

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:
«Електроди для розмірної обробки електричною дугою»
«Electrodes for dimensional processing with an electric arc»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ПМ-24М-2
спеціальності 131
«Прикладна механіка»,
_____ Смаглюк 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**

Смаглюку Олексію Сергійовичу

1. Тема роботи: «Електроди для розмірної обробки електричною дугою».
2. Керівник роботи: Шмельов Віталій Миколайович, канд. техн. наук, доцент.
3. Строк подання роботи до захисту: 20 грудня 2025 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.

Мета: дослідження технологічних характеристик процесу та розробка технології для розмірної обробки електричною дугою деталей складного профілю електродами-інструментами з різних матеріалів.

Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методику експериментальних досліджень; виконати експериментальні дослідження та провести аналіз отриманих результатів; розробити технологію для розмірної обробки електричною дугою деталей складного профілю електродами-інструментами з різних матеріалів; 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
_____ Смаглюк О. С.

АНОТАЦІЯ

Смаглюк О. С. «Електроди для розмірної обробки електричною дугою», спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП - «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025 рік.

Метою роботи є дослідження технологічних характеристик процесу та розробка технології для розмірної обробки електричною дугою деталей складного профілю електродами-інструментами з різних матеріалів.

Описано особливості вибору матеріалу для електрод-інструмента для розмірної обробки електричною дугою, описано особливості розробки конструкції електрод-інструмента.

Досліджено та описано технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою за умов обробки електрод-інструментами з різних матеріалів, 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, електрод-інструмент, технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою, електроерозійна стійкість

ANNOTATION

SMAHLIUK OLEKSII "Electrodes for dimensional processing with an electric arc", specialty 131 "Applied Mechanics", EP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025.

The aim of the work is to study the technological characteristics of the process and develop a technology for dimensional processing of parts of complex profile by electric arc with electrode tools made of different materials.

The features of the choice of material for the electrode tool for dimensional processing by electric arc are described, the features of the development of the electrode tool design are described.

The technological characteristics of the process of dimensional processing by electric arc under the conditions of processing by electrode tools made of different materials, namely its electrical and hydrodynamic characteristics, are studied and described, and mathematical models of the productivity of the processing process, the roughness of the processed surface, wear of the electrode tool and the interelectrode gap are obtained.

dimensional processing by electric arc, electrical discharge machining, electrode-tool, technological characteristics of process of dimensional processing by electric arc, electroerosion resistance

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 6 |
| РОЗДІЛ 1. РОД ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНА АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ | 9 |
| 1.1. Штампування..... | 9 |
| 1.2. Обробка металів різанням..... | 13 |
| 1.3. Лазерне різання | 17 |
| 1.4. Плазмове різання..... | 18 |
| 1.5. Електроерозійна обробка..... | 21 |
| РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ..... | 33 |
| 2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень..... | 33 |
| 2.2. Обладнання, пристрої, апаратура..... | 34 |
| 2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів..... | 36 |
| 2.4 Охорона праці при роботі на верстатах РОД..... | 40 |
| 2.5. Висновки..... | 41 |
| РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД | 42 |
| 3.1. Визначення технологічних характеристик РОД чавунним ЕІ | 42 |
| 3.2. Визначення технологічних характеристик РОД сталевим ЕІ..... | 49 |
| 3.3. Визначення технологічних характеристик РОД графітовим ЕІ..... | 56 |
| 3.4. Висновки..... | 62 |
| РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОДИ-ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ РОД..... | 64 |
| 4.1. Передумови вибору матеріалу ЕІ..... | 64 |
| 4.2. Особливості розробки конструкції ЕІ | 66 |
| 4.3. Висновки..... | 68 |
| РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД | 69 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... | 74 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 76 |

ВСТУП

Актуальність теми. Зараз підприємства активно переходять від масового виробництва до серійного та дрібносерійного, що обумовлює потребу в адаптації виробничих процесів до нових вимог. Така трансформація ставить перед інженерами і виробничими компаніями важливу задачу – вибір оптимальних технологій для виготовлення конкретних деталей. Вибір правильної технології має стратегічне значення, оскільки це дозволяє не лише задовольняти потреби в різноманітних типорозмірах, але й забезпечує широкий асортимент форм готових виробів, що є важливим для розширення ринку та підвищення конкурентоспроможності підприємства.

Кожен метод виготовлення має свої специфічні обмеження щодо точності, розмірів та форми готових деталей, тому вибір технології має враховувати ці фактори. Наприклад, при використанні штампування для вирубання або пробивання деталей мінімальний розмір отвору або вирізу залежить від товщини заготовки. Згідно з технологічними вимогами, мінімальний розмір повинен бути в 1,2 рази більшим за товщину заготовки. Це обмеження важливе для досягнення належної якості вирізаних елементів, оскільки недостатній розмір може призвести до дефектів і зниження міцності готової деталі.

Крім того, важливо враховувати, що при використанні лазерного різання є кілька особливостей. Лазерний промінь може створювати зону термічного впливу на матеріалі, що викликає певні проблеми при обробці товстих заготовок. При цьому може виникати деформація (кривизна) готових деталей, що не завжди прийнятно для високоточних виробів. Лазерне різання також вимагає значних початкових капіталовкладень в обладнання, тому його доцільно використовувати тільки в тих випадках, коли інші методи не можуть забезпечити необхідну точність або ефективність. Серед переваг лазера — висока точність і можливість обробки складних форм, але, на жаль, ці переваги зумовлені значними витратами.

Що стосується плазмового різання, то цей метод вважається найдешевшим, оскільки він дозволяє швидко обробляти заготовки без

значних витрат на обладнання. Однак є й певні обмеження. Плазмове різання створює велику зону термічного впливу, що може призводити до утворення оплавлених країв на оброблених деталях. Це робить його непридатним для виготовлення деталей, де важлива висока точність обробки країв або де оплавлені зони можуть стати проблемою для подальшої обробки чи збирання.

Отже, правильний вибір технології виготовлення деталей є ключовим фактором для досягнення оптимальних результатів у виробництві. Він залежить від специфіки виробу, вимог до точності, вартості та доступності технологічних рішень. Для підприємств важливо не лише враховувати наявні технічні можливості, а й орієнтуватися на ринкові умови та тенденції, щоб забезпечити ефективне використання ресурсів та задовольнити потреби споживачів.

Спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД), розроблений В.І. Носуленком як метод електроерозійної обробки за допомогою стаціонарної електричної дуги, дозволяє отримувати деталі складних контурів без утворення зони термічного впливу та оплавлених країв. Така технологія має суттєву перевагу в порівнянні з іншими методами обробки, оскільки забезпечує високу точність та чистоту оброблених поверхонь. Важливою характеристикою цього методу є те, що товщина заготовки обмежується лише довжиною електрод-інструмента (ЕІ), що дає можливість працювати з різними типами матеріалів та заготовок, незалежно від їх розмірів. Це відкриває нові можливості для обробки як малих, так і великих виробів, зберігаючи при цьому високу якість кінцевого результату.

Таким чином, виконання досліджень, спрямованих на розробку технологій та дослідження технологічних характеристик процесу РОД деталей складного профілю електродами-інструментами із різних матеріалів є актуальним науково-прикладним завданням, успішне виконання якого дозволить більш широко впроваджувати процес РОД у виробництво.

Мета роботи: дослідження технологічних характеристик процесу та розробка технології для розмірної обробки електричною дугою деталей складного профілю електродами-інструментами з різних матеріалів.

Задачі дослідження:

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД та визначення меж його раціонального застосування;
2. Розробка технології обробки деталей складного профілю електрод-інструментами з різних матеріалів;
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 РОД на його якісні та кількісні показники, що дозволить отримувати деталі складного профілю заданих розмірів з необхідною якістю обробленої поверхні.

Запропоновано та розроблено рекомендації, що до конструкцій та матеріалів електрод-інструментів, що дозволить підвищити точність та якість виготовлення деталей способом РОД та знизити вартість обробки.

Особистий внесок здобувача

Постановка мети і задач досліджень; розробка пропозицій, що до конструкцій електрод-інструментів; експериментальні дослідження технологічних характеристик процесу РОД, та аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів та публікації.

Брав участь у LIX науково-технічна конференція здобувачів вищої освіти за результатами якої опубліковано 1 тези у збірнику тез доповідей здобувачів вищої освіти LIX науково-технічної конференції «Наука в ЦНТУ: основні досягнення та перспективи розвитку» за підсумками проведення «Дня науки – 2025».

РОЗДІЛ 1. РОД ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНА АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ

Високоєфективні технології металообробки, такі як плазмове і лазерне різання, а також традиційні методи електроерозійної обробки і процеси розмірної обробки дугою, набувають все більшого поширення, поступово заміщаючи штампування при виготовленні листових деталей. Листові деталі складають близько 70% від загального обсягу виробів, які зазвичай виготовляються методом штампування. Зварні і штамповані конструкції з таких листових матеріалів можуть бути на 30-50% легшими порівняно з виробами, виготовленими із сортового прокату або лиття.

Вибір способу виготовлення листових деталей залежить від характеристик оброблюваного матеріалу, вимог до точності та якості готової деталі, а також конкретних умов виробництва. Для досягнення оптимального результату враховуються різні аспекти, зокрема, складність форми деталі, розміри заготовки, економічність виробництва та необхідність в подальшій обробці чи збиранні конструкцій.

