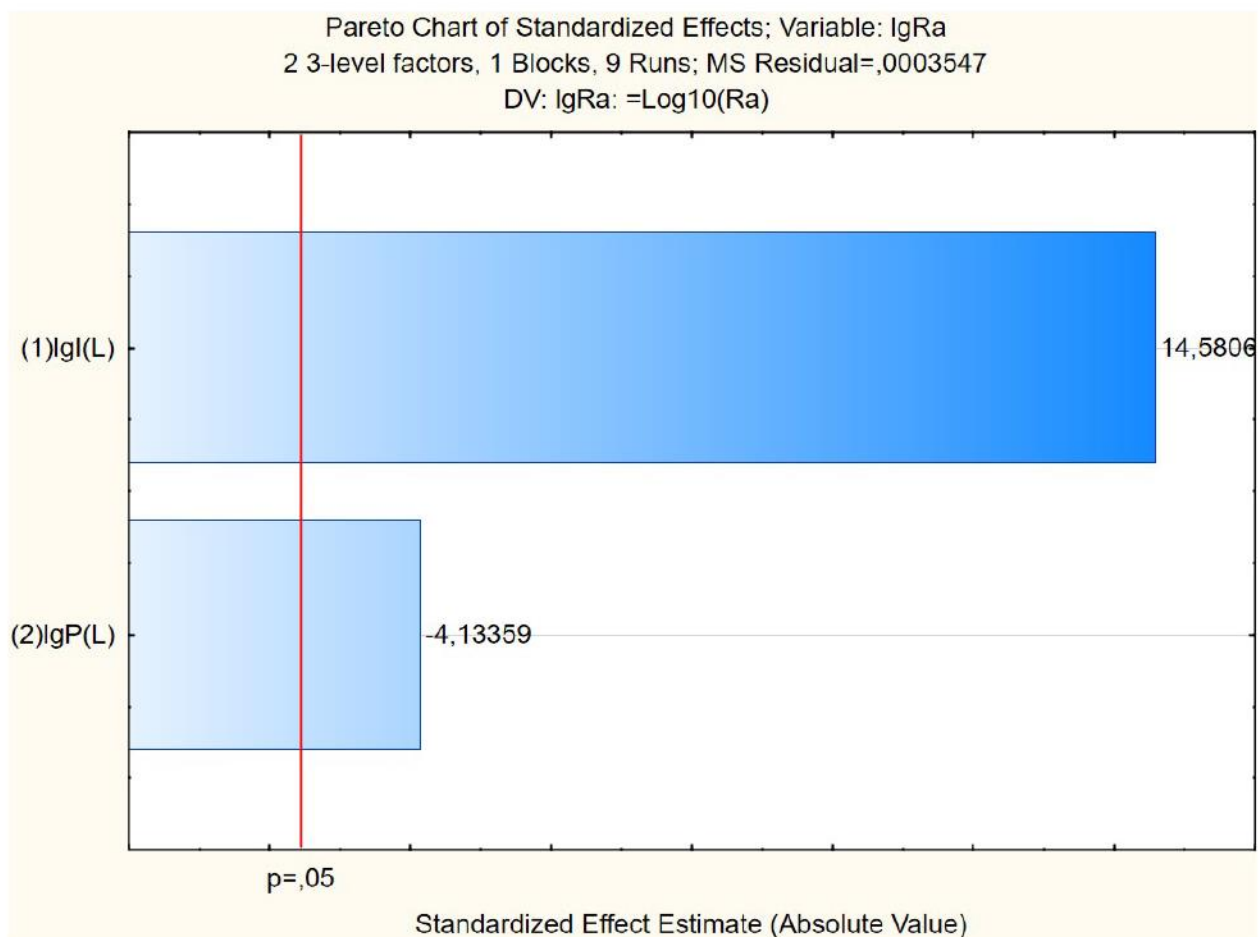


Рисунок 3.3. Карта Порето

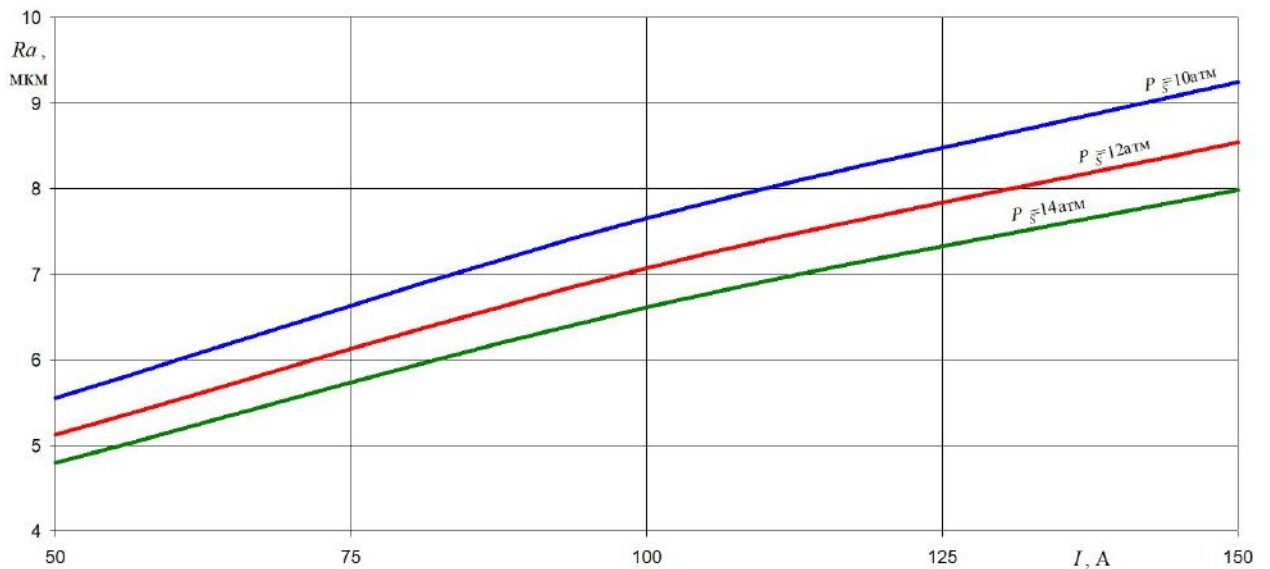


Рисунок 3.4. Залежність шорсткості поверхні матриці Ra при зворотній полярності електродів від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s

Таблиця 3.8 Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

| Regression Summary for Dependent Variable: LogRa (Spreadsheet1) R= ,98718892 R ² = ,97454197 Adjusted R ² = ,96605596 F(2,6)=114,84 p | | | | | | |
|---|-----------|--------------------|-----------|-----------------|----------|----------|
| | Beta | Std.Err. - of Beta | B | Std.Err. - of B | t(6) | p-level |
| Intercept | | | 0,390354 | 0,129243 | 3,02030 | 0,023388 |
| $\text{Log}I$ | 0,949760 | 0,065138 | 0,464646 | 0,031867 | 14,58066 | 0,000007 |
| $\text{Log}P_s$ | -0,269255 | 0,065138 | -0,434479 | 0,105109 | -4,13359 | 0,006122 |

Математична модель в функції двох факторів, μm

$$Ra = 2,454 \cdot I^{0,464} \cdot P_s^{-0,434} \quad (3.2)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.9

| Factor | ANOVA; Var.:LogRa; R-sqr=,97454; Adj.:96606 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003547 DV: LogRa: =Log10(Ra) | | | | |
|-----------------|--|----|----------|----------|----------|
| | SS | df | MS | F | p |
| $\text{Log}I$ | 0,075406 | 1 | 0,075406 | 212,5955 | 0,000007 |
| $\text{Log}P_s$ | 0,006061 | 1 | 0,006061 | 17,0865 | 0,006122 |
| Error | 0,002128 | 6 | 0,000355 | | |
| Total SS | 0,083595 | 8 | | | |

Таблиця 3.10

| Factor | Effect Estimates; Var.:LogRa; R-sqr=,97454; Adj:,96606 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003547 DV: LogRa: =Log10(Ra) | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|----------|----------|----------|------------------|------------------|-----------|-------------------|------------------|------------------|
| | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. - Coeff. | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/ Interc. | 0,824397 | 0,006316 | 130,5172 | 0,000000 | 0,808942 | 0,839853 | 0,824397 | 0,006316 | 0,808942 | 0,839853 |
| LogI(L) | 0,221693 | 0,015205 | 14,5807 | 0,000007 | 0,184488 | 0,258897 | 0,110846 | 0,007602 | 0,092244 | 0,129448 |
| LogP _s (L) | -0,063490 | 0,015359 | -4,1336 | 0,006122 | -0,101073 | -0,025906 | -0,031745 | 0,007680 | -0,050536 | -0,012953 |

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на шорсткість поверхні матриці Ra при зворотній полярності електродів є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s шорсткість поверхні матриці Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткість поверхні матриці Ra при зворотній полярності електродів змінюється в межах від 4,5 до 9,5 мкм.

Міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею при зворотній полярності електродів

Таблиця 3.11 Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

| | Regr. Coefficients; Var.:Log δ ; R-sqr=,98033; Adj:,97377 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0002474 DV: Log δ : =Log10(δ) | | | | | |
|--------------------------|---|----------|----------|----------|------------------|------------------|
| | Regressn - Coeff. | Std.Err. | t(6) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | 0,27812 | 0,107947 | 2,5764 | 0,041971 | 0,01398 | 0,54225 |
| (1)LogI(L) | 0,18421 | 0,026616 | 6,9209 | 0,000450 | 0,11908 | 0,24933 |
| (2)LogP _s (L) | -1,39114 | 0,087789 | -15,8464 | 0,000004 | -1,60595 | -1,17633 |