Розглянемо технологічні можливості та області раціонального застосування традиційних способів виготовлення деталей, а також основні напрямки розвитку нових процесів, які набувають все більшої популярності і стають ефективною альтернативою усталеним технологіям.

1.1. Штампування

Штампування є основним методом виготовлення деталей з листового металу в умовах масового, крупносерійного та серійного виробництва. Визначальними факторами серійності є розміри виробів та програма випуску.

Розміри штампованих деталей значно варіюються: від кількох міліметрів до 6-7 метрів у довжину, від десятих часток міліметра до 100 мм і більше за товщиною. Точність виготовлення зазвичай становить 12-14-й класи для звичайного штампування, а для операцій із зачищенням, чистовим вирубуванням і калібруванням — 9-11-й класи.

Основна суть штампувальних операцій полягає в розділенні заготовки на частини через її зсув, що призводить до руйнування металу в зоні деформації. При розрахунку необхідних зусиль для розділення металу важливими факторами є довжина лінії різку, товщина металу, його механічні властивості, затуплення ріжучих кромки, зазор між інструментом та швидкість процесу.

Чим більша товщина металу, габаритні розміри деталі та міцність матеріалу, тим більші зусилля необхідні для розділення, що потребує застосування потужнішого обладнання.

При штампуванні часто виникають геометричні дефекти на поверхні розділу.

Шорсткість поверхні для блискучого пояса приймається в межах $Ra_{2,5} \dots 0,63$ (6-7 класи), а для зони сколу — $Rz_{80} \dots 20$ (3-5 класи) згідно з ГОСТ 2789-73.

При відхиленні від оптимальних зазорів під час вирубування або пробивання на поверхні зрізу можуть з'являтися завали, вириви та великі задирки. Такі дефекти неприпустимі при виготовленні точних деталей, що вимагають перпендикулярної, чистої та гладкої поверхні зрізу по висоті деталі або отвору.

Для досягнення цих вимог у масовому та крупносерійно-виробництві застосовуються економічно вигідні методи, такі як зачистка та чистове вирубування-пробивання. Їх основною метою є отримання максимально блискучого пояса, бажано по всій товщині заготовки, а також мінімізація зони сколу, що виникає під час звичайного вирубування-пробивання. Завдяки зменшенню розтягуючих напруг у зоні різання металу досягається максимальна пластичність. Для цього використовуються різні схеми: вирубування з обтисненням із заваленими кромками; пуансоном, більшим за

матрицю; зі стиканням або поперечною осадкою; обтиснення через дві матриці. Це, в свою чергу, ускладнює конструкцію штампа, збільшує його вартість і значно підвищує робоче зусилля.

При чистовому вирубіванні-пробиванні шорсткість поверхні зрізу становить Rz 0,4 - 1,6 мкм, а після зачистки — Rz 0,63 - 1,25 мкм. Відхилення розмірів контурів плоских металевих деталей розмірами від 50 до 120 мм і товщиною від 0,2 до 5 мм варіюється в межах (0,1 - 0,6) мм. При чистовому вирубіванні-пробиванні досягається точність IT 7(8) для товщини до 12 мм з міжосьовим відхиленням (0,015 - 0,030) мм [4].

Обмеження для застосування штампування визначаються технологічністю деталей, основними показниками яких є трудомісткість і технологічна собівартість. Ці критерії визначають критичні розміри деталей, відхилення від яких призводить до збільшення трудомісткості операцій штампування, а також до зростання вартості та складності штампів. Ці вимоги є вирішальними, якщо вони не суперечать конструкційним вимогам (параметри вказані у відносних величинах до товщини).

Форма та розміри штампованих деталей, точність штампування та характер виробництва визначають технологію штампування та форму робочого інструменту. Для масового та крупносерійного виробництва характерне використання автоматизованих процесів, при цьому для кожної деталі розробляється окремий технологічний процес і інструмент — штамп, оскільки номенклатура деталей зазвичай невелика, і розподіл витрат на кількість вироблених одиниць дає низьку собівартість виготовлення.

У умовах дрібносерійного та серійного виробництва, коли номенклатура продукції велика, традиційна підготовка до виробництва не є ефективною. Це зумовлено необхідністю постійного підтримання великої кількості інструментів і технологічних процесів, що, у свою чергу,

призводить до постійного зростання вартості виробничого циклу. У таких умовах більш доцільним є застосування таких технологічних процесів:

1. Штампування на універсальних переналагоджуваних штампах, що використовуються для виготовлення однотипних деталей різних розмірів.
2. Штампування по елементах на універсальних переналагоджуваних штампах.
3. Штампування на координатно-револьверних пробивних пресах.
4. Штампування (висічка) на прорізних пресах.
5. Штампування на універсальних збірних штампах (УЗШ).

У деяких випадках застосовують також спеціальні методи штампування, такі як штампування гумою або поліуретаном, штампування рідиною, штампування з підігрівом тощо.

Штампування по елементах проводиться на координатно-пробивних пресах, коли необхідно виготовляти деталі типу плат або панелей з великою кількістю отворів різної форми та розміру. Процес полягає в послідовному штампуванні окремих елементів за допомогою змінного інструменту, який встановлюється в револьверній головці преса. Обробка деталей може здійснюватися як автоматично, за допомогою числового програмного керування (ЧПК), так і вручну.

Одним із методів поелементного штампування є штампування-висічка, для якого характерна переривчаста взаємодія інструменту та заготовки. Це дозволяє зменшити зусилля на штампування та знижує ймовірність утворення тріщин. Процес здійснюється на прорізних пресах, автоматах і обробних центрах. Кількість ходів прорізних пресів малих габаритів коливається в межах 500–1400 ходів/хв, а у великих пресів-автоматів — 200–400 ходів/хв.

Недоліки штампування включають:

1. Довгий кінематичний ланцюг перетворення енергії в роботу.
2. Великі зусилля, що діють на інструмент.
3. Спеціальні вимоги до інструменту, зокрема до його твердості та стійкості.
4. Обмеження щодо товщини заготовки.
5. Складність конструкції інструменту та обладнання.
6. Висока вартість обладнання.

Ці фактори можуть знижувати ефективність процесу, особливо в умовах обмежених ресурсів або великих обсягів виробництва.

1.2. Обробка металів різанням

Обробка металів різанням є однією з найрозповсюджених технологій, які використовуються в металообробній промисловості для виготовлення деталей та виробів з високими вимогами до точності. Процес обробки металу включає в себе застосування спеціальних інструментів, які за допомогою різальних властивостей знімають шари матеріалу з заготовок, утворюючи деталі заданої форми і розміру. Обробка металів різанням включає в себе численні види обробки, такі як фрезерування, токарна обробка, шліфування, свердління, розточування, та інші, що дозволяють досягти різних рівнів точності та якісних характеристик поверхні.

Завдяки широкому спектру різних методів обробки, металообробка знаходить своє застосування в багатьох галузях промисловості: машинобудуванні, автомобілебудуванні, аерокосмічній промисловості, виробництві медичних приладів і навіть у виготовленні інструментів для інших галузей. Усі ці процеси потребують використання спеціалізованих інструментів, які мають різні характеристики, що забезпечують оптимальні умови для обробки конкретних матеріалів.

Токарна обробка

Токарна обробка металів є одним із основних видів обробки, що застосовується для обробки заготовок круглої форми. При цьому операції включають різання, точіння, нарізання різьб, обробку фасок, а також виготовлення деталей з великим числом елементів симетрії. В процесі токарної обробки заготовка обертається, а інструмент рухається поступально, знімаючи з її поверхні матеріал.

Токарні різці виготовляються з різних матеріалів, від простих сталей до твёрдосплавних сплавів. Вони повинні бути стійкими до високих температур і механічних навантажень, адже під час роботи на них виникає значне тертя і нагрівання.

Фрезерування

Фрезерування застосовується для обробки складних поверхонь і форм, а також для виконання точних операцій з різних матеріалів. Фрези можуть бути односторонніми чи багатосторонніми, а також оснащеними різними видами зубців для досягнення певного результату. Це універсальний метод, що використовується для створення прорізів, нарізання різьб, виготовлення фасок і навіть обробки поверхонь з високими вимогами до точності.

Шліфування

Шліфування – це процес обробки металу за допомогою абразивних матеріалів, що дозволяє досягати високої точності геометричних розмірів і шорсткості поверхні. Шліфування використовується для досягнення високої чистоти поверхні, особливо в тих випадках, коли необхідно забезпечити мінімальні відхилення від заданих розмірів.

Шліфувальні машини працюють із застосуванням спеціальних абразивних кругів або стрічок, що здатні видаляти дуже тонкі шари матеріалу, не погіршуючи геометрію деталі.

Свердління і розточування

Свердління використовується для створення отворів у заготовках. Це одна з найбільш поширених операцій в металообробці. Вона зазвичай проводиться за допомогою свердел, що обертаються, і дозволяє створювати точні отвори з високою якістю поверхні.

Розточування застосовується для обробки вже існуючих отворів, що дозволяє досягти точної форми і розміру, а також високої шорсткості поверхні.