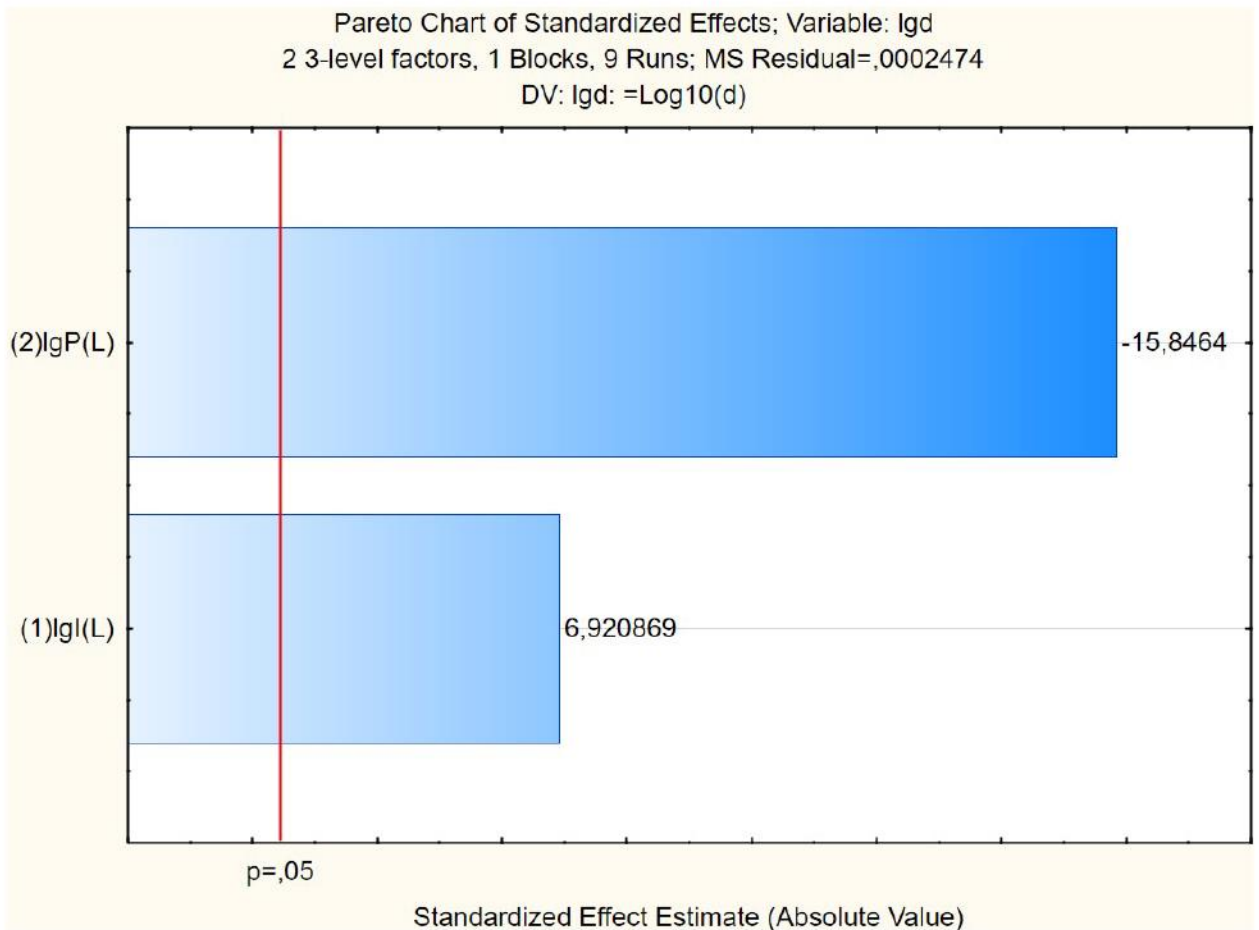


Рисунок 3.5. Карта Порето

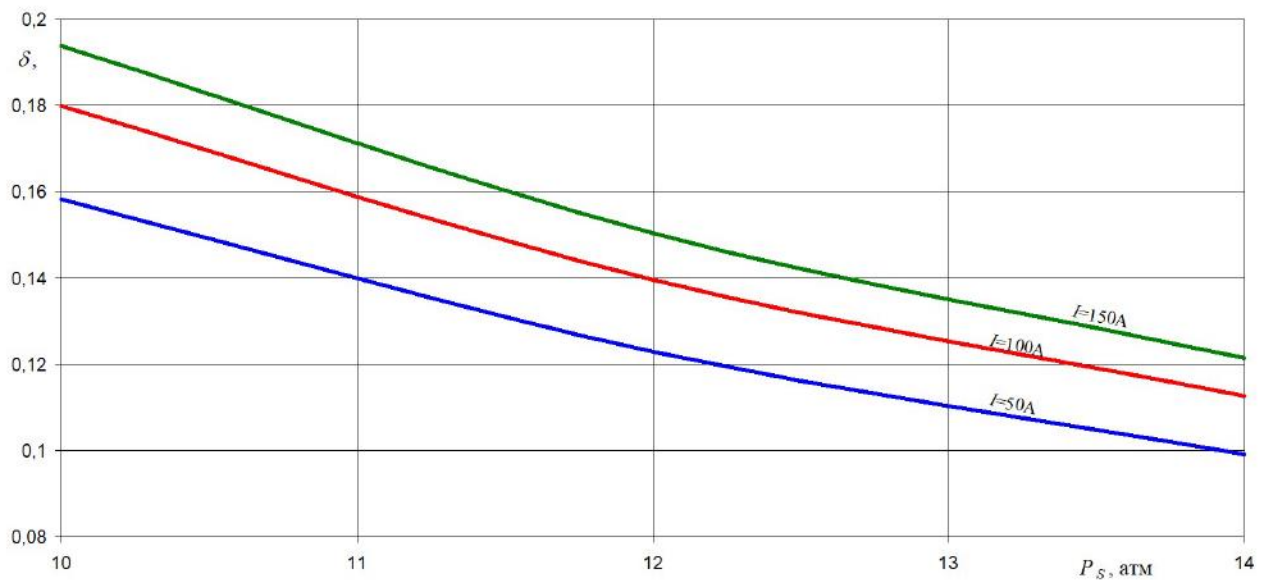


Рисунок 3.6. Залежність міжелектродного зазору між ЕІ та матрицею δ при зворотній полярності електродів від статичного тиску робочої рідини P_s та сили технологічного струму I

Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

Таблиця 3.12

| Regression Summary for Dependent Variable: Log δ (Spreadsheet1) R= ,99011528 R?= ,98032827 Adjusted R?= ,97377103 F(2,6)=149,50 p | | | | | | |
|---|-----------|--------------------|----------|-----------------|----------|----------|
| | Beta | Std.Err. - of Beta | B | Std.Err. - of B | t(6) | p-level |
| Intercept | | | 0,27812 | 0,107947 | 2,5764 | 0,041971 |
| <i>LogI</i> | 0,396284 | 0,057259 | 0,18421 | 0,026616 | 6,9209 | 0,000450 |
| <i>LogP_s</i> | -0,907352 | 0,057259 | -1,39114 | 0,087789 | -15,8464 | 0,000004 |

Математична модель в функції двох факторів, мм

$$\delta = 1,896 \cdot I^{0,184} \cdot P_s^{-1,391} \quad (3.3)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.13

| Factor | ANOVA; Var.:Log δ ; R-sqr=,98033; Adj:,.97377 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0002474 DV: Log δ : =Log10(δ) | | | | |
|---------------------------|--|----|----------|----------|----------|
| | SS | df | MS | F | p |
| <i>LogI L</i> | 0,011852 | 1 | 0,011852 | 47,8984 | 0,000450 |
| <i>LogP_s L</i> | 0,062132 | 1 | 0,062132 | 251,1078 | 0,000004 |
| <i>Error</i> | 0,001485 | 6 | 0,000247 | | |
| <i>Total SS</i> | 0,075468 | 8 | | | |

Таблиця 3.14

| Factor | Effect Estimates; Var.:Log δ ; R-sqr=,98033; Adj:,.97377 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0002474 DV: Log δ : =Log10(δ) | | | | | | | | | |
|----------------------------|---|----------|----------|----------|---------------------|---------------------|-----------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. - Coeff. | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/Interc | -0,857762 | 0,005276 | -162,592 | 0,000000 | -0,870671 | -0,844854 | -0,857762 | 0,005276 | -0,870671 | -0,844854 |
| <i>LogI(L)</i> | 0,087889 | 0,012699 | 6,921 | 0,000450 | 0,056815 | 0,118963 | 0,043945 | 0,006350 | 0,028408 | 0,059481 |
| <i>LogP_s(L)</i> | -0,203285 | 0,012828 | -15,846 | 0,000004 | -0,234675 | -0,171895 | -0,101642 | 0,006414 | -0,117338 | -0,085947 |

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею δ при зворотній полярності електродів є статичний тиск робочої рідини P_s .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I . При зменшені (збільшені) сили технологічного струму I і при збільшені

(зменшені) статичного тиску робочої рідини P_S міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею δ збільшується (зменшується). В рамках експерименту міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею δ при зворотній полярності електродів змінюється в межах від 0,1 до 0,2 мм.

Знос ЕІ при обробці матриці на зворотній полярності електродів

Таблиця 3.15 Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

| | Regr. Coefficients; Var.:Log _γ ; R-sqr=,85639; Adj:,80852 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0002332 DV: Log _γ =Log ₁₀ (γ) | | | | | |
|--------------------------|---|----------|----------|----------|------------------|------------------|
| | Regressn - Coeff. | Std.Err. | t(6) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | 2,098183 | 0,104804 | 20,02006 | 0,000001 | 1,841736 | 2,354629 |
| (1)LogI(L) | 0,108687 | 0,025841 | 4,20594 | 0,005649 | 0,045456 | 0,171918 |
| (2)LogP _s (L) | -0,362526 | 0,085234 | -4,25333 | 0,005360 | -0,571085 | -0,153967 |

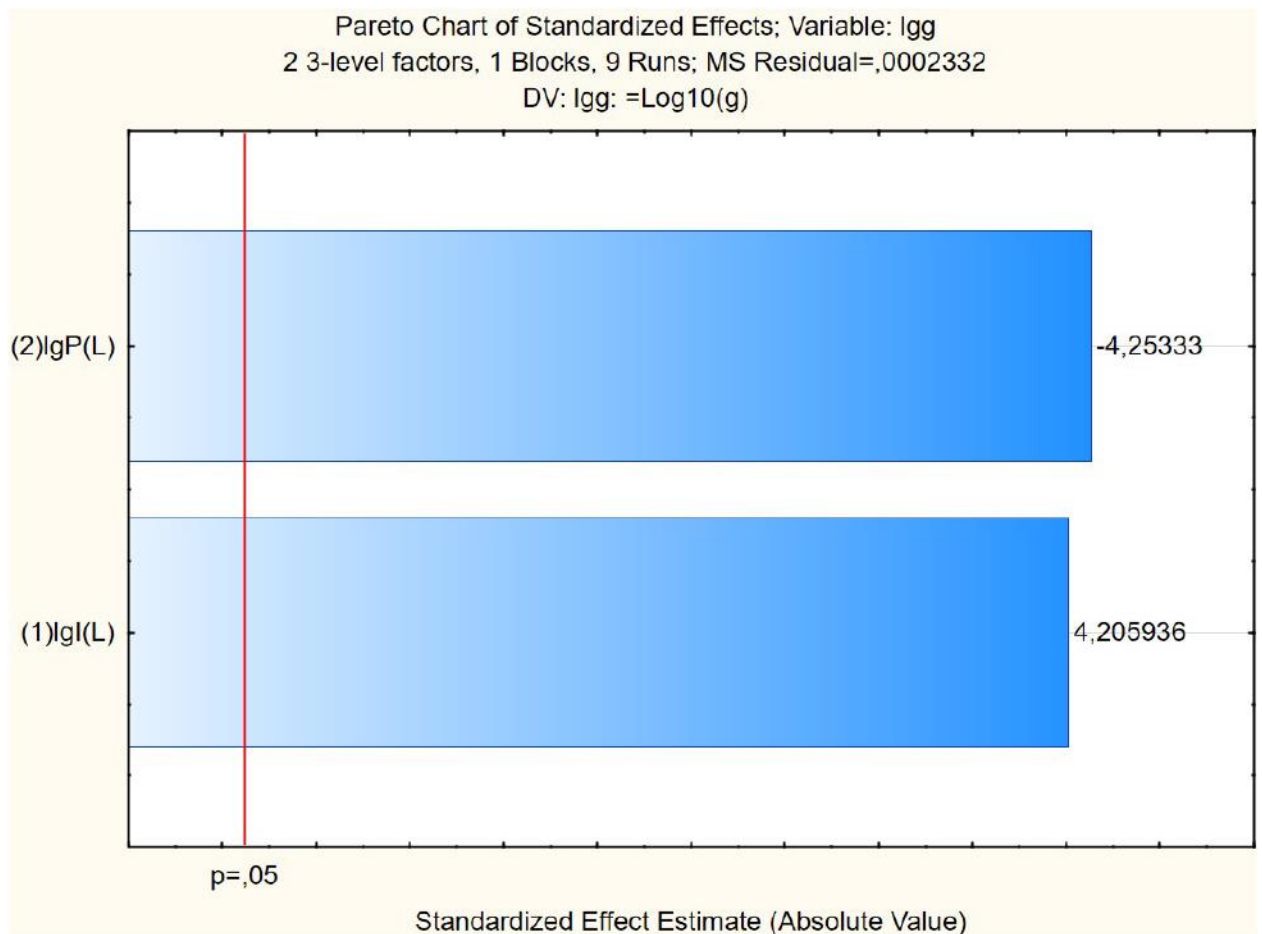


Рисунок 3.7. Карта Порето

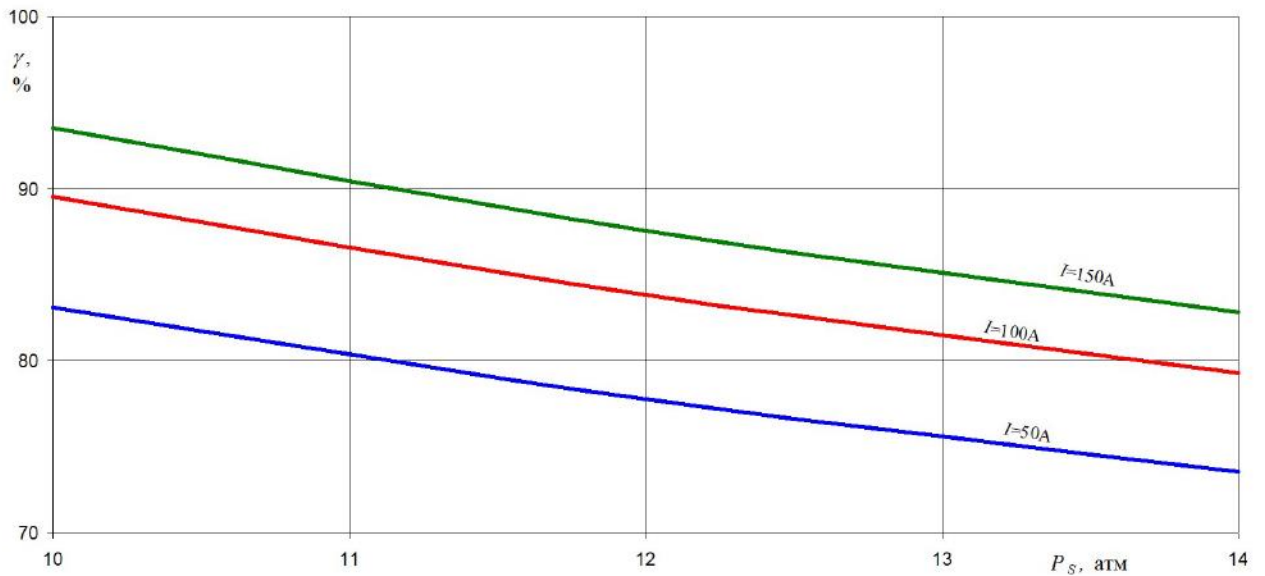


Рисунок 3.8. Залежність зносу ЕІ γ при обробці матриці на зворотній полярності електродів від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s

Таблиця 3.16 Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

| Regression Summary for Dependent Variable: $\text{Log}\gamma$ (Spreadsheet1) $R = ,92541500$ $R^2 = ,85639292$ Adjusted $R^2 = ,80852389$ $F(2,6) = 17,890$ p | | | | | | |
|--|-----------|--------------------|-----------|-----------------|----------|----------|
| | Beta | Std.Err. - of Beta | B | Std.Err. - of B | t(6) | p-level |
| Intercept | | | 2,098183 | 0,104804 | 20,02006 | 0,000001 |
| $\text{Log}I$ | 0,650691 | 0,154708 | 0,108687 | 0,025841 | 4,20594 | 0,005649 |
| $\text{Log}P_s$ | -0,658023 | 0,154708 | -0,362526 | 0,085234 | -4,25333 | 0,005360 |

Математична модель в функції двох факторів, мм

$$\gamma = 125,314 \cdot I^{0,108} \cdot P_s^{-0,362} \quad (3.4)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.17

| Factor | ANOVA; Var.: $\text{Log}\gamma$; R-sqr=,85639; Adj:,80852 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0002332 DV: $\text{Log}\gamma$: = $\text{Log}10(\gamma)$ | | | | |
|-----------------|---|----|----------|----------|----------|
| | SS | df | MS | F | p |
| $\text{Log}I$ | 0,004126 | 1 | 0,004126 | 17,68989 | 0,005649 |
| $\text{Log}P_s$ | 0,004219 | 1 | 0,004219 | 18,09078 | 0,005360 |
| Error | 0,001399 | 6 | 0,000233 | | |
| Total SS | 0,009745 | 8 | | | |

Таблиця 3.18

| Factor | Effect Estimates; Var.:Log γ ; R-sqr=,85639; Adj.:80852 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0002332 DV: Log γ : =Log10(γ) | | | | | | | | | |
|-----------------------|---|----------|----------|----------|------------------|------------------|-----------|-------------------|------------------|------------------|
| | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. - Coeff. | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/Interc | 1,919753 | 0,005122 | 374,8065 | 0,000000 | 1,907220 | 1,932286 | 1,919753 | 0,005122 | 1,907220 | 1,932286 |
| LogI(L) | 0,051857 | 0,012329 | 4,2059 | 0,005649 | 0,021688 | 0,082026 | 0,025928 | 0,006165 | 0,010844 | 0,041013 |
| LogP _s (L) | -0,052975 | 0,012455 | -4,2533 | 0,005360 | -0,083452 | -0,022499 | -0,026488 | 0,006228 | -0,041726 | -0,011249 |

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на знос ЕІ γ при обробці матриці на зворотній полярності електродів є статичний тиск робочої рідини P_s .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s знос ЕІ γ збільшується (зменшується). В рамках експерименту знос ЕІ γ при обробці матриці на зворотній полярності електродів змінюється в межах від 70 до 95 %.

3.2. Визначення технологічних характеристик РОД пуансона

Таблиця 3.19 Межі варіювання факторів при виготовлені пуансона

| Фактори | X_{max} | X_{min} | X_0 | ΔX |
|--|-----------|-----------|-------|------------|
| Сила технологічного $I (X_1)$, А | 400 | 100 | 250 | 150 |
| Статичний тиск рідини на вході в зазор $P_s (X_2)$, атм | 14 | 10 | 12 | 2 |
| Висота робочого пояса ЕІ $h(X_3)$, мм | 1,5 | 0,5 | 1,0 | 0,5 |

Таблиця 3.20 Матриця планування експерименту

| Номер експерименту | $X1(I)$ | $X2(P_s)$ | $X3(h)$ | $Y1(M)$, мм ³ /хв | $Y2(Ra)$, мкм | $Y3(\delta)$, мм | $Y4(\gamma)$, % |
|--------------------|---------|-----------|---------|----------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 1 | + | + | + | 4661,900 | 12,1 | 0,3 | 0,208 |
| 2 | - | + | - | 1711,365 | 3,8 | 0,205 | 0,065 |
| 3 | + | - | + | 8062,942 | 12,8 | 0,7 | 0,257 |
| 4 | - | - | - | 2358,500 | 4,8 | 0,4 | 0,08 |
| 5 | - | - | + | 2127,583 | 11,5 | 0,3 | 0,135 |
| 6 | - | + | + | 1679,463 | 10,7 | 0,192 | 0,109 |
| 7 | + | + | - | 6514,100 | 4,8 | 0,55 | 0,124 |
| 8 | + | - | - | 8432,586 | 5,6 | 0,45 | 0,153 |
| 9 | + | - | 0 | 8366,300 | 9,2 | 0,6 | 0,212 |
| 10 | - | + | 0 | 1695,414 | 6,7 | 0,197 | 0,09 |
| 11 | - | - | 0 | 2277,061 | 7,8 | 0,5 | 0,111 |
| 12 | + | + | 0 | 5740,858 | 8,4 | 0,4 | 0,172 |
| 13 | 0 | 0 | - | 5265,191 | 4,8 | 0,5 | 0,11 |
| 14 | 0 | 0 | + | 5074,614 | 12,5 | 0,5 | 0,184 |
| 15 | 0 | + | + | 3286,632 | 12,0 | 0,246 | 0,167 |
| 16 | + | 0 | + | 6901,900 | 12,5 | 0,4 | 0,229 |
| 17 | 0 | + | 0 | 4308,960 | 7,6 | 0,297 | 0,138 |
| 18 | + | 0 | 0 | 6947,594 | 8,6 | 0,5 | 0,189 |
| 19 | - | 0 | 0 | 1914,301 | 7,1 | 0,4 | 0,099 |
| 20 | 0 | - | 0 | 5543,084 | 8,3 | 0,55 | 0,17 |
| 21 | 0 | - | - | 5695,543 | 5,2 | 0,425 | 0,123 |
| 22 | - | 0 | - | 2095,681 | 4,0 | 0,4 | 0,071 |
| 23 | 0 | + | - | 4622,130 | 4,3 | 0,378 | 0,099 |
| 24 | + | 0 | - | 7690,090 | 5,1 | 0,5 | 0,136 |
| 25 | 0 | - | + | 5322,880 | 12,7 | 0,5 | 0,206 |
| 26 | - | 0 | + | 1896,666 | 11,0 | 0,3 | 0,12 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 5188,622 | 7,9 | 0,65 | 0,152 |

Продуктивність обробки

Таблиця 3.21 Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

| Factor | Regr. Coefficients; Var.:Lg_M; R-sqr=,93922; Adj:;93129 (Пуансон.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0041433 DV: Lg_M: =Log10(M) | | | | | |
|---------------|--|----------|----------|----------|------------------|------------------|
| | Regressn – Coeff. | Std.Err. | t(23) | P | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/ Interc. | 2,495560 | 0,136898 | 18,22934 | 0,000000 | 2,21237 | 2,778755 |
| Lg_I | 0,922209 | 0,026972 | 34,19104 | 0,000000 | 0,86641 | 0,978005 |
| Lg_{Ps} | -0,972601 | 0,112899 | -8,61476 | 0,000000 | -1,20615 | -0,739051 |
| Lg_h | -0,112539 | 0,034229 | -3,28781 | 0,003223 | -0,18335 | -0,041731 |

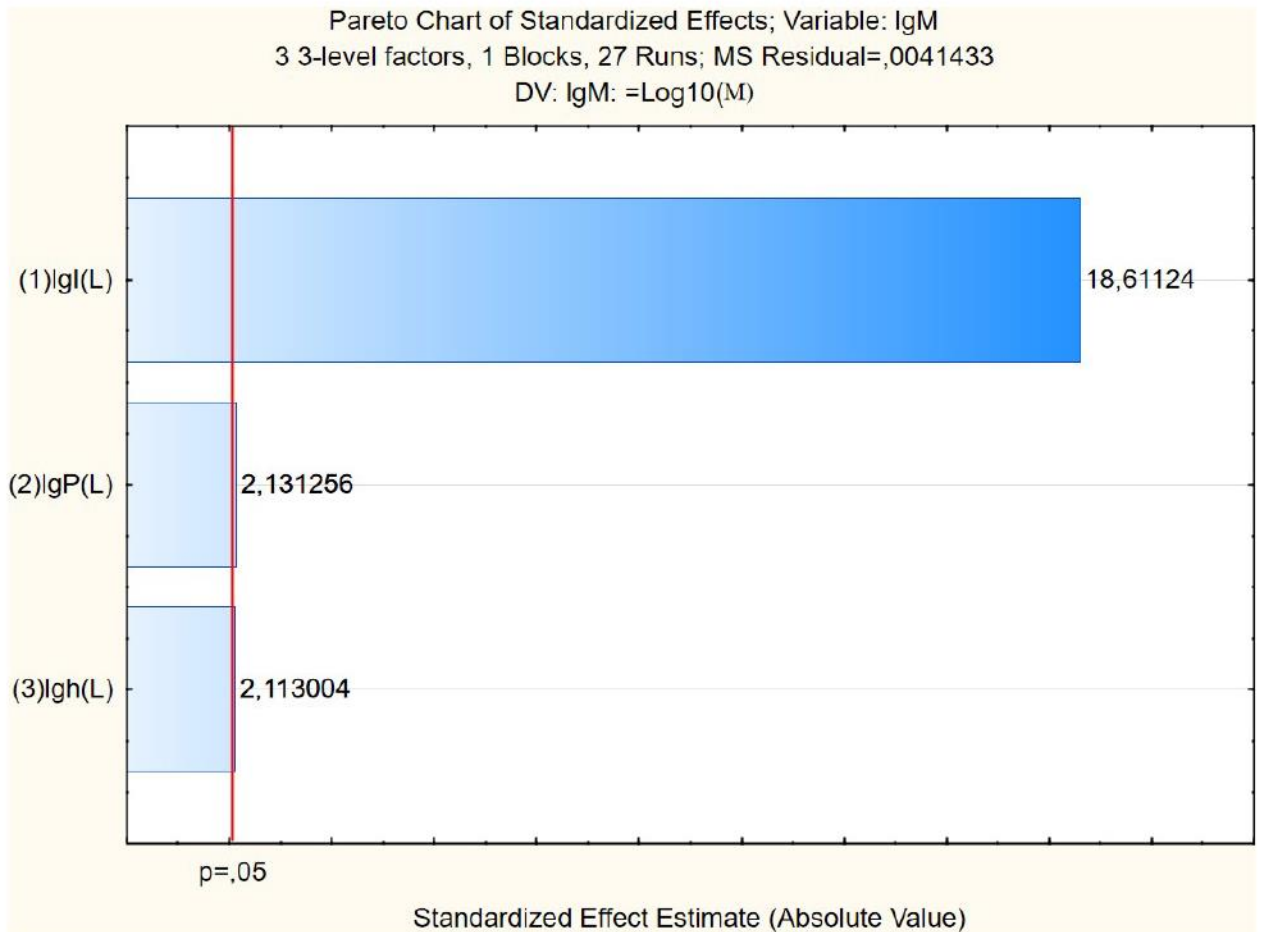


Рисунок 3.9. Карта Порето

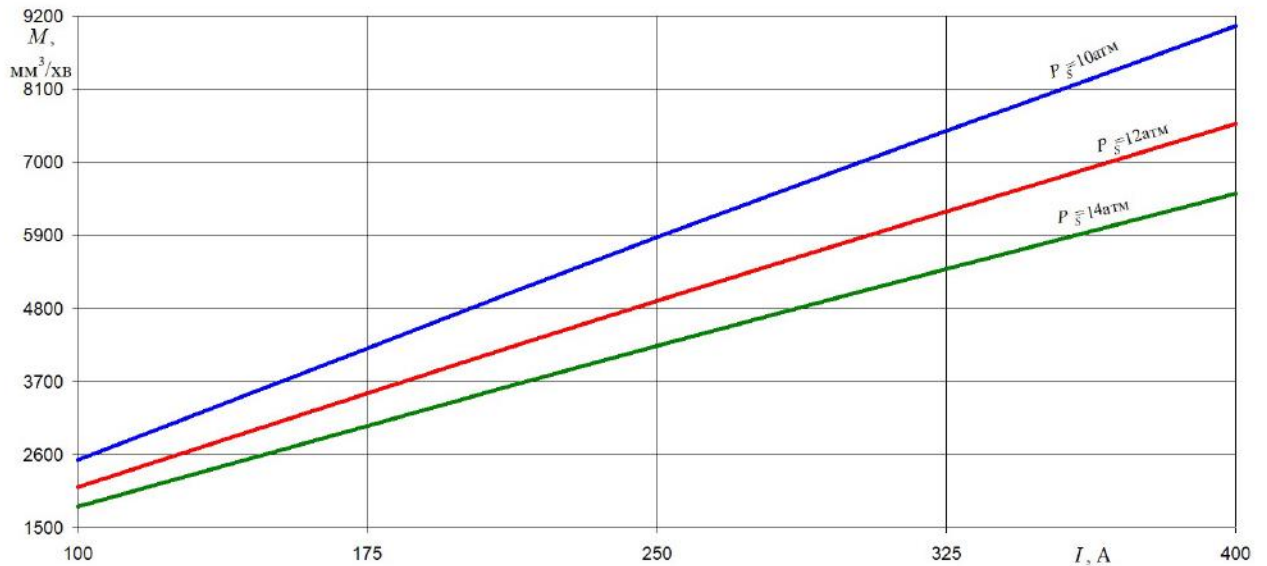


Рисунок 3.10. Залежність продуктивності процесу M від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини $P_s(h=0,5\text{мм})$

Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

Таблиця 3.22

| N=27 | Regression Summary for Dependent Variable: Ig M (Безступеневий пуансонста) R= ,96913126 R²= ,93921541 Adjusted R²= ,93128698 F(3,23)=118,46 p<,00000 Std.Error of estimate: ,06437 | | | | | |
|-----------|--|------------------|-----------|---------------|----------|----------|
| | BETA | St. Err. Of BETA | B | St. Err. of B | t(23) | p-level |
| Intercept | | | 2,495560 | 0,136898 | 18,22934 | 0,000000 |
| Lg_I | 0,956771 | 0,027983 | 0,922209 | 0,026972 | 34,19104 | 0,000000 |
| Lg_Ps | -0,241068 | 0,027983 | -0,972601 | 0,112899 | -8,61476 | 0,000000 |
| Lg_h | -0,092003 | 0,027983 | -0,112539 | 0,034229 | -3,28781 | 0,003223 |

Математична модель в функції трьох факторів, мм³/хв:

$$M = 313,01 \cdot I^{0,922} \cdot P_s^{-0,972} \cdot h^{-0,113} \quad (3.5)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.23

| Factor | ANOVA; Var.:Lg_M; R-sqr=,93922; Adj: ,93129 (Безступеневий пуансон.ста) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0041433 DV: Lg_M: =Log10(M) | | | | |
|----------|--|----|----------|----------|----------|
| | SS | df | MS | F | P |
| Lg_I | 1,435161 | 1 | 1,435161 | 1169,027 | 0,000000 |
| Lg_Ps | 0,091109 | 1 | 0,091109 | 74,214 | 0,000000 |
| Lg_h | 0,013271 | 1 | 0,013271 | 10,810 | 0,003223 |
| Error | 0,028236 | 23 | 0,001228 | | |
| Total SS | 1,567777 | 26 | | | |

Таблиця 3.24

| Factor | Effect Estimates; Var.:Lg_M; R-sqr=,93922; Adj: ,93129 (Безступеневий пуансон.ста) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0041433 DV: Lg_M: =Log10(M) | | | | | | | | | |
|---------------|---|----------|----------|----------|-------------------|------------------|-----------|------------------|-------------------|------------------|
| | Effect | Std.Err | t(23) | P | -95,% - Cnf.Li mt | +95,% Cnf .Li mt | Coeff. | Std.Err . Coeff. | -95,% - Cnf.Li mt | +95,% Cnf .Li mt |
| Mean/ Interc. | 3,580958 | 0,006840 | 523,5139 | 0,000000 | 3,566808 | 3,595108 | 3,580958 | 0,006840 | 3,566808 | 3,595108 |
| Lg_I | 0,555225 | 0,016239 | 34,1910 | 0,000000 | 0,521632 | 0,588818 | 0,277613 | 0,008119 | 0,260816 | 0,294409 |
| Lg_Ps | -0,142124 | 0,016498 | -8,6148 | 0,000000 | -0,176252 | -0,107996 | -0,071062 | 0,008249 | -0,088126 | -0,053998 |
| Lg_h | -0,053695 | 0,016331 | -3,2878 | 0,003223 | -0,087479 | -0,019911 | -0,026847 | 0,008166 | -0,043739 | -0,009955 |

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на продуктивність M процесу РОД пуансонає сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s , третім – величина робочого пояса EI h . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при збільшені (зменшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h

продуктивність процесу РОД пуансона M збільшується (зменшується). В рамках експерименту продуктивність процесу РОД пуансона M змінюється в межах від 1800 до 9200 мм³/хв.