Інструменти для обробки металів різанням можна поділити на кілька основних груп залежно від їх призначення і конструкції:

1. Токарні різці використовуються для обробки круглих заготовок, таких як вали, втулки, барабани тощо. Вони виготовляються з високоякісних сталей або тврдосплавних матеріалів. Токарні різці мають різну геометрію, що дозволяє виконувати точіння, нарізання різьб, обробку циліндричних поверхонь, а також створення складних фігур.

2. Фрези для фрезерування можуть бути односторонніми або багатосторонніми. Вони використовуються для створення різних типів поверхонь (плоских, фасонних, складних). Виготовляються з твердих сплавів або спеціальних швидкорізальних сталей.

3. Шліфувальні інструменти призначені для обробки деталей з високими вимогами до точності і чистоти поверхні. Вони виготовляються з різних абразивних матеріалів, таких як корунд або алмаз, і можуть бути використані для шліфування як плоских, так і об'ємних поверхонь.

4. Свердла застосовуються для створення отворів в заготовках різного діаметра. Вони можуть бути спіральними або перовими. Розточувальні інструменти використовуються для досягнення високої точності і чистоти поверхні отворів після їх свердління.

Вартість інструментів для обробки металів залежить від багатьох чинників: матеріалу виготовлення, складності конструкції, розмірів та характеристик виробника. Ось кілька прикладів:

1. Токарні різці можуть коштувати від 200 до 3000 грн і більше, залежно від матеріалу виготовлення (високоякісна сталь або твердосплав) та призначення інструмента.

2. Фрези мають широкий діапазон цін. Простий інструмент для фрезерування може коштувати від 500 до 2000 грн, але складні багатофункціональні або спеціалізовані фрези можуть коштувати до 5000 грн.

3. Шліфувальні диски варіюються за ціною залежно від розміру та типу абразиву. Прості круги можуть коштувати від 100 до 500 грн, а спеціалізовані шліфувальні інструменти можуть бути набагато дорожчими.

Свердла для обробки металу мають ціну в межах від 50 до 1000 грн залежно від діаметра, матеріалу виготовлення та виробника. Розточувальні інструменти також можуть коштувати від кількох сотень до декількох тисяч гривень.

При виборі інструментів для обробки металів варто враховувати кілька важливих факторів:

1. **Тип оброблюваного матеріалу:** для м'яких металів можуть використовуватися менш зносостійкі інструменти, тоді як для обробки

твердих матеріалів, таких як сталь, необхідні інструменти з високою твердотою.

2. **Точність обробки:** для деталей, які вимагають високої точності, слід використовувати більш дорогі та якісні інструменти.

3. **Економічність виробництва:** вибір інструментів залежить також від того, наскільки вигідно використовувати інструменти з високою зносостійкістю при великих обсягах виробництва.

1.3. Лазерне різання

Лазери використовуються в промисловості для виконання різних технологічних операцій, таких як різання, свердління, зварювання, гравіювання тощо. Останнім часом їх активно застосовують для розкрою листового металу. Принцип лазерного різання полягає в тому, що сильно сфокусований лазерний промінь націлюється на поверхню матеріалу, який обробляється. Під впливом променя метал поглинає велику кількість світлової енергії, внаслідок чого він розплавляється. Пари та рідкий метал відводяться з зони обробки за допомогою потоку інертного газу або кисню. Додавання кисню сприяє підвищенню швидкості та якості різання завдяки додатковій тепловій енергії, що виділяється при реакції кисню з металом. Здатність матеріалу до обробки лазером залежить від його здатності поглинати світлову енергію та теплопровідності.

Такий широкий спектр операцій можливий завдяки низці переваг лазерної технології:

1. Відсутність фізичного інструменту (замість нього працює лазерний промінь);
2. Можливість регулювання переміщення та потужності енергії променя.

Основним недоліком лазерного різання є висока вартість цієї

технології. Хоча впровадження нових технічних рішень поступово знижує витрати на одиницю продукції, використання лазера в деяких сферах залишається досить дорогим порівняно з альтернативними методами, навіть коли лазер може забезпечити вищу якість. З огляду на вартість лазерних систем, їх ефективне застосування можливе лише в тих випадках, коли використання традиційних технологій є надто складним або неможливим[13].

До недоліків технології лазерного розкрою листового металу можна віднести такі фактори:

1. Наявність зони термічного впливу, що може ускладнити подальшу механічну обробку і призвести до деформації (короблення) довгих тонколистових деталей.
2. Висока вартість обладнання.
3. Обмеження щодо товщини матеріалу, що підлягає різанню.

1.4. Плазмове різання

Завдяки високій продуктивності плазмового різання та використанню доступних плазмоутворювальних середовищ (повітря, вода), цей метод знаходить все ширше застосування в різних галузях [5]. На сьогоднішній день плазмове різання є одним з провідних способів обробки матеріалів, не тільки за обсягами використання в промисловості, а й за різноманіттям випускаемого обладнання.

Серед найбільш поширених способів термічного різання можна відзначити повітряно-плазмове різання (ППР), а також газокисневе різання (ГКР) і електродугове напівавтоматичне різання порошковим дротом (ЕДР). ППР, в свою чергу, має найкращі показники за густиною енергії та температурою ріжучого струменю.

Енергетичні параметри джерел тепла термічних способів різання

| Параметри ріжучого струменю (дуги) | ГКР | ЕДР | ППР |
|--|-----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Густина теплового потоку, Вт/см ² | 10 ⁴ | 10 ⁵ - 10 ⁶ | 10 ⁶ - 10 ⁷ |
| Температура, 10 К | 3 - 4 | 6 - 7 | 14 - 16 |

Завдяки високим енергетичним характеристикам плазмовий струмінь також має найбільший динамічний тиск, що разом з іншими факторами забезпечує перевагу ППР перед газокисневим різанням (ГКР) і тим більше електродуговим напівавтоматичним різанням порошковим дротом (ЕДР) за швидкісними показниками. Зокрема, на товщині до 50-60 мм ППР демонструє значно кращі результати порівняно з ГКР, а ЕДР поступається їм на порядок.

Незважаючи на більші початкові витрати на обладнання для ППР, ці витрати швидко окупаються завдяки низьким експлуатаційним витратам на матеріали та енергію. Якщо ж враховувати також вартість робочої сили, яка є важливою частиною витрат, то, зважаючи на значну перевагу ППР у продуктивності, окупність витрат на обладнання зазвичай становить не більше трьох місяців, що підтверджує практичний досвід.

До важливих переваг ППР слід також віднести його універсальність щодо різних видів металів. Наприклад, леговані сталі та кольорові метали не підлягають газокисневому різанню (ГКР) або ж вимагають використання спеціальних присадочних порошоків, що ускладнює процес. Плазмове різання не має таких обмежень, що робить його більш універсальним і ефективним.

Для різання металів використовують плазмову дугу прямої дії, яка, на відміну від зварювальної дуги, характеризується вищим ступенем обтиснення стовпа, що забезпечує більшу концентрацію теплового потоку і швидкість течії плазмового струменя. Завдяки такій концентрації тепла і

механічній дії стовп дуги занурюється в метал і передає йому енергію, що сприяє виплавленню і видуванню металу з порожнини різку. У порівнянні з кисневим факелом, для якого потрібно витратити час на місцеве прогрівання металу, плазмова дуга врізається майже миттєво завдяки своїй високій температурі [6].

Висока концентрація енергії в плазмовому струмені та велика швидкість різання дозволяють виконувати операції при товщині зони термічного впливу (ЗТВ) до 0,85 мм, що забезпечує відсутність деформацій, які можуть виникати через перегрів розрізуваних матеріалів, особливо при різанні товстолистового прокату. Однак така тонка ЗТВ може ускладнювати подальшу обробку матеріалів.

Плазмове різання застосовується для різання всіх металів і їх сплавів, а для легованих сталей та кольорових металів цей метод є практично основним способом термічного різання. Якість різання, яку забезпечують сучасні плазмові установки, порівнюється з якістю лазерного різання, але має менші витрати на експлуатацію.

ППР також активно використовують для завершальної розмірної обробки деталей. Це призвело до створення нової високоефективної технології виготовлення та ремонту листових деталей, які мають ріжучу кромку (лезо), таких як лапи культиваторів, диски важких борін, леміхи тощо [7].

Однак ППР має обмеження щодо виготовлення деталей з зовнішніми та внутрішніми фасонними контурами, особливо коли мова йде про габарити близько 100 мм з дрібними елементами, при високих вимогах до якості та точності обробки. Товстолистові деталі, отримані за допомогою ППР, можуть мати оплавлену і не зовсім перпендикулярну до площини деталі поверхню різку.

Плазмове різання при струмі 100-400 А і напрузі 380 В дозволяє здійснювати розкрій матеріалу товщиною 8-30 мм із будь-яким контуром при продуктивності 62-25 мм/с на максимальному струмі. Точність різання при цьому становить кілька міліметрів, а ширина різу — 3-5 мм. Якщо допуск на розміри виготовлених деталей, наприклад, Н14, то для досягнення потрібної точності потрібна додаткова механічна обробка. Також деталі часто потребують очищення від бризок металу (грату).

Зменшення габаритів деталей призводить до зниження продуктивності, а також підвищує знос електродів, які розраховані на 100 вмикань.