Шорсткість обробленої поверхні

Таблиця 3.25 Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

| Factor | Regr. Coefficients; Var.:Lg_Ra; R-sqr=,9871; Adj:,98542 (Безступеневий пуансон.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0004462 DV: Lg_Ra: =Log10(Ra) | | | | | |
|---------------|--|----------|----------|----------|------------------|------------------|
| | Regressn – Coeff. | Std.Err. | t(23) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/ Interc. | 0,651257 | 0,038509 | 16,91169 | 0,000000 | 0,571595 | 0,730920 |
| Lg_I | 0,125687 | 0,016261 | 7,72949 | 0,000000 | 0,092049 | 0,159325 |
| Lg_Ps | -0,362313 | 0,068063 | -5,32316 | 0,000021 | -0,503113 | -0,221513 |
| Lg_h | 0,843932 | 0,020636 | 40,89677 | 0,000000 | 0,801244 | 0,886620 |

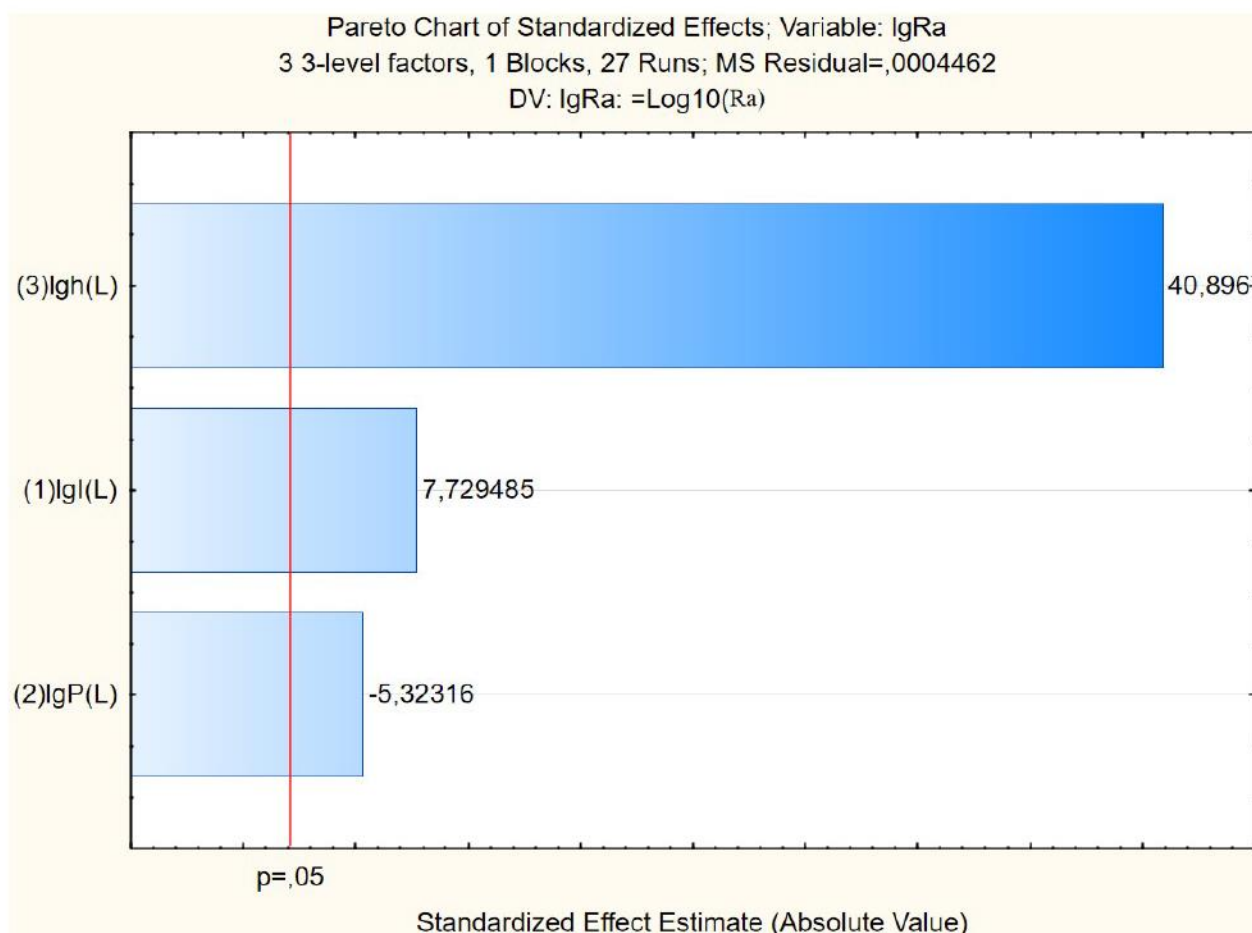
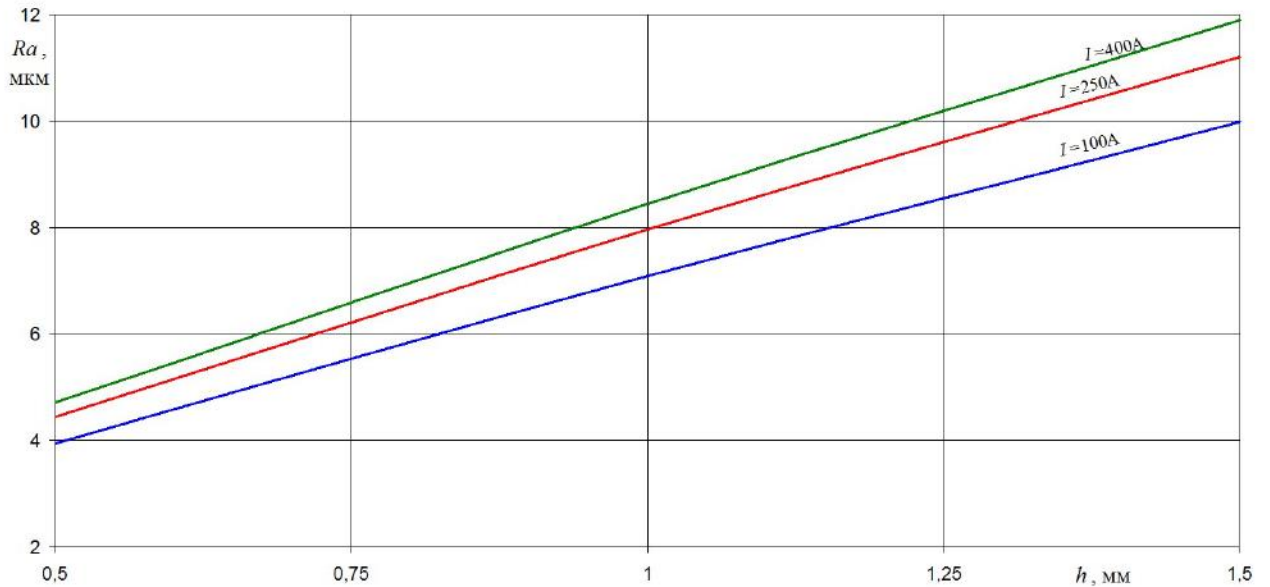


Рисунок 3.11. Карта Порето

Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

Таблиця 3.26

| N=27 | Regression Summary for Dependent Variable: Lg Ra (Безступеневий пуансон) R= ,99353154 R²= ,98710493 Adjusted R²= ,98542296 F(3,23)=586,88 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,02112 | | | | | |
|----------|---|------------------|-----------|---------------|----------|----------|
| | BETA | St. Err. of BETA | B | St. Err. of B | t(23) | p-level |
| Intercpt | | | 1,013570 | 0,082532 | 12,28101 | 0,000000 |
| Lg_I | 0,183020 | 0,023678 | 0,125687 | 0,016261 | 7,72949 | 0,000000 |
| Lg_Ps | -0,126043 | 0,023678 | -0,362313 | 0,068063 | -5,32316 | 0,000021 |
| Lg_h | 0,968360 | 0,023678 | 0,843932 | 0,020636 | 40,89677 | 0,000000 |

Рис. 3.12. Залежність шорсткості поверхні пуансона Ra від величини робочого пояса $EI h$ та сили технологічного струму I ($P_S=14$ атм)

Математична модель в функції трьох факторів, мкм:

$$Ra = 10,317 \cdot I^{0,126} \cdot P_S^{-0,362} \cdot h^{0,844} \quad (3.6)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.27

| Factor | ANOVA; Var.:Lg_Ra; R-sqr=,9871; Adj:,98542 (Безступеневий пуансон) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0004462 DV: Lg_Ra: =Log10(Ra) | | | | |
|----------|---|----|----------|----------|----------|
| | SS | df | MS | F | P |
| Lg_I | 0,026658 | 1 | 0,026658 | 59,745 | 0,000000 |
| Lg_Ps | 0,012643 | 1 | 0,012643 | 28,336 | 0,000021 |
| Lg_h | 0,746276 | 1 | 0,746276 | 1672,546 | 0,000000 |
| Error | 0,010262 | 23 | 0,000446 | | |
| Total SS | 0,795840 | 26 | | | |

Таблиця 3.28

| Factor | Effect Estimates; Var.:Lg_Ra; R-sqr=,9871; Adj:,98542 (Безступеневий пуансон.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0004462 DV: Lg_Ra: =Log10(Ra) | | | | | | | | | |
|---------------|--|-----------|-----------|-----------|-------------------|-----------------|-----------|------------------|-------------------|-----------------|
| | Effect | Std.Err | t(23) | P | -95,% - Cnf.Li mt | +95,% Cnf.Li mt | Coeff. | Std.Err . Coeff. | -95,% - Cnf.Li mt | +95,% Cnf.Li mt |
| Mean/ Interc. | 0,8612 75 | 0,0041 24 | 208,85 65 | 0,0000 00 | 0,8527 44 | 0,8698 06 | 0,8612 75 | 0,0041 24 | 0,8527 44 | 0,8698 06 |
| <i>Lg_I</i> | 0,0756 71 | 0,0097 90 | 7,7295 | 0,0000 00 | 0,0554 19 | 0,0959 23 | 0,0378 36 | 0,0048 95 | 0,0277 10 | 0,0479 62 |
| <i>Lg_Ps</i> | 0,0529 44 | 0,0099 46 | 5,3232 | 0,0000 21 | 0,0735 19 | 0,0323 69 | 0,0264 72 | 0,0049 73 | 0,0367 59 | 0,0161 85 |
| <i>Lg_h</i> | 0,4026 58 | 0,0098 46 | 40,896 8 | 0,0000 00 | 0,3822 90 | 0,4230 25 | 0,2013 29 | 0,0049 23 | 0,1911 45 | 0,2115 13 |

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на шорсткість поверхні пуансона Ra є величина робочого пояса $EI h$.

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I , третім – статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h шорсткості поверхні пуансона Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткості поверхні пуансона Ra змінюється в межах від 3,5 до 12 мкм.

Міжелектродний зазор

Таблиця 3.29 Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

| Factor | Regr. Coefficients; Var.:Lg δ ; R-sqr=,64944; Adj:,60371 (Пуансон.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0094709 DV: Lg δ : =Log10(δ) | | | | | |
|---------------|---|----------|----------|----------|------------------|------------------|
| | Regressn – Coeff. | Std.Err. | t(6) | P | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/ Interc. | -1,06755 | 0,177419 | -6,01713 | 0,000004 | -1,43457 | -0,700532 |
| <i>Lg_I</i> | 0,33070 | 0,074916 | 4,41430 | 0,000200 | 0,17573 | 0,485676 |
| <i>Lg_Ps</i> | -1,46401 | 0,313580 | -4,66871 | 0,000106 | -2,11270 | -0,815325 |
| <i>Lg_h</i> | -0,10945 | 0,095072 | -1,15127 | 0,261450 | -0,30612 | 0,087218 |

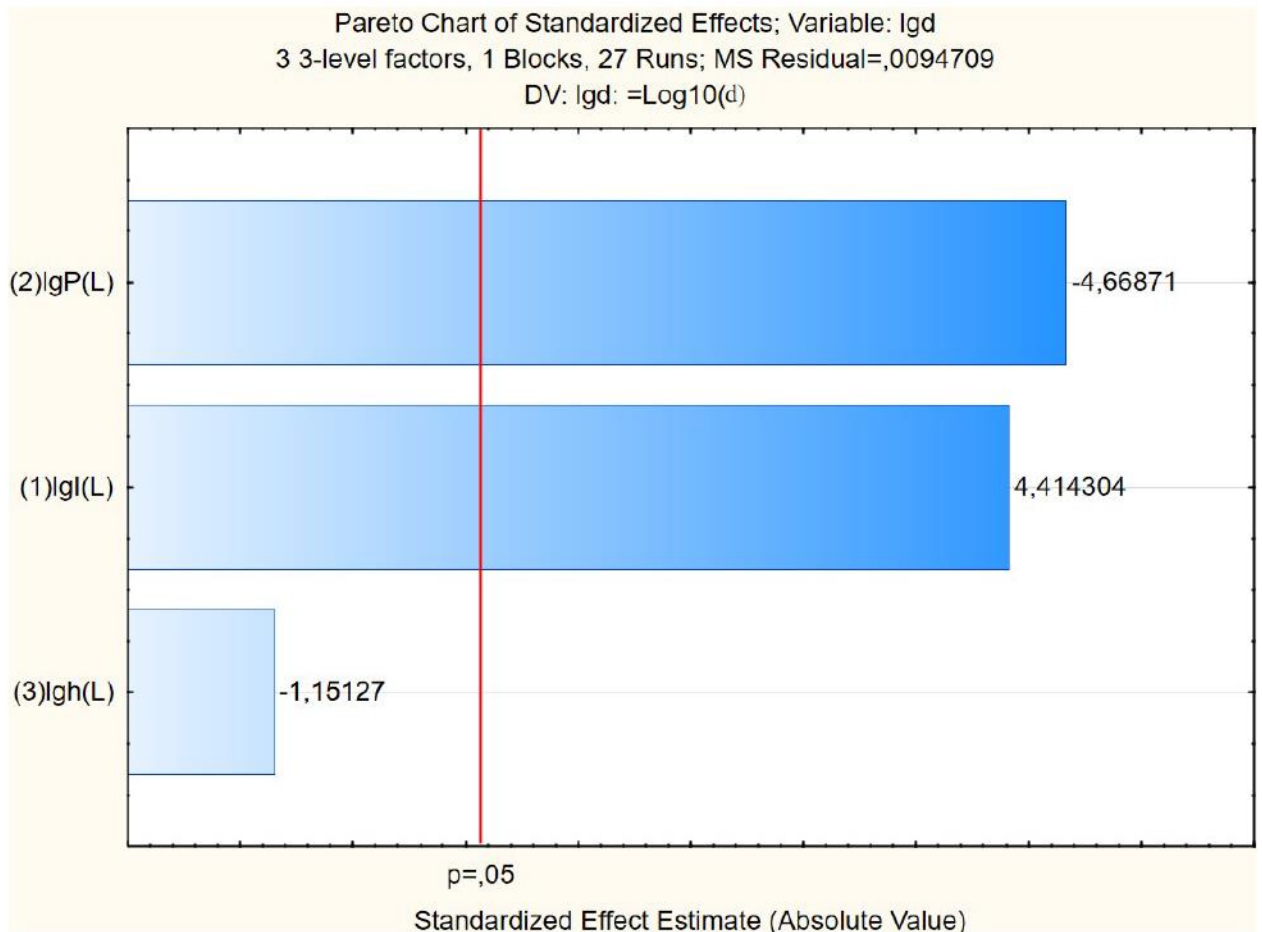


Рисунок 3.13. Карта Порето

Найменш впливовим фактором є висота робочого пояса EI h , фіксуємо її на верхньому рівні.

Таблиця 3.30 Матриця планування експерименту при $h=1,5\text{мм}$

| Номер експерименту | X1 (I) | X2 (Ps) | Y2 (δ) мм/мм |
|--------------------|--------|---------|-----------------------|
| 1 | - | + | 0,228 |
| 2 | 0 | - | 0,506 |
| 3 | + | 0 | 0,591 |
| 4 | - | 0 | 0,287 |
| 5 | - | - | 0,374 |
| 6 | 0 | 0 | 0,388 |
| 7 | + | + | 0,361 |
| 8 | 0 | + | 0,309 |
| 9 | + | 0 | 0,453 |

Таблиця 3.31 Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

| Factor | Regr. Coefficients; Var.:Lg δ ; R-sqr=,88178; Adj: ,84237 (Пуансон.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0058122 DV: Lg δ =Log10(δ) | | | | | |
|--------------|---|----------|----------|----------|------------------|------------------|
| | Regressn – Coeff. | Std.Err. | t(6) | p | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/ Inter. | 0,37943 | 0,004083 | 92,923 | 0,000000 | 0,36944 | 0,38942 |
| Lg_I | 0,33026 | 0,000805 | 410,484 | 0,000000 | 0,32829 | 0,33222 |
| LG_Ps | -1,46688 | 0,003368 | -435,578 | 0,000000 | -1,47512 | -1,45864 |

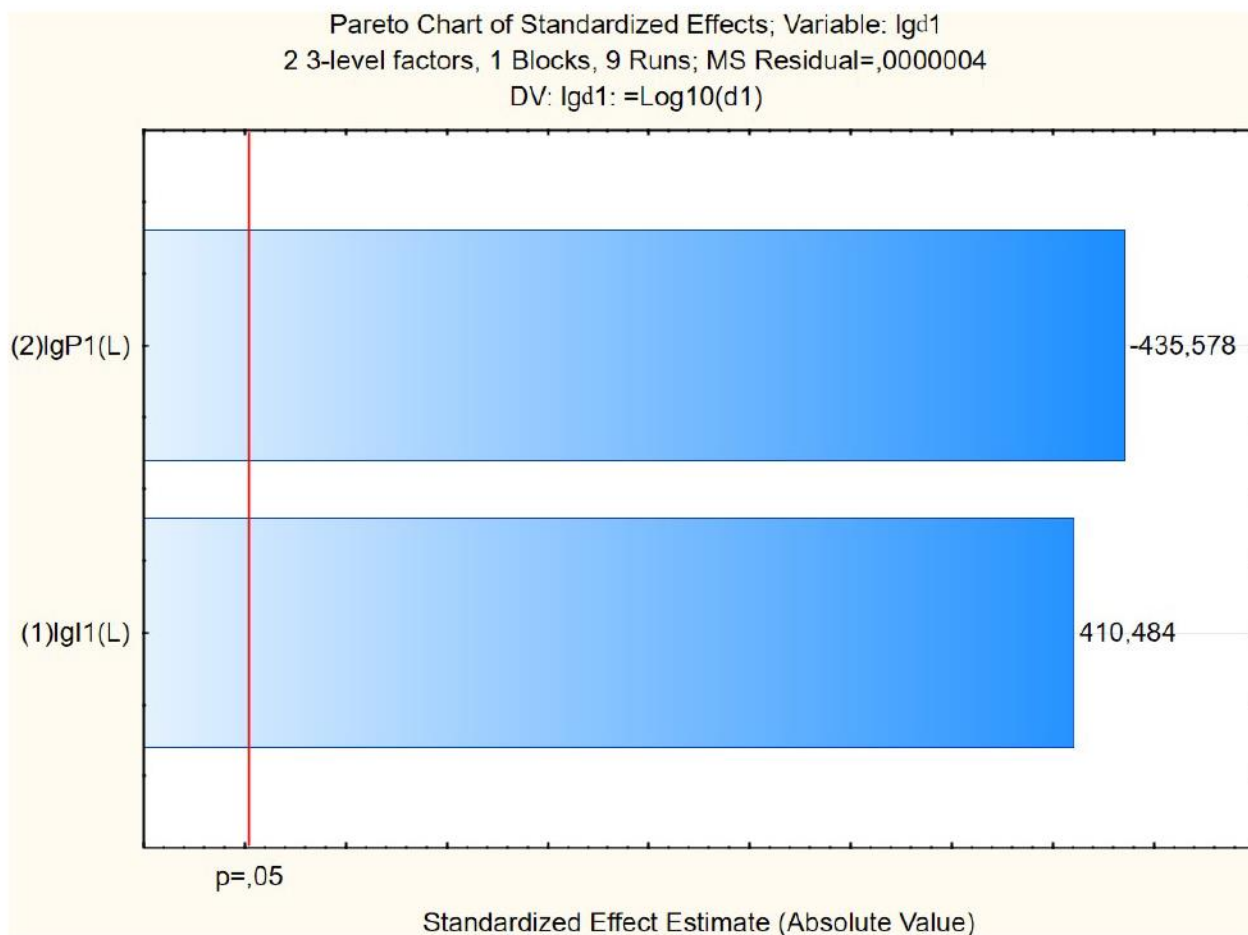


Рисунок. 3.14. Карта Порето

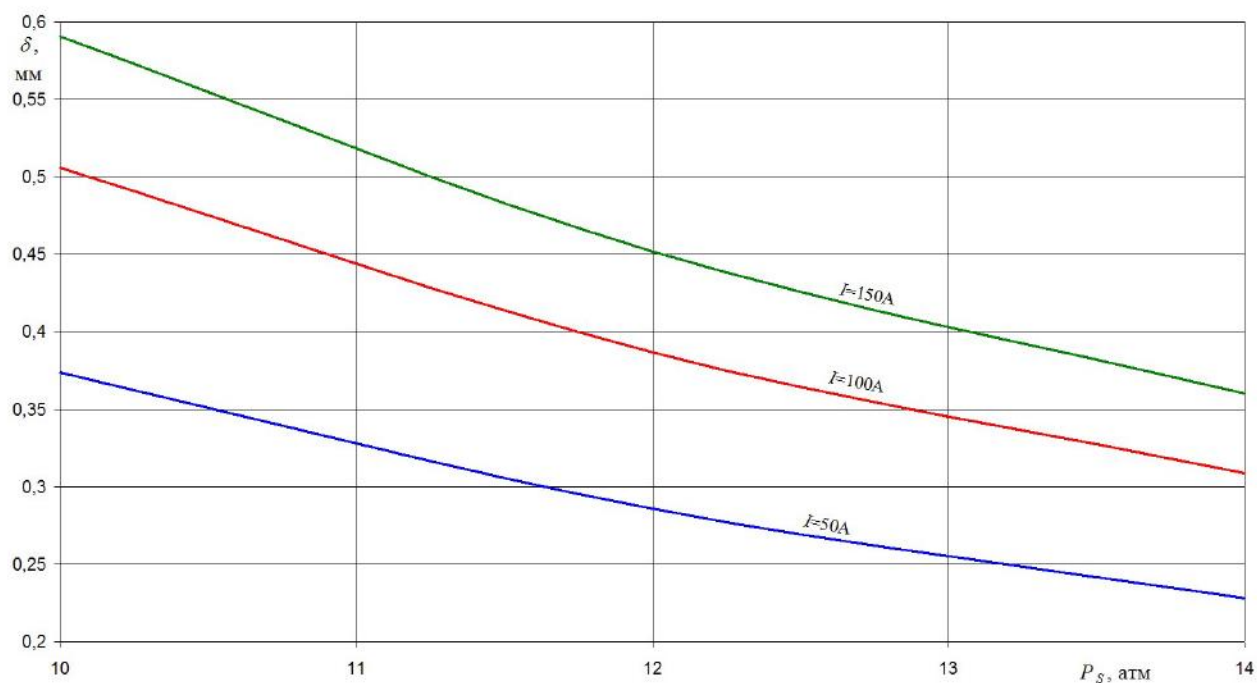


Рисунок 3.15. Залежність міжелектродного зазору δ при виготовленні пуансону від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s

Таблиця 3.32 Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі

Множинна регресія

| N=9 | Regression Summary for Dependent Variable: Lg δ (Пуансон.ста) R= ,93902954 R?= ,88177648 Adjusted R?= ,84236864 F(2,6)=22,376 p<,00165 Std.Error of estimate: ,07624 | | | | | |
|-----------|--|------------------|----------|---------------|----------|----------|
| | BETA | St. Err. of BETA | B | St. Err. of B | t(23) | p-level |
| Intercept | | | 0,37943 | 0,004083 | 92,923 | 0,000000 |
| Lg_Ps | 0,685827 | 0,001671 | 0,33026 | 0,000805 | 410,484 | 0,000000 |
| Lg_h | -0,727753 | 0,001671 | -1,46688 | 0,003368 | -435,578 | 0,000000 |

Математична модель в функції двох факторів, мм:

$$\delta = 2,396 \cdot I^{0,33} \cdot P_s^{-1,467} \quad (3.7)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.33

| Factor | ANOVA; Var.:Lg δ ; R-sqr=,88178; Adj:,84237 (Пуансон.ста) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0058122 DV: Lg δ =Log10(δ) | | | | |
|----------|---|----|----------|----------|----------|
| | SS | df | MS | F | P |
| Lg_Ps | 0,061351 | 1 | 0,061351 | 168497,1 | 0,000000 |
| Lg_h | 0,069081 | 1 | 0,069081 | 189728,4 | 0,000000 |
| Error | 0,000002 | 6 | 0,000000 | | |
| Total SS | 0,130435 | 8 | | | |

Таблиця 3.34

| Factor | Effect Estimates; Var.:Lg δ ; R-sqr=,88178; Adj:,84237 (Пуансон.ста) 2 3- level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0058122 DV: Lg δ : =Log10(δ) | | | | | | | | | |
|-------------|---|----------|----------|----------|-------------------|-----------------|-----------|------------------|-------------------|-----------------|
| | Effect | Std.Err | t(6) | P | -95,% - Cnf.Li mt | +95,% Cnf.Li mt | Coeff. | Std.Err . Coeff. | -95,% - Cnf.Li mt | +95,% Cnf.Li mt |
| Mean/Interc | -0,434697 | 0,000203 | -2142,15 | 0,000000 | -0,435194 | -0,434201 | -0,434697 | 0,000203 | -0,435194 | -0,434201 |
| Lg_Ps | 0,198834 | 0,000484 | 410,48 | 0,000000 | 0,197649 | 0,200019 | 0,099417 | 0,000242 | 0,098824 | 0,100010 |
| Lg_h | -0,214352 | 0,000492 | -435,58 | 0,000000 | -0,215556 | -0,213148 | -0,107176 | 0,000246 | -0,107778 | -0,106574 |

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на міжелектродний зазор δ при виготовленні пуансона є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшенні (зменшенні) сили технологічного струму I і при зменшенні (збільшенні) статичного тиску робочої рідини P_s , міжелектродний зазор δ при виготовленні пуансона збільшується (зменшується). В рамках експерименту міжелектродний зазор δ при виготовленні пуансона змінюється в межах від 0,2 до 0,6 мм.