До основних недоліків процесу плазмового різання можна віднести:

1. Велика зона термічного впливу, яка може досягати 1 мм при обробці вуглецевих сталей. Це ускладнює подальшу механічну обробку, оскільки вплив високих температур може змінювати структуру матеріалу.

2. Складність отримання отворів діаметром до 50 мм, що обмежує застосування цього методу для точного різання малих за розміром елементів.

3. Обмеження за товщиною розрізаємого металу, яка не повинна перевищувати 80-100 мм. Це обумовлює обмеження на використання ППР для різання дуже товстих металів.

4. Жорсткі вимоги до відхилення від перпендикулярності різу. Залежно від товщини деталі, кут відхилення не повинен перевищувати 10-50°. В іншому випадку виникає значне розширення різу, що знижує точність і якість обробки.

1.5. Електроерозійна обробка

Спосіб електричного ерозійного оброблення (ЕЕО) ґрунтується на використанні нестационарних електричних розрядів для локального руйнування металу. Цей метод став основою для багатьох технологічних процесів виготовлення відповідальних деталей у різних типах виробництва, включаючи індивідуальне, серійне та масове виробництво.

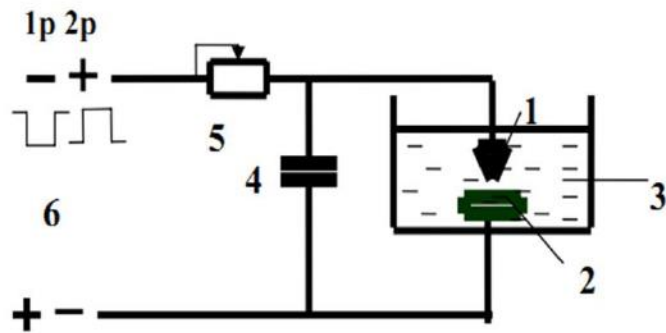


Рисунок 1.1. Схема електроерозійної обробки матеріалів: 1 - електрод-інструмент, 2 - оброблювана деталь, 3 - середа, в якій проводиться розряд, 4 - конденсатор, 5 - реостат, 6 - джерело живлення, 1р - режим електроіскрової обробки, 2р - режим електроімпульсної обробки

Схема електроерозійної обробки матеріалів, представлена на рис. 1.1, показує, як процес здійснюється за допомогою імпульсної напруги різної полярності, що відповідає електроіскровому режиму (1р) та електроімпульсному режиму (2р). Напруга живлення заряджає конденсатор (4), паралельно з яким знаходиться розрядний проміжок між електродом-інструментом (1) та оброблюваною деталлю (2), що занурені в рідину з низькою діелектричною проникністю.

Коли напруга на конденсаторі перевищує потенціал запалювання розряду, рідина пробивається, нагрівається до температури кипіння, і утворюється газовий міхур з парів рідини. Потім електричний розряд розвивається в газовому середовищі, що призводить до інтенсивного локального розігріву деталі. Приповерхневі шари матеріалу плавляться, а продукти розплаву у вигляді кульок затверджуються в проточній рідині і виносяться із зони обробки.

Залежно від параметрів електричних розрядів, існують різні види ЕЕО:

1. **Електроіскрова обробка** — характеризується великими енергіями розрядів і використовується для грубого та швидкого оброблення матеріалів.

2. **Високочастотна електроімпульсна обробка** — застосовується для точнішого оброблення з меншою глибиною впливу, зазвичай для матеріалів з високими вимогами до точності.

3. **Низькочастотна електроімпульсна обробка** — знижена частота імпульсів, що дозволяє отримати кращу якість поверхні.

4. **Електроімпульсна обробка середніх частот** — застосовується для більш збалансованих режимів обробки, комбінуючи швидкість та точність.

5. **Високочастотна електроімпульсна обробка** — надає дуже високу точність при менших енергіях розрядів.

6. **Обробка з застосуванням широкодіапазонних генераторів імпульсів** — дозволяє працювати з різними режимами і матеріалами, забезпечуючи гнучкість процесу.

Ці різновиди електроерозійної обробки дозволяють адаптувати процес до вимог конкретних виробничих умов і типів оброблюваних матеріалів.

ЕЕО широко використовують для виконання розділових операцій, зокрема для виготовлення:

1. **Глухих і наскрізних пазів та щілин** малої ширини, що важливо для досягнення високої точності при обробці складних конструкцій.

2. **Робочих деталей розділових штампів** невеликих габаритів, виготовлених з твердих сплавів і загартованих сталей, де важлива висока точність та можливість обробки матеріалів, що важко піддаються механічній обробці.

3. **Робочих частин різців і інших інструментів**, де необхідно досягти високої точності геометрії деталей, а також забезпечити збереження твердості та витривалості інструментів.

4. **Розрізання заготовок із вольфраму та інших важкооброблюваних матеріалів**, наприклад, магнітних сплавів. Для таких матеріалів електроерозійний метод є ідеальним, оскільки дозволяє досягти мінімальних

втрат матеріалу та високої точності різання.

Цей метод є надзвичайно ефективним для обробки матеріалів, що важко піддаються традиційним методам обробки, і дозволяє вирішувати задачі, які вимагають високої точності та мінімальних витрат матеріалу.

У залежності від параметрів імпульсів і використовуваного обладнання ЕЕО підрозділяють на електроіскрову, електроімпульсну, високочастотну і електроконтактну.

Електроіскрова обробка базується на використанні іскрового розряду, при якому температура в каналі розряду може досягати до 10 000 °С. Цей процес супроводжується значними гідродинамічними силами, проте імпульси, що використовуються, є відносно короткими, і тому кожен імпульс не несе в собі значну кількість енергії. Це означає, що вплив кожного розряду на поверхню матеріалу є обмеженим.

Завдяки такому процесу електроіскрова обробка дозволяє отримати хорошу якість поверхні, але метод не має високої продуктивності. Одним з основних недоліків є високий знос інструменту, який може досягати 100% від обсягу знятого матеріалу. Це робить процес менш економічним в порівнянні з іншими методами обробки.

Електроіскрова обробка найчастіше застосовується при прецизійній обробці малих деталей, виготовленні дрібних отворів, а також для вирізання контурів. Вона також є популярною для виготовлення твердосплавних штампів за допомогою дротяного електрода, коли потрібна висока точність і якість поверхні, але не вимоглива продуктивність.

При електроіскровій обробці застосовують пряму полярність, тобто електроіскровий електрод (ЕІ) підключається до катода, а електричний зварювальний електрод (ЕЗ) – до анода. Генератор імпульсів налаштовується на відповідні режими обробки, при цьому тривалість імпульсу може становити від 20 до 200 мкс. Величина енергії імпульсу регулюється шляхом підбору ємності конденсаторів, що дозволяє налаштовувати процес в

залежності від вимог до точності та швидкості обробки.

Обробка здійснюється в ваннах, заповнених діелектричною рідиною. Така рідина має кілька важливих функцій:

- вона виключає перегрів електродів (як інструменту, так і заготовки),
- охолоджує продукти руйнування,
- зменшує бічні розряди між інструментом і заготовлюю, що допомагає підвищити точність обробки.

Для забезпечення безперервності процесу обробки, важливо підтримувати постійний зазор між інструментом (електродом) і заготовлюю. Це досягається за допомогою системи стеження та механізму автоматичної подачі інструментів, що дозволяє підтримувати необхідний зазор протягом всього процесу.

Інструменти-електроди для електроіскрової обробки виготовляються з різних матеріалів, зокрема:

- міді,
- латуні,
- мідно-графітових сплавів,
- та інших матеріалів, які забезпечують необхідну стійкість і ефективність обробки при високих температурах і швидких імпульсах.

Ці матеріали обираються через їх високу електропровідність та здатність витримувати великі теплові навантаження, що робить процес ефективним навіть для важкооброблюваних матеріалів [8].

У ерозійних верстатах використовують різні ГІ електричних розрядів: RC (резистор - ємність); RLC (L - індуктивність); LC; лампові генератори. У промисловості застосовують широкodiaпозонние транзисторні ГІ. Ці генератори споживають потужність 4 ... 18 кВт при силі струму 16 ... 125 А.

Ефективність обробки складає $75 \dots 1900 \text{ мм}^3/\text{хв}$ при шорсткості обробленої поверхні $4 \dots 0,2 \text{ мкм}$. [9]

Електроіскровий метод обробки застосовується для обробки практично всіх струмопровідних матеріалів, але ефект ерозії при однакових параметрах електричних імпульсів може значно відрізнятись в залежності від матеріалу. Така різниця в інтенсивності ерозії обумовлена електроерозійною оброблюваністю матеріалів, що характеризує їх здатність до руйнування під впливом іскрових розрядів.

Електроерозійна оброблюваність матеріалу залежить від низки факторів:

1. Електричні властивості матеріалу (електропровідність),
2. Теплопровідність,
3. Твердість,
4. Механічні властивості, зокрема стійкість до термічного пошкодження.

Наприклад, матеріали з високою електричною провідністю (як мідь чи латунь) зазвичай мають хорошу оброблюваність, оскільки ефективно проводять електричний струм, що сприяє більш швидкому і рівномірному руйнуванню поверхні. У той же час, матеріали з низькою провідністю (наприклад, високовуглецеві сталі чи тврдосплави) можуть вимагати більшої енергії для досягнення ефекту ерозії, а також мати більший знос інструментів.