Відносний діаметральний знос EI при виготовленні пуансону

Таблиця 3.35 Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

| Factor | Regr. Coefficients; Var.:Lg γ ; R-sqr=,99997; Adj:,99996 (Пуансон.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0000009 DV: Lg δ : =Log10(γ) | | | | | |
|-----------------|---|----------|----------|------|------------------|------------------|
| | Regressn – Coeff. | Std.Err. | t(23) | P | -95,% - Cnf.Limt | +95,% - Cnf.Limt |
| Mean/ Intercept | -1,26089 | 0,003805 | -331,370 | 0,00 | -1,26876 | -1,25302 |
| Lg_I | 0,46662 | 0,000750 | 622,412 | 0,00 | 0,46507 | 0,46817 |
| Lg_Ps | -0,62677 | 0,003138 | -199,732 | 0,00 | -0,63326 | -0,62027 |
| Lg_h | 0,47277 | 0,000951 | 496,925 | 0,00 | 0,47081 | 0,47474 |

Таблиця 3.36 Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі

Множинна регресія

| N=27 | Regression Summary for Dependent Variable: Lg γ (Пуансон.sta) R= ,99998294 R ² = ,99996589 Adjusted R ² = ,99996144 F(3,23)=2247E2 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,00097 | | | | | |
|-----------|---|------------------|----------|---------------|----------|----------|
| | BETA | St. Err. of BETA | B | St. Err. of B | t(23) | p-level |
| Intercept | | | -1,26089 | 0,003805 | -331,370 | 0,000000 |
| Lg_I | 0,757999 | 0,001218 | 0,46662 | 0,000750 | 622,412 | 0,000000 |
| Lg_Ps | -0,243241 | 0,001218 | -0,62677 | 0,003138 | -199,732 | 0,000000 |
| Lg_h | 0,605176 | 0,001218 | 0,47277 | 0,000951 | 496,925 | 0,000000 |

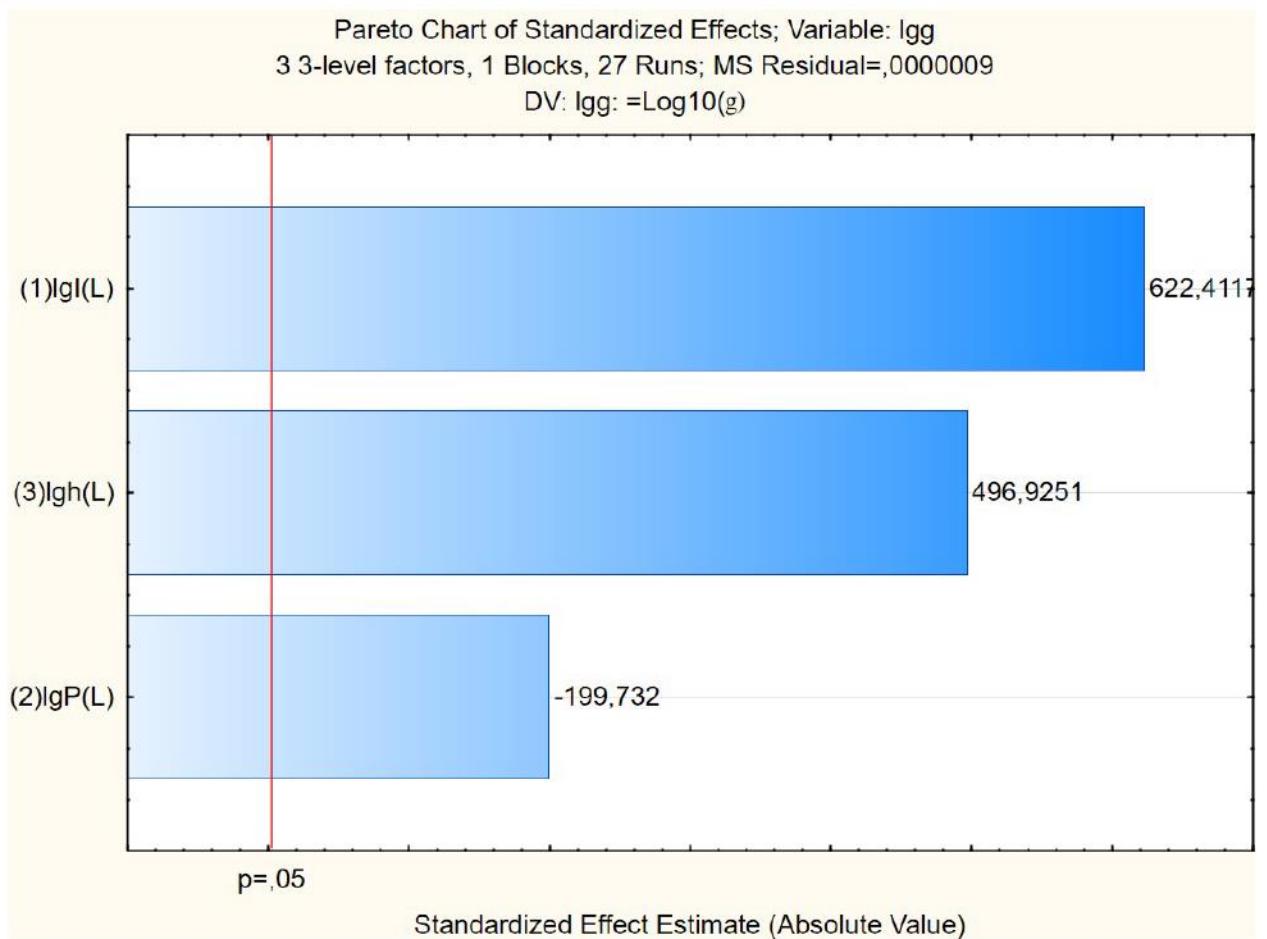


Рисунок 3.16. Карта Порето

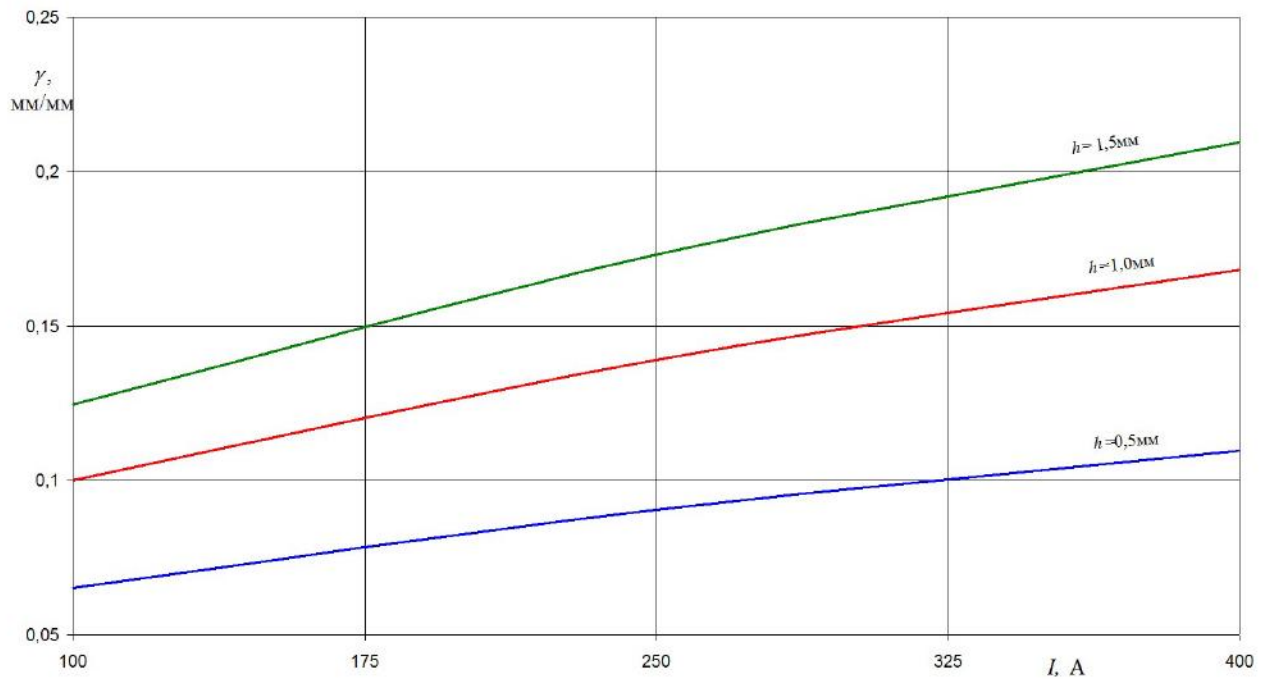


Рисунок 3.17. Залежність відносного діаметрального зносу ЕІ γ від величини робочого пояска ЕІ h та сили технологічного струму I ($P_S=14$ атм)

Відповідно, математична модель в функції трьох факторів, мм:

$$\gamma = 0,055 \cdot I^{0,467} \cdot P_S^{-0,626} \cdot h^{0,473} \quad (3.8)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.37

| Factor | ANOVA; Var.:Lg_γ; R-sqr=,99997; Adj:,99996 (Пуансон.ста) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0000009 DV: Lg δ: =Log10(γ) | | | | |
|----------|---|----|----------|----------|------|
| | SS | df | MS | F | P |
| Lg_I | 0,367422 | 1 | 0,367422 | 387396,3 | 0,00 |
| Lg_Ps | 0,037836 | 1 | 0,037836 | 39892,7 | 0,00 |
| Lg_h | 0,234202 | 1 | 0,234202 | 246934,6 | 0,00 |
| Error | 0,000022 | 23 | 0,000001 | | |
| Total SS | 0,639482 | 26 | | | |

Таблиця 3.38

| Factor | Effect Estimates; Var.:Lg_γ; R-sqr=,99997; Adj:,99996 (Пуансон.ста) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0000009 DV: Lg_γ: =Log10(γ) | | | | | | | | | |
|---------------|--|----------|----------|------|-------------------|-----------------|-----------|------------------|-------------------|-----------------|
| | Effect | Std.Err | t(23) | P | -95,% - Cnf.Li mt | +95,% Cnf.Li mt | Coeff. | Std.Err . Coeff. | -95,% - Cnf.Li mt | +95,% Cnf.Li mt |
| Mean/ Interc. | -0,889280 | 0,000190 | -4677,36 | 0,00 | -0,889673 | -0,888887 | -0,889280 | 0,000190 | -0,889673 | -0,888887 |
| Lg_I | 0,280932 | 0,000451 | 622,41 | 0,00 | 0,279998 | 0,281866 | 0,140466 | 0,000226 | 0,139999 | 0,140933 |
| Lg_Ps | -0,091588 | 0,000459 | -199,73 | 0,00 | -0,092537 | -0,090639 | -0,045794 | 0,000229 | -0,046268 | -0,045320 |
| Lg_h | 0,225570 | 0,000454 | 496,93 | 0,00 | 0,224631 | 0,226509 | 0,112785 | 0,000227 | 0,112316 | 0,113255 |

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на відносний діаметральний знос ЕІ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є висота робочого пояска графітового ЕІ h , третім – статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояска h відносний діаметральний знос ЕІ γ збільшується (зменшується). В рамках експерименту γ змінюється в межах від 0,065 до 0,21 мм/мм.

3.3. Висновки

3.3.1. Отримано математичну модель продуктивності M процесу РОД матриці при зворотній полярності електродів M . Показано, що найбільш впливовим фактором на продуктивність M є сила технологічного струму I із підвищенням якої продуктивність збільшується. З меншою силою впливає на продуктивність статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і 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 матриці при зворотній полярності електродів змінюється в межах від 200 до 3000 мм³/хв.

3.3.2. Отримано математичну модель шорсткості поверхні матриці Ra при зворотній полярності електродів. Показано, що найбільш впливовим фактором на шорсткість поверхні матриці Ra при зворотній полярності електродів є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S шорсткість поверхні матриці Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткість поверхні матриці Ra при зворотній полярності електродів змінюється в межах від 4,5 до 9,5 мкм.

3.3.3. Отримано математичну модель міжелектродного зазору між ЕІ та матрицею δ при зворотній полярності електродів. Показано, що найбільш впливовим фактором на міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею δ при зворотній полярності електродів є статичний тиск робочої рідини P_S .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею δ збільшується(зменшується). В рамках експерименту міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею δ при зворотній полярності електродів змінюється в межах від 0,1 до 0,2 мм.

3.3.4. Отримано математичну модель зносу ЕІ при обробці матриці γ на зворотній полярності електродів. Показано, що найбільш впливовим фактором на знос ЕІ при обробці матриці γ на зворотній полярності електродів є статичний тиск робочої рідини P_S .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S знос ЕІ γ збільшується (зменшується). В рамках експерименту знос ЕІ γ при обробці матриці на зворотній полярності електродів змінюється в межах від 70 до 95 %.

3.3.5. Отримано математичну модель продуктивності процесу РОД пуансона M . Показано, що найбільш впливовим фактором на продуктивність M є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_S , третім – величина робочого пояска ЕІ h . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при збільшені (зменшені) статичного тиску робочої рідини P_S , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояска h продуктивність процесу РОД пуансона M збільшується (зменшується). В рамках експерименту продуктивність M процесу РОД пуансона змінюється в межах від 1800 до 9200 мм³/хв.

3.3.6. Отримано математичну модель шорсткості поверхні пуансона Ra . Показано, що найбільш впливовим фактором на шорсткості поверхні пуансона Ra є величина робочого пояса EI h .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I , третім – статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h шорсткості поверхні пуансона Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткості поверхні пуансона Ra змінюється в межах від 3,5 до 12 мкм.