Розуміння електроерозійної оброблюваності дозволяє оптимізувати параметри обробки, вибирати відповідні матеріали для виготовлення інструментів та досягати високої якості обробки, зменшуючи при цьому знос інструментів та підвищуючи ефективність процесу.

До недоліків процесу відносять: порівняно низьку продуктивність обробки, великий знос електродів і утворення на деталях дефектного шару товщиною $0,05 \dots 0,5 \text{ мм}$.

Електроімпульсна обробка

Електроімпульсна обробка (або обробка імпульсами дугового розряду) була впроваджена в промисловість на початку 1950-х років і відрізняється від електроіскрової обробки низкою важливих характеристик. На відміну від іскрового розряду, дуговий розряд має температуру плазми в межах 4000-5000 °С, що дозволяє значно збільшити тривалість імпульсів і зменшити проміжки між ними. Завдяки цьому можна вводити в зону обробки значні потужності (десятки кВт), що істотно підвищує продуктивність обробки.

Особливістю дугового розряду є переважне руйнування катода, що дозволяє досягти низького зносу інструменту (в цьому випадку інструмент підключається до анода). Знос інструменту при електроімпульсній обробці складає лише 0,05-0,3% від обсягу знятого матеріалу, і в деяких випадках інструмент взагалі може не зношуватись. Це робить метод економічно вигідним у порівнянні з іншими методами, такими як електроіскрова обробка.

Електроімпульсний метод є особливо ефективним для чорнової обробки та трикоординатної обробки фасонних поверхонь, оскільки дозволяє швидко видаляти великі об'єми матеріалу. Однак, при цьому він зазвичай застосовується для виконання грубих операцій, тоді як електроіскровий метод більш підходить для тонкої і прецизійної обробки, зокрема для обробки малих отворів або складних контурів.

Обидва методи – електроіскровий і електроімпульсний – часто доповнюють один одного, оскільки вони мають різні переваги в залежності від типу обробки і матеріалу. Комбінація цих методів дозволяє досягти високої ефективності та точності в різних виробничих процесах [10].

При електроімпульсній обробці використовують електричні імпульси більшої тривалості, що дозволяє вводити значні потужності в зону обробки.

Великі потужності імпульсів, одержувані від електронних генераторів, сприяють високій продуктивності процесу. Це особливо корисно для операцій, де потрібна швидка обробка матеріалу, таких як чорнова обробка або попередня обробка деталей.

Застосування генераторів імпульсів і графітових електродів, а також обробка на зворотній полярності дозволяє значно зменшити руйнування електродів, що підвищує економічність процесу та знижує витрати на інструменти.

Електроімпульсну обробку найбільш доцільно застосовувати для:

- Попередньої обробки штампів,
- Турбінних лопаток,
- Твердосплавних деталей,
- Фасонних отворів в деталях з корозійно-стійких сталей та жароміцних сплавів.

Цей метод ідеально підходить для виготовлення деталей з складною геометрією та матеріалів, що важко піддаються традиційним методам обробки.

Для забезпечення високої точності та надійності електроімпульсної обробки в верстатах для електроімпульсної обробки широко використовуються системи програмного керування (ПК). Вони забезпечують високоточну обробку та дозволяють виготовляти деталі складної геометрії з дуже високою точністю. Чутливі сервосистеми в конструкціях верстатів дозволяють коригувати параметри обробки в реальному часі, забезпечуючи високу якість виготовлених виробів.

Основним недоліком традиційних способів ЕЕО, заснованих на використанні нестационарних електричних розрядів є порівняно низька продуктивність, що обмежує область їх раціонального застосування

порівняно з розмірною обробкою електричною дугою.

Розмірна обробка електричною

Розмірна обробка електричною дугою (РОД) є високоефективною альтернативою традиційним процесам обробки металів різанням та тиском, зокрема в умовах серійного та масового виробництва. Це пояснюється кількома вагомими перевагами перед іншими методами:

1. Висока рентабельність: Використання штампів може бути занадто дорогим для певних типів виробництва через високу вартість виготовлення інструментів. У порівнянні з плазмовим і лазерним різанням, яке не завжди дає готову деталь, РОД дозволяє виконати обробку з мінімальними витратами.

2. Переваги перед фрезеруванням: Фрезерування фасонного контуру може бути малопродуктивним і технічно складним, особливо коли поверхня заготовки вже загартована. У таких випадках РОД є більш ефективним, оскільки він забезпечує високу продуктивність та точність.

Суть процесу розмірної обробки електричною дугою полягає в тому, що обробка здійснюється стаціонарною електричною дугою, яка горить між електродом-інструментом (ЕІ) і електродом-заготівлею (ЕЗ) в потоці робочої рідини (рис 1.2). Це відбувається під динамічним тиском потоку рідини в зоні обробки, який складає не менше 1-2 кПа (що відповідає швидкості потоку приблизно 1,5–2 м/с). Рідина грає роль охолоджувального та очищаючого середовища, що видаляє продукти обробки.

В процес обробки дуговий розряд горить поперечно до потоку рідини, що дозволяє забезпечити ефективне і локальне рівномірне руйнування металу. Потік рідини видаляє продукти ерозії з зони обробки, що запобігає їх впливу на подальшу обробку і дозволяє досягти високої точності.

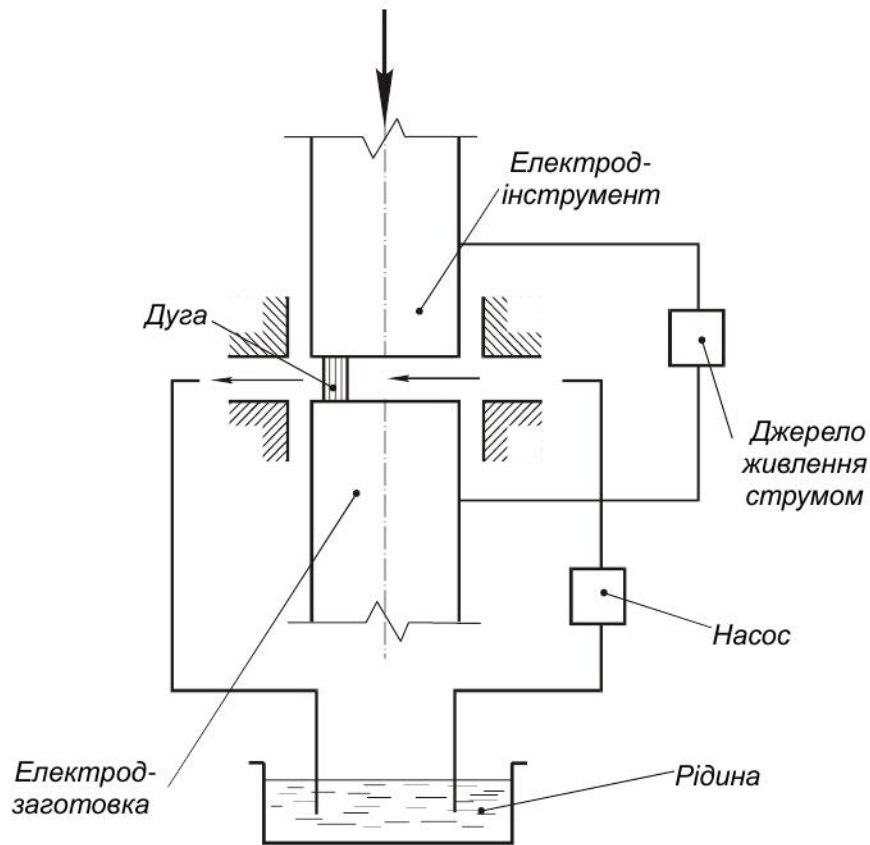


Рисунок 1.2. Принципова схема РОД

Переваги РОД:

- Високі енергетичні характеристики дугового розряду дозволяють досягти високої продуктивності при обробці різних матеріалів, включаючи тверді сплави та матеріали з високою міцністю.
- Процес є ефективним для обробки великих серій деталей з високою точністю.
- Завдяки постійним енергетичним характеристикам та оптимальному руху дуги, РОД дозволяє підтримувати високу стабільність процесу, знижуючи витрати на інструменти та підвищуючи довговічність обладнання.

РОД є ефективним методом обробки, який дозволяє оптимізувати процеси при високій продуктивності та точності, особливо в умовах серійного і масового виробництва, коли інші методи можуть бути економічно або технологічно нераціональними.

Перспективним для виготовлення листових деталей із зазначеними параметрами 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. [14].

РОД (розмірна обробка електричною дугою) — це принципово новий процес обробки металів, який заснований на використанні стаціонарної електричної дуги. За суттю, РОД є різновидом електроерозійної обробки (ЕЕО), представляючи собою наступний етап розвитку цієї технології. Порівняно з традиційними методами ЕЕО, що використовують нестаціонарні електричні розряди (такими як електроіскрова та електроімпульсна обробка), РОД має кілька важливих переваг.

Значно більш високу продуктивність (в 5...10 разів і більше), що наближується до продуктивності обробки металів різанням. Продуктивність РОД прямо пропорційна силі струму дуги. В умовах РОД струм дуги може досягати сотень і тисяч ампер. Відомих обмежень по силі струму обробки, характерних для електроіскрової обробки, тут нема.