3.3.7. Отримано математичну модель МЕЗ між EI та пуансоном δ . Показано, що найбільш впливовим фактором на величину МЕЗ δ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S , міжелектродний зазор δ збільшується (зменшується). В рамках експерименту величина МЕЗ δ змінюється в межах від 0,2 до 0,6 мм.

3.3.8. Отримано математичну модель відносного діаметрального зносу EI при виготовлені пуансона γ . Показано, що найбільш впливовим фактором на відносний діаметральний знос EI при виготовлені пуансона γ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є висота робочого пояса графітового EI h , третім – статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h відносний діаметральний знос EI при виготовлені пуансона γ збільшується (зменшується). В рамках експерименту відносний діаметральний знос EI при виготовлені пуансона γ змінюється в межах від 0,065 до 0,21 мм/мм.

РОЗДІЛ 4. РОД РОБОЧИХ ДЕТАЛЕЙ ШТАМПА

Спосіб РОД дозволяє здійснити технологічні схеми формоутворення як твірних поверхонь робочих деталей розділових штампів, так і поверхонь, спряжених з ними, наприклад, фасок, торцевих поверхонь, при прямому поступальному русі профільованого ЕІ. Переваги способу РОД особливо проявляються при виготовленні робочих деталей розділових штампів для штампування деталей зі складним профілем.

При цьому повинні забезпечуватись такі умови реалізації процесу: обробку здійснюють в герметизованій камері електричною дугою в поперечному потоці середовища-діелектрика (в даному випадку це суміш масла „Індустріальне-12” – 50% та освітлювального гасу – 50%) при його динамічному тиску не менше 5...10 кПа, густині струму не більше 2 А/мм², ЕІз матеріалу МПГ-7, або сталі, зворотній, або прямій полярності електродів.

В основу розробки технологічних схем формоутворення зовнішніх і внутрішніх контурів робочих деталей розділових штампів способом РОД покладено задачі підвищення економічної ефективності процесу, розширення меж його раціонального застосування та конкуренто спроможності за рахунок оптимального поєднання кількісних та якісних характеристик процесу.

Розглянемо особливості технологічних схем формоутворення робочих деталей розділових штампів для штампування деталей.

На рис. 4.1 наведено технологічну схему формоутворення пуансона і матриці, коли пуансон 1 і проміжний ЕІ 2 оброблюють методом зворотного копіювання з використанням одного блоку попередніх пластинчатих електродів 3. Потім проміжним ЕІ 2 методом прямого копіювання оброблюють матрицю 4. Робочу рідину прокачують від периферії до центру заготовки. Для запобігання видовжених дуг, які оплавляють кромки виробу, на виході пуансона 1 і проміжного ЕІ 2 із пластинчатих електродів 3 і матриці 4 передбачають діелектричну пластину 5. Як наслідок між матрицею

і пуансоном утворюється зазор $z_n = \delta_2 - \delta_3 - \delta_1$, де δ_1 – МЕЗ між пуансоном 1 і пластинчатим електродом 3, δ_2 – МЕЗ між проміжним ЕІ 2 і пластинчатим електродом 3, δ_3 – МЕЗ між проміжним ЕІ 2 і матрицею 4.

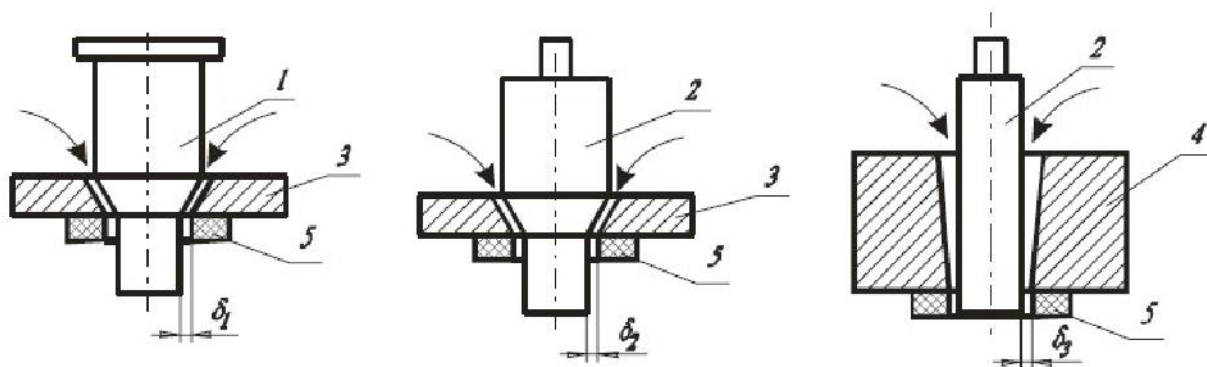


Рис. 4.1. Технологічна схема формоутворення пуансона і матриці відповідно методами прямого і зворотного копіювання

4.1. Дослідження можливості виготовлення робочих деталей штампа способом РОД

Розглянемо можливість обробки способом РОД робочих деталей для розділового штампу, який призначений для штампування деталі товщиною $S=5\text{мм}$.

Згідно таблиці 1.3. початковий однібічний зазор між пуансоном і матрицею для такої товщини матеріалу $0,175\text{мм}$, половина поля допуску на виготовлення $0,125\text{мм}$, половина поля допуску на знос при виготовленні матриці $0,083\text{мм}$, максимальна рекомендована початкова шорсткість поверхні робочих деталей розділових штамсів при електроерозійній обробці знаходиться в межах $Ra=10\dots 12,5\text{мкм}$.

4.1.1 Визначаємо можливість отримання необхідної шорсткості поверхні

Звернемося до отриманих математичних моделей (3.2) при обробці матриці і (3.6) при обробці пуансона. Задана шорсткість обробленої поверхні буде отримана за умов обробки матриці металевим ЕІ при зворотній полярності ЕІ при технологічному струмі $I=250\text{ А}$ і статичному тиску робочої

рідини в межах $P_S=12\dots14$ атм. Задана шорсткість обробленої поверхні буде отримана за умов обробки пуансона графітовим ЕІ при зворотній полярності ЕІ при технологічному струмі $I=400$ А, величині робочого пояска ЕІ $h=1,5$ мм і статичному тиску робочої рідини $P_S=14$ атм.

За таких технологічних параметрів процесу продуктивність обробки матриці, згідно математичної моделі (3.1) буде досягати $M=7800$ мм³/хв, а продуктивність обробки пуансона, згідно математичної моделі (3.5) буде досягати $M=6525$ мм³/хв.

Відповідно при менших значеннях технологічного струму, наприклад 50 А, можна забезпечити значно меншу шорсткість обробленої поверхні в межах $Ra=3,5\dots6$ мкм.

4.1.2 Визначаємо можливість отримання необхідного штампувального зазору між пуансоном і матрицею

У відповідності до зазначених умов однобічний штампувальний зазор $z_{uu}=0,175^{+0,125}$ тобто в межах $z_{uu}=0,175\dots0,3$ мм

Згідно математичних моделей (3.3) та (3.7) міжелектродний зазор за умов обробки пуансона графітовим ЕІ при зворотній полярності ЕІ при технологічному струмі $I=400$ А, величині робочого пояска ЕІ $h=1,5$ мм і статичному тиску робочої рідини $P_S=14$ атм становитиме $\delta_3=0,36$ мм, за умов обробки матриці металевим ЕІ при зворотній полярності ЕІ при технологічному струмі $I=250$ А і статичному тиску робочої рідини $P_S=14$ атм становитиме $\delta_1=0,133$ мм. За умов, що проміжний металевий ЕІ виготовляють по принципу обробки матриці, враховуючи математичну модель і можливість варіювання факторів зазор може бути $\delta_2=0,1\dots0,22$ мм.

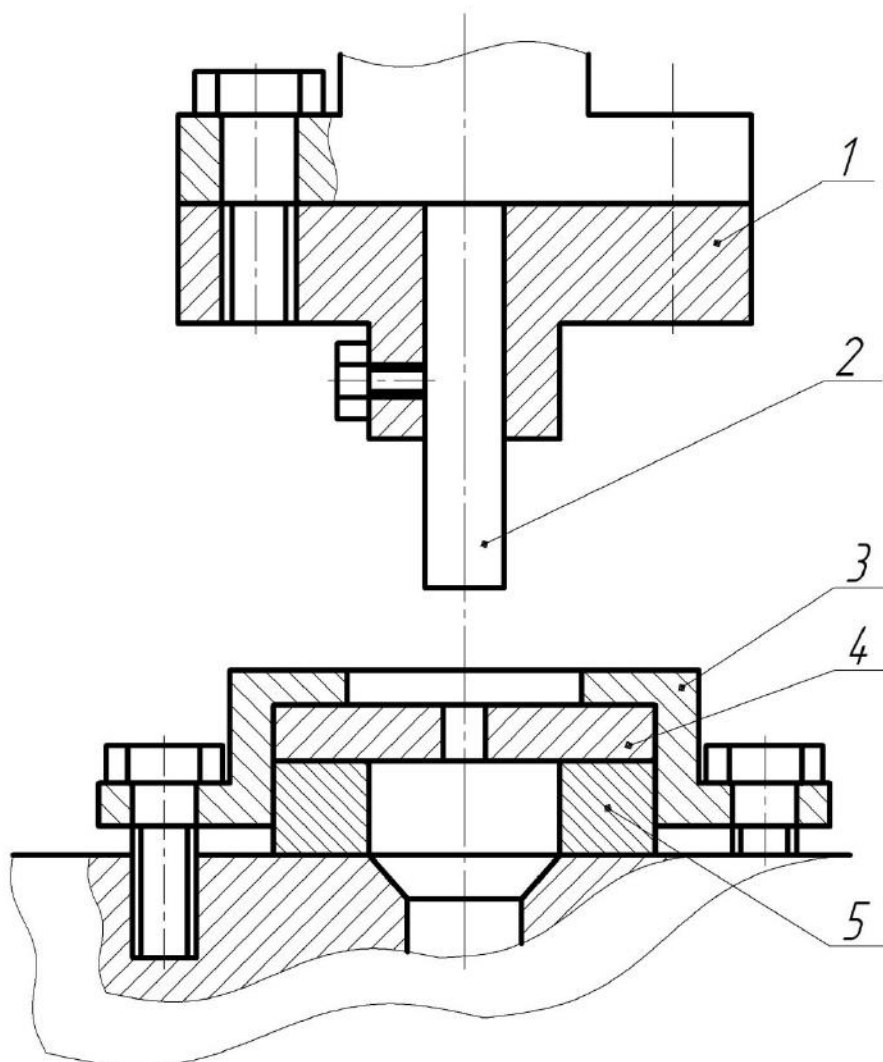
Тоді можливий односторонній зазор між пуансоном і матрицею:

$$z_n=|\delta_2-\delta_3-\delta_1|=|(0,1\dots0,22)-0,36-0,133|=0,393\dots0,273 \text{ мм}$$

При обробці проміжного ЕІ технологічним струмом $I=250$ А і статичному тиску робочої рідини $P_S=10$ атм отримуємо односторонній зазор $z_n=0,273$ мм входить в межі штампувального зазору $z_{uu}=0,175\dots0,3$ мм.

4.2. Пристрій для експериментальних досліджень

4.2.1. Пристрій для виготовлення матриці



1,3 – тримач, 2 – електрод-інструмент, 4 – матриця, 5 – підкладна плита.

Рис.4.10. Пристрій для виготовлення матриці

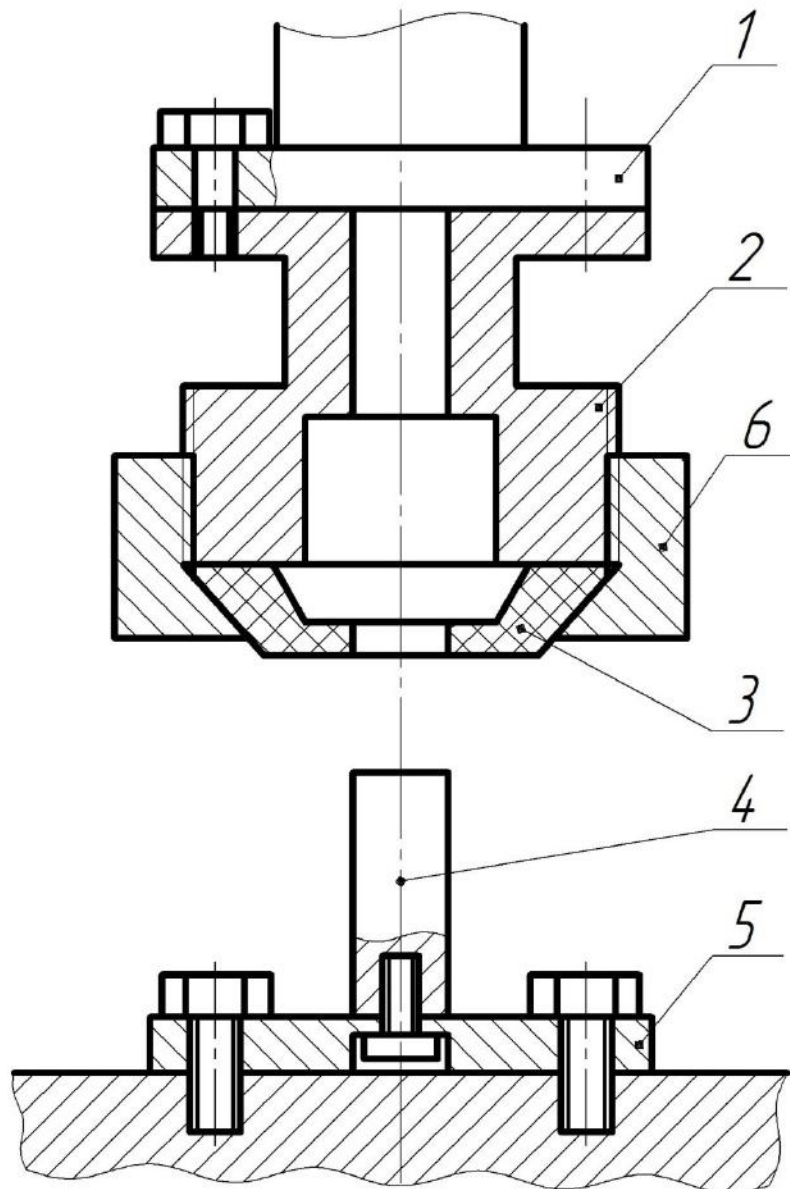
Пристрій працює наступним чином: ЕІ 2 закріплюється за допомогою гвинта в тримачі 1, який кріпиться до штоку верстата. Матрицю 4 встановлюють на підкладну плиту 5 і фіксують тримачем 5 на столі верстата.

В процесі обробки робочу рідину подають від периферії ЕІ до центру попередньо виготовленого отвору матриці 4 і далі відводиться через отвір в робочому столі верстата.

В процесі обробки шток верстата здійснює зворотно-поступальні рухи під час яких за рахунок електроерозії отворів в матриці набуває контурів ЕІ.

Для виконання експериментів на зворотній полярності електродів до матриці підводять мінус, а до ЕІ – плюс. Для виконання експериментів на прямій полярності електродів до матриці підводять плюс, а до ЕІ – мінус.

4.2.2. Пристрій для виготовлення пуансона



1 – шток, 2, 5 – тримач, 3 – електрод-інструмент, 4 – пуансон, 6 – гайка.

Рис. 4.11. Пристрій для виготовлення пуансону

Пристрій працює наступним чином: ЕІ 3 кріпиться за допомогою гайки 6 до тримача 2. Гайка 6 має конічну базову поверхню для точного встановлення ЕІ на тримачі 2. Пуансон кріпиться за допомогою гвинта до тримача 5, який в свою чергу жорстко кріпиться до робочого столу верстату.

Тримач 2 прикріплюється гвинтами до штоку верстата 1, який в процесі обробки здійснює зворотно-поступальні рухи. В процесі обробки робоча рідина подається крізь шток верстата та рухається від центру ЕІ до його периферії.

Для виконання експериментів на зворотній полярності електродів до пуансона підводять мінус, а до ЕІ – плюс. Для виконання експериментів на прямій полярності електродів до пуансона підводять плюс, а до ЕІ – мінус.

4.3. Висновки

4.3.1. Перевірено можливість виготовлення робочих деталей розділового штампа (пуансона і матриці) способом РОД. Доведено можливість застосування способу РОД для обробки спряжених пуансонів і матриць з необхідними показниками шорсткості обробленої поверхні і з необхідним штампувальним зазором.

4.3.2. Спроектовано і виготовлено пристрої до верстата "Дуга-8Г" для реалізації процесу РОД робочих деталей розділових штамтів.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД

Розрахунок економічної ефективності РОД виконується за умов виготовлення спряженої пари. Довжина робочої частини пуансона 40мм, глибина отвору матриця 5мм. 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 профільованим електрод-інструментом 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 $M_{баз(с)} = 390 \text{ мм}^3/\text{хв.}$, для довбальної операції $M_{баз(о)} = 18,23 \text{ мм}^3/\text{хв.}$;

- за проектний варіант обробку здійснюють розмірною обробкою електричною дугою непрофільованим електрод-інструментом з середньою продуктивністю обробки стержня $M_{np(с)} = 1450 \text{ мм}^3/\text{хв.}$, що відповідає силі технологічного струму $I = 50 \text{ А}$ і статичному тиску робочої рідини $P_s = 1,2 \text{ МПа}$, та середньою продуктивністю обробки отвору металевим електродом $M_{np(с)} = 250 \text{ мм}^3/\text{хв.}$, що відповідає силі технологічного струму $I = 50 \text{ А}$ і статичному тиску робочої рідини $P_s = 1,2 \text{ МПа.}$;

- річний об'єм виробництва шліцьових з'єднань способами механічної обробки становить 17 450 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 | 17450 | 17450 |
| 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 | 980 000 |
| 6 | Виробнича площа, що займає одиниця обладнання | S | м ² | 1,527+2,413 | 16 |
| 7 | Коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу на одну одиницю обладнання | κ_d | - | 1,1 | 1,1 |
| 8 | Вартість 1 м ² виробничої площі | C_n | грн/м ² | 4500 | 4500 |
| 9 | Сумарна потужність двигунів та джерел живлення | N | кВт | 4+3,7=7,7 | 25+5=30 |
| 10 | Коефіцієнт використання потужності обладнання | κ_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 | 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 прийнятну 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

| № пп | Найменування показників | Умовні познач. | Одиниці виміру | Варіанти | | Формули, розрахунок |
|------|------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|--|
| | | | | Базовий | Проектний | |
| 1 | Розрахункова кількість обладнання | H_p^c H_p^o | шт | 1,999 5,796 | 0,539 0,417 | $H_p = \frac{n \cdot t}{F}$ $H_{p(\bar{o})}^c = \frac{17450 \cdot 0,23}{2008} = 1,999$ $H_{p(\bar{o})}^o = \frac{17450 \cdot 0,667}{2008} = 5,796$ $H_{p(n)}^c = \frac{17450 \cdot 0,062}{2008} = 0,539$ $H_{p(n)}^o = \frac{17450 \cdot 0,048}{2008} = 0,417$ |
| 2 | Прийнята кількість обладнання | H_n^c H_n^o | шт | 2 6 | 1 1 | - |
| 3 | Вартість всього обладнання | $K_{об}$ | грн | 5 171 100 | 1 200 000 | $K_{об} = K \cdot H_n$ $K_{об(\bar{o})} = 185\,550 \cdot 2 + 800\,000 \cdot 6 = 5\,171\,100$ $K_{об(n)} = 980\,000 \cdot 1 + 220\,000 \cdot 1 = 1\,200\,000$ |
| 4 | Вартість виробничих приміщень | $K_{вп}$ | грн | 86 783,4 | 108 900 | $K_{вп} = S \cdot \kappa_{\partial} \cdot H_n \cdot \Pi_n$ $K_{вп(\bar{o})} = (1,527 \cdot 2 + 2,413 \cdot 6) \cdot 1,1 \cdot 4500 = 86\,783,4$ $K_{вп(n)} = (16 \cdot 1 + 6 \cdot 1) \cdot 1,1 \cdot 4500 = 108\,900$ |
| 5 | Загальна сума капітальних вкладень | $K_{кв}$ | грн | 2969100 | 1308900 | $K_{кв} = K_{об} + K_{вп}$ $K_{кв(\bar{o})} = 5\,171\,100 + 86\,783,4 = 5\,257\,883,4$ $K_{кв(n)} = 1\,200\,000 + 108\,900 = 1\,308\,900$ |

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 площі $C_{пл}$. Дані показники є складовими частинами собівартості одиниці продукції, розрахунок якої наведено у табл. 5.3

Таблиця 5.3 Розрахунок собівартості одиниці продукції

| № п/п | Найменування показників | Умовні познач. | Одиниці виміру | Варіанти | | Формули, розрахунок |
|----------|--|-------------------|-------------------|--------------|------------|--|
| | | | | Базовий | Проектний | |
| 1 | Заробітна плата | C_{zn} | грн | 1 140 183 | 760 122 | $C_{zn} = n \cdot T \cdot K_{\partial z}$ $C_{zn(b)} = 17450 \cdot 60 \cdot 1,089 = 1\,140\,183$ $C_{zn(n)} = 17450 \cdot 40 \cdot 1,089 = 760\,122$ |
| 2 | Амортизація, утримання та ремонт обладнання | $C_{ам}$ | грн | 781 870,32 | 181 400 | $C_{ам} = \frac{K \cdot H_n \cdot (a_a + a_y)}{100}$ $C_{ам(b)} = \frac{(185\,550 \cdot 2 + 800\,000 \cdot 6) \cdot (11,48 + 3,64)}{100} =$ $= 781\,870,32$ $C_{ам(n)} = \frac{(980\,000 \cdot 1 + 220\,000 \cdot 1) \cdot (11,48 + 3,64)}{100} = 181\,400$ |
| 3 | Вартість електро- енергії | C_e | грн | 77 032,8 | 57 243,06 | $C_e = N \cdot \kappa_n \cdot F \cdot H_n \cdot \zeta_e \cdot \kappa_{zo}$ $C_{e(b)} = (3,7 \cdot 2 + 4 \cdot 6) \cdot 0,9 \cdot 2\,008 \cdot 1,81 \cdot 0,75 = 77\,032,80$ $C_{e(n)} = (25 \cdot 1 + 5 \cdot 1) \cdot 0,7 \cdot 2\,008 \cdot 1,81 \cdot 0,75 = 57\,243,06$ |
| 4 | Ремонт та утримання виробничої площі | $C_{пл}$ | грн | 2 082,8 | 2 613,6 | $C_{пл} = \frac{S \cdot \kappa_{\partial} \cdot H_n \cdot \zeta_n \cdot a_n}{100}$ $C_{пл(b)} = \frac{(1,527 \cdot 2 + 2,413 \cdot 6) \cdot 1,1 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 2\,082,8$ $C_{пл(n)} = \frac{(16 \cdot 1 + 6 \cdot 1) \cdot 1,1 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 2\,613,60$ |
| 5 | Собівартість випуску продукції | C | грн | 2 001 168,92 | 967 441,86 | $C = C_{zn} + C_{ам} + C_e + C_{пл}$ $C_{(b)} = 1\,140\,183 + 781\,870,32 + 77\,032,8 + 2\,082,8 =$ $= 2\,001\,168,92$ $C_{(n)} = 760\,122 + 181\,400 + 57\,243,06 + 2\,613,6 = 1\,001\,378,66$ |

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

$$E_p = [C_{(б)} - C_{(n)}] + E_n [K_{кв(б)} - K_{кв(н)}] = \\ = (2\,001\,168,92 - 1\,001\,378,66) + 0,15(5\,257\,883,4 - 1\,308\,900) = 592\,347,51.$$

При цьому коефіцієнт ефективності НДР:

$$K_{эф} = \frac{E_p}{E_{НДР}} = \frac{592\,347,51}{120\,000} = 4,93.$$

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень.

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

3. Експерименти виконано на верстаті РОД "Дуга-8Г".

4. Теоретично і експериментально досліджено, обґрунтовано і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу: продуктивності обробки, шорсткості обробленої поверхні, міжелектродного зазору, зносу ЕІ.

4.1. Отримано математичну модель продуктивності M процесу РОД матриці при зворотній полярності електродів M . Показано, що найбільш впливовим фактором на продуктивність M є сила технологічного струму I із підвищенням якої продуктивність збільшується. З меншою силою впливає на продуктивність статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і 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 матриці при зворотній полярності електродів змінюється в межах від 200 до 3000 мм³/хв.

4.2. Отримано математичну модель шорсткості поверхні матриці Ra при зворотній полярності електродів. Показано, що найбільш впливовим фактором на шорсткість поверхні матриці Ra при зворотній полярності електродів є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S шорсткість поверхні матриці Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткість поверхні матриці Ra при зворотній полярності електродів змінюється в межах від 4,5 до 9,5 мкм.

4.3. Отримано математичну модель міжелектродного зазору між ЕІ та матрицею δ при зворотній полярності електродів. Показано, що найбільш впливовим фактором на міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею δ при зворотній полярності електродів є статичний тиск робочої рідини P_S .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею δ збільшується(зменшується). В рамках експерименту міжелектродний зазор між ЕІ та матрицею δ при зворотній полярності електродів змінюється в межах від 0,1 до 0,2 мм.

4.4. Отримано математичну модель зносу ЕІ при обробці матриці γ на зворотній полярності електродів. Показано, що найбільш впливовим фактором на знос ЕІ при обробці матриці γ на зворотній полярності електродів є статичний тиск робочої рідини P_S .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S знос ЕІ γ збільшується (зменшується). В рамках експерименту знос ЕІ γ при обробці матриці на зворотній полярності електродів змінюється в межах від 70 до 95 %.

4.5. Отримано математичну модель продуктивності процесу РОД пуансона M . Показано, що найбільш впливовим фактором на продуктивність M є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_S , третім – величина робочого пояска ЕІ h . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при збільшені (зменшені) статичного тиску робочої рідини P_S , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояска h продуктивність процесу РОД пуансона M збільшується (зменшується). В рамках експерименту продуктивність M процесу РОД пуансона змінюється в межах від 1800 до 9200 мм³/хв.

4.6. Отримано математичну модель шорсткості поверхні пуансона Ra . Показано, що найбільш впливовим фактором на шорсткості поверхні пуансона Ra є величина робочого пояса $EI h$.

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I , третім – статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h шорсткості поверхні пуансона Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткості поверхні пуансона Ra змінюється в межах від 3,5 до 12 мкм.

4.7. Отримано математичну модель МЕЗ між EI та пуансоном δ . Показано, що найбільш впливовим фактором на величину МЕЗ δ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S , міжелектродний зазор δ збільшується (зменшується). В рамках експерименту величина МЕЗ δ змінюється в межах від 0,2 до 0,6 мм.

4.8. Отримано математичну модель відносного діаметрального зносу EI при виготовленні пуансона γ . Показано, що найбільш впливовим фактором на відносний діаметральний знос EI при виготовленні пуансона γ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є висота робочого пояса графітового $EI h$, третім – статичний тиск робочої рідини P_S . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_S , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h відносний діаметральний знос EI при виготовленні пуансона γ збільшується (зменшується). В рамках експерименту відносний діаметральний знос EI при виготовленні пуансона γ змінюється в межах від 0,065 до 0,21 мм/мм.

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.
17. <https://obrobka.pp.ua/557-materiali-dlya-vigotovlennya-shtampv.html>

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.
17. <https://obrobka.pp.ua/557-materiali-dlya-vigotovlennya-shtampv.html>