Менші питомі витрати електроенергії (приблизно вдвічі), що помітно підвищує економічну ефективність процесу.

Значно дешевші джерела живлення технологічним струмом (звичайні джерела живлення зварювальної дуги).

Правильно налаштовані параметри електродів і їх рухи в процесі розмірної обробки електричною дугою (РОД) дозволяють досягти бажаних результатів, що в свою чергу дає можливість застосувати різні технологічні прийоми, які характерні для електроерозійної обробки (ЕЕО). Зокрема, змінюючи типорозміри електродів і надаючи їм відповідні рухи подачі, можна реалізувати багато з відомих технологічних схем формоутворення, що застосовуються в ЕЕО [15].

Якість обробленої поверхні, яка визначається її шорсткістю та глибиною зони термічного впливу, є, головним чином, функцією динамічного тиску потоку робочої рідини і, менше, робочого струму, покращується при збільшенні динамічного тиску потоку та зменшенні струму і, в цілому, не поступається досягнутій при відомих способах ЕЕО.

Отже робота, що спрямованих на розробку технологій та дослідження технологічних характеристик процесу РОД деталей складного профілю електродами-інструментами із різних матеріалів є актуальним науково-прикладним завданням, успішне виконання якого дозволить більш широко впроваджувати процес РОД у виробництво.

Мета роботи: дослідження технологічних характеристик процесу та розробка технології для розмірної обробки електричною дугою деталей складного профілю електродами-інструментами з різних матеріалів.

Задачі дослідження:

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД та визначення меж його раціонального застосування;
2. Розробка технології обробки деталей складного профілю електрод-інструментами з різних матеріалів;
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 у виробництві для обробки глибоких отворів, обробки різноманітних стержнів, деталей зі складним профілем.

Для ефективного застосування способу РОД необхідні дослідження фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД, розробка технології та пристроїв, приклади реалізації конкретних технологій обробки деталей та визначення області раціонального практичного застосування процесу і його конкуренто спроможності порівняно з іншими способами виготовлення робочих деталей розділових штампів.

Встановлено, що 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 [16,17,18], що дало можливість отримати деякі теоретичні уявлення про фізичний механізм процесу і оцінити теоретичні передумови кількісно.

Теоретичні і експериментальні дослідження дозволяють зробити висновок, що технологічні характеристики процесу можуть бути представлені у вигляді функціональної ступеневої 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 обробки деталей на універсальному копіювально-прошивному верстаті "Дуга-8Г" (рис. 2.1).

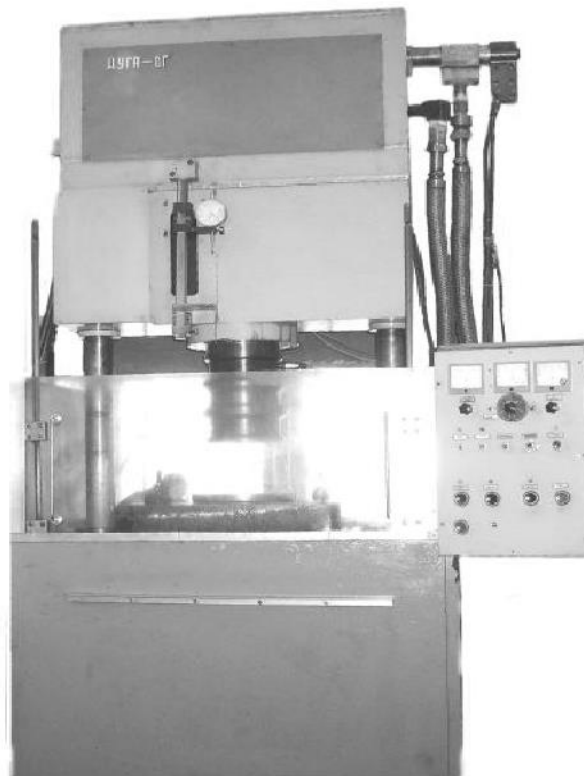


Рисунок 2.1. Універсальний копіювально-прошивний верстат "Дуга-8Г"

2.2. Обладнання, пристрої, апаратура

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

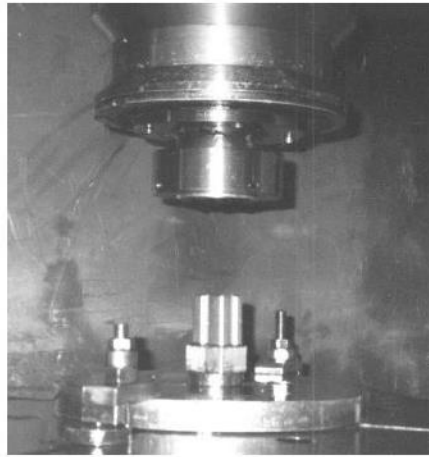


Рис.2.2. Деталь, оброблена в пристрої

Експериментальні дослідження процесу РОД 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, встановленої на персональному комп'ютері із програмним забезпеченням "Oscilloskop", яке дозволяло переглядати і аналізувати отримані осцилограми в різних масштабах часу.

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".

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 (X_1), А; статичний тиск робочої рідини на вході в зазор P_s (X_2), МПа.

Регулювання сили струму I і тиску P_s в зазначених далі межах обумовлені можливостями техніки, що при цьому використовувалась, та технологічною доцільністю. Зокрема, в якості джерел живлення для РОД використовують стандартні зварювальні випрямлячі з зовнішньою падаючою характеристикою ВДУ-504, розраховані на максимальний струм $I_{max}= 200$ 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 виготовлені безступеневого пуансона

| 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 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:

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

Тепер задача зводиться до побудови лінійної моделі виду

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

де $Y = \lg y$

$$b_{i0} = \lg k (k = \text{const}) \cdot (b_{i0})$$

$$b_1 = \beta_1 \quad X_1 = \lg I$$

$$b_2 = \beta_2 \quad X_2 = \lg P_s \text{ і т.д.}$$

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 і застосуванням програмного пакету STATISTICA 6.0 [16]. В табл. 2.4–2.5 представлено значення оцінок коефіцієнтів регресії ($BETA$) та значення коефіцієнтів регресії (B), значення критерію Стюдента (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?= ,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 |

Dep. Var. - Ім'я залежної змінної. В нашому випадку *lgM*; *Numberofcases* - кількість експериментів, за якими побудована регресія; *Multiple R* - коефіцієнт множинної кореляції; *R-square* - *RI* - квадрат коефіцієнта множинної кореляції, що зветься коефіцієнтом детермінації; *Adjusted R-square* - скоригований коефіцієнт детермінації; *Standard Error of Estimate* - стандартна похибка оцінки, що є мірою розпорошування результатів спостереження відносно кривої регресії; *Intercept* - оцінка вільного члена регресії; *Std.Error* - стандартна похибка оцінки вільного члена; *t(df) and p-value* - значення *t* - критерія і рівня *p*. *t*-критерій використовують для перевірки гіпотези про рівність 0 вільного члена регресії; *F* - значення *F*-критерія; *df* - число ступенів свободи *F*-критерія; *p* - рівень значимості; *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 ураження 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 [19,20].

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 [19, 20].

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 чавунним ЕІ

Вихідні данні для досліджень: робоча рідина суміш мастила індустріального І20А і гасу в співвідношенні 50% кожного, матеріал оброблюваної деталі – сталь 45, матеріал з якого виготовлено ЕІ – чавун СЧ20, полярності електродів – зворотна, продуктивність обробки.

Основні керуючі фактори, що впливають на якісні та кількісні показники, є сила струму і статичний тиск потоку робочої рідини.

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

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

Таблиця 3.1 - Межі варіювання факторів

| Фактори | X_{max} | X_{min} | X_0 | ΔX |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-------|------------|
| Сила технологічного струму I, A | 150 | 50 | 100 | 50 |
| Статичний тиск P_s, MPa | 1,6 | 0,8 | 1,2 | 0,4 |

Таблиця 3.2 - Матриця планування експерименту

| Номер експерименту | $x_1 (I)$ | $x_2 (P_s)$ | $y_1 (M)$ мм ³ /хв | $y_2 (Ra)$ мкм | $y_3 (\delta)$ мм | $y_4 (\gamma)$ % |
|--------------------|-----------|-------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 1 | - | - | 507 | 11,5 | 0,16 | 22,5 |
| 2 | - | 0 | 426 | 8,5 | 0,12 | 19,2 |
| 3 | - | + | 350 | 5 | 0,09 | 16,8 |
| 4 | 0 | - | 1048 | 14,5 | 0,19 | 26 |
| 5 | 0 | 0 | 892 | 10,2 | 0,13 | 22,1 |
| 6 | 0 | + | 680 | 6,5 | 0,1 | 18,3 |
| 7 | + | - | 1752 | 16,5 | 0,2 | 29 |
| 8 | + | 0 | 1315 | 12,1 | 0,14 | 24,2 |
| 9 | + | + | 1050 | 8,5 | 0,11 | 19,9 |

Аналіз матриці планування експерименту виконуємо за допомогою модулю «Multiple Regression»

Продуктивність обробки отворів чавунним ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(M) = 891,111 + 472,333x_1 - 204,5x_2. \quad (3.1)$$

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

$$M = 7,61 \cdot I^{1,049} \cdot P_s^{-0,624}. \quad (3.2)$$

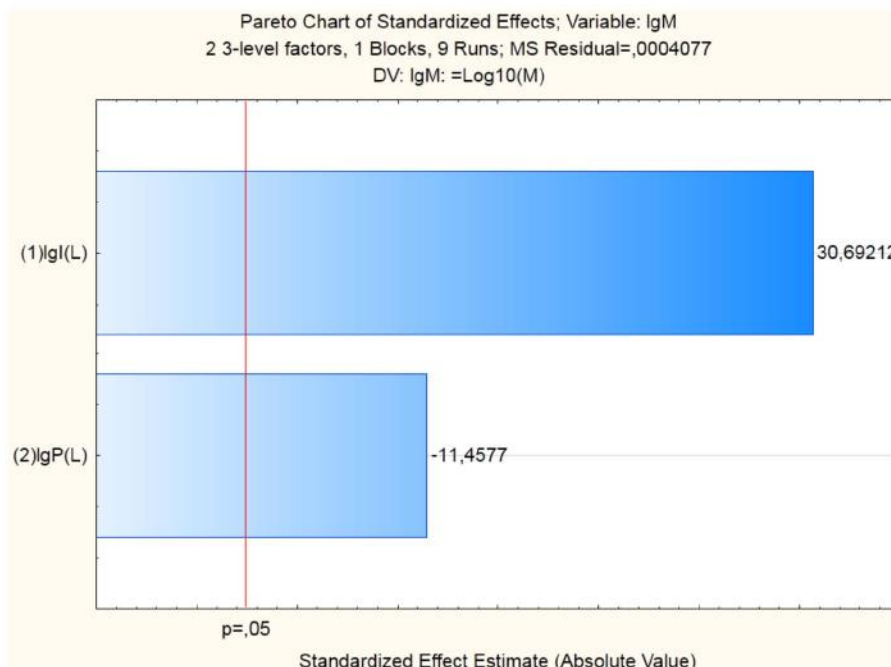


Рис. 3.1. Степінь впливу факторів на продуктивність процесу M

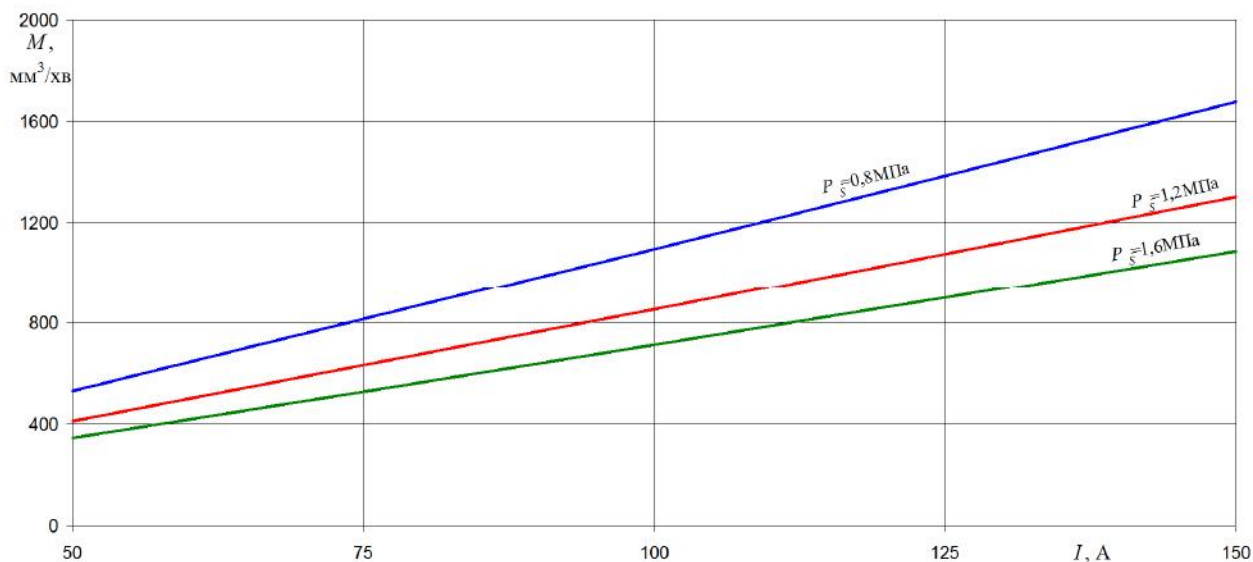


Рис. 3.2. Залежність продуктивності процесу M від I та P_s

Як видно з рис. 3.1 на продуктивність процесу найбільший вплив чинить сила технологічного струму I менш впливовим є статичний тиск робочої рідини P_s .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.3 - ANOVA

| ANOVA; Var.:lgM; R-sqr=,99444; Adj.:99259 (чавун.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0004077 DV: lgM: =Log10(M) | | | | | |
|--|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Factor | SS | df | MS | F | p |
| (1)lgL | 0,384039 | 1 | 0,384039 | 942,0060 | 0,000000 |
| (2)lgP L | 0,053520 | 1 | 0,053520 | 131,2796 | 0,000027 |
| Error | 0,002446 | 6 | 0,000408 | | |
| Total SS | 0,440005 | 8 | | | |

Таблиця 3.4 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgM; R-sqr=,99444; Adj.:99259 (чавун.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0004077 DV: lgM: =Log10(M) | | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------|----------|----------|-------------------|-------------------|-----------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Factor | Effect | Std Err. | t(6) | p | -95,% Cnf.Limt | +95,% Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. Coeff. | -95,% Cnf.Limt | +95,% Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | 2,879641 | 0,006784 | 424,4877 | 0,000000 | 2,863042 | 2,896241 | 2,879641 | 0,006784 | 2,863042 | 2,896241 |
| (1)lg(L) | 0,500304 | 0,016301 | 30,6921 | 0,000000 | 0,460418 | 0,540191 | 0,250152 | 0,008150 | 0,230209 | 0,270095 |
| (2)lgP(L) | -0,187989 | 0,016407 | -11,4577 | 0,000027 | -0,228136 | -0,147842 | -0,093995 | 0,008204 | -0,114068 | -0,073921 |

Шорсткість поверхні отворів оброблених чавунним EI

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ra) = 10,37 + 2,016x_1 - 3,75x_2. \quad (3.3)$$

Математична модель шорсткості поверхні отворів має наступний

вигляд, мкм:

$$Ra = 2,178 \cdot I^{0,372} \cdot P_s^{-1,085}. \quad (3.4)$$

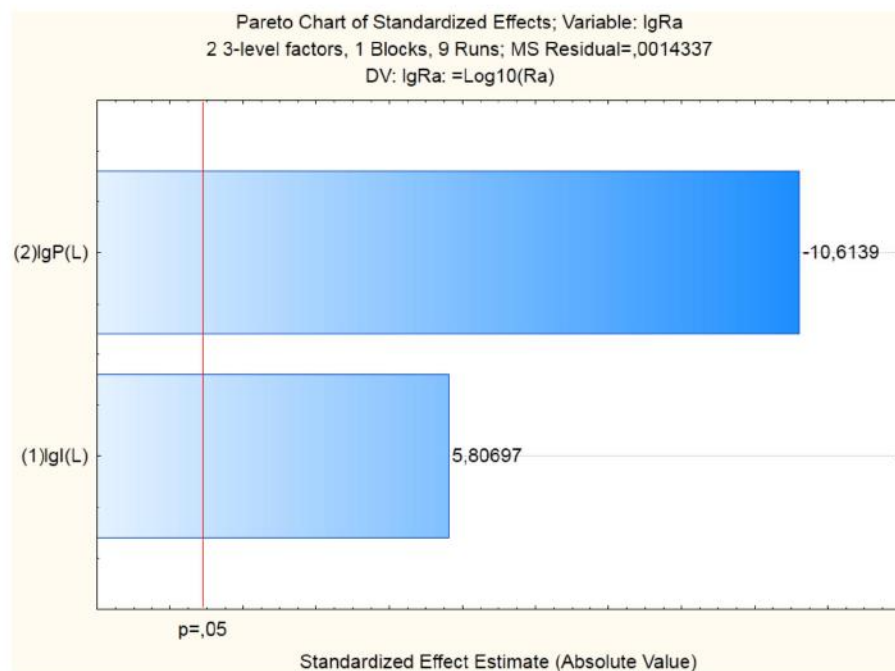


Рис. 3.3. Степінь впливу факторів на шорсткість поверхні Ra

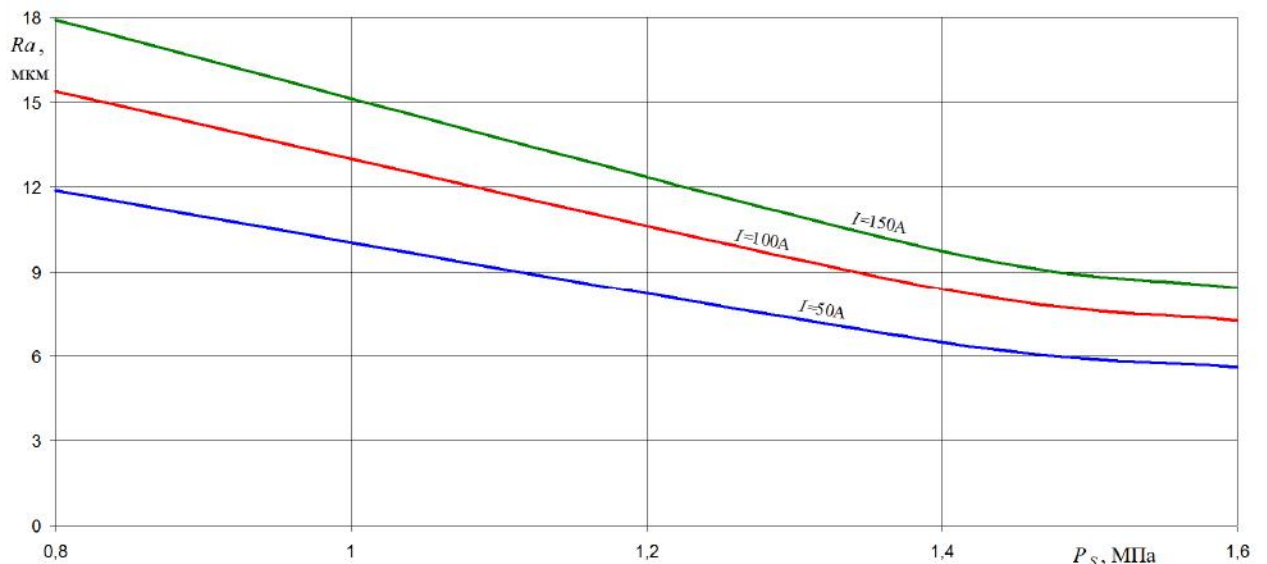


Рис. 3.4. Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від P_s та I

Як видно з рис. 3.3 на шорсткість обробленої поверхні найбільший вплив чинить статичний тиск робочої рідини P_s , менш впливовим є сила технологічного струму I .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.5 - ANOVA

| ANOVA; Var.:lgRa; R-sqr=.96062; Adj.:.9475 (чавун.sta) | | | | | |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0014337 | | | | | |
| DV: lgRa: =Log10(Ra) | | | | | |
| Factor | SS | df | MS | F | p |
| (1)lgI L | 0,048345 | 1 | 0,048345 | 33,7209 | 0,001144 |
| (2)lgP L | 0,161512 | 1 | 0,161512 | 112,6553 | 0,000041 |
| Error | 0,008602 | 6 | 0,001434 | | |
| Total SS | 0,218460 | 8 | | | |

Таблиця 3.6 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgRa; R-sqr=.96062; Adj.:.9475 (чавун.sta) | | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------|----------|----------|-----------------|-----------------|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0014337 | | | | | | | | | | |
| DV: lgRa: =Log10(Ra) | | | | | | | | | | |
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. Coeff. | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | 0,990575 | 0,012722 | 77,8659 | 0,000000 | 0,959446 | 1,021703 | 0,990575 | 0,012722 | 0,959446 | 1,021703 |
| (1)lgI(L) | 0,177510 | 0,030568 | 5,8070 | 0,001144 | 0,102712 | 0,252309 | 0,088755 | 0,015284 | 0,051356 | 0,126154 |
| (2)lgP(L) | -0,326571 | 0,030768 | -10,6139 | 0,000041 | -0,401858 | -0,251284 | -0,163285 | 0,015384 | -0,200929 | -0,125642 |

Об'ємний знос EI при виготовленні отвору чавунним EI

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\gamma) = 22 + 2,433x_1 - 3,75x_2. \quad (3.5)$$

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

$$\gamma = 9,592 \cdot I^{0,196} \cdot P_s^{-0,485} \quad (3.6)$$

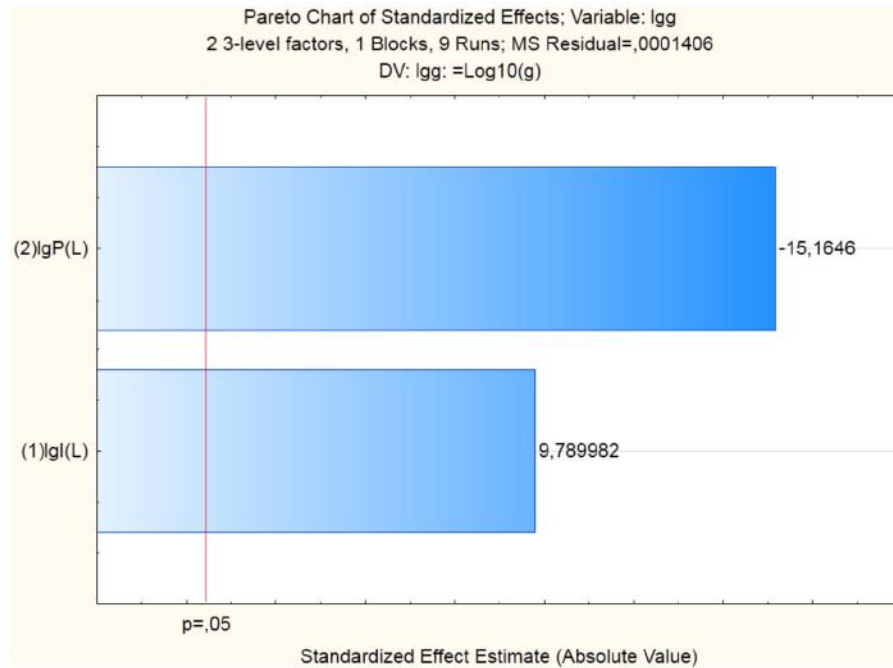


Рис. 3.5. Степінь впливу факторів на об'ємний знос ЕІ γ

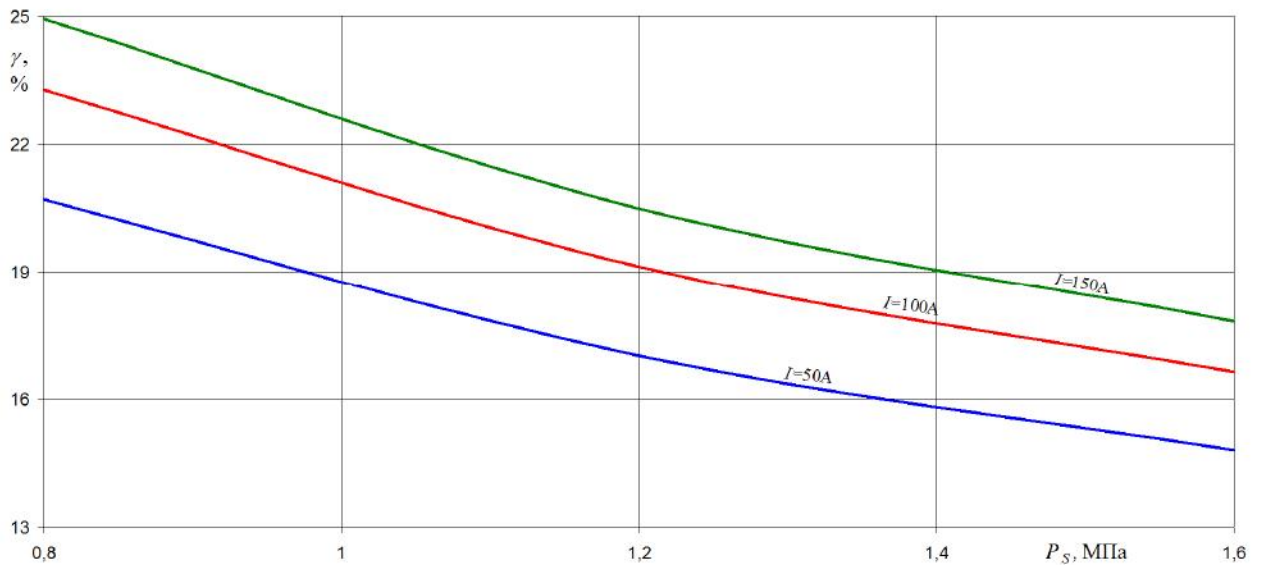


Рис. 3.6. Залежність об'ємного зносу ЕІ γ від P_s та I

Як видно з рис. 3.5 на знос ЕІ γ найбільший вплив чинить статичний тиск робочої рідини P_s менш впливовим є сила технологічного струму I .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.7 - ANOVA

| ANOVA; Var.:lgg; R-sqr=,98192; Adj:,97589 (чавун.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0001406 DV: lgg; =Log10(g) | | | | | |
|--|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Factor | SS | df | MS | F | p |
| (1)lgL | 0,013475 | 1 | 0,013475 | 95,8438 | 0,000065 |
| (2)lgP L | 0,032331 | 1 | 0,032331 | 229,9636 | 0,000005 |
| Error | 0,000844 | 6 | 0,000141 | | |
| Total SS | 0,046649 | 8 | | | |

Таблиця 3.8 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgg; R-sqr=,98192; Adj:,97589 (чавун.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0001406 DV: lgg; =Log10(g) | | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------|----------|----------|--------------------|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. Coeff. | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | 1,336456 | 0,003984 | 335,4769 | 0,000000 | 1,326709 | 1,346204 | 1,336456 | 0,003984 | 1,326709 | 1,346204 |
| (1)lg(L) | 0,093715 | 0,009573 | 9,7900 | 0,000065 | 0,070292 | 0,117138 | 0,046857 | 0,004786 | 0,035146 | 0,058569 |
| (2)lgP(L) | -0,146111 | 0,009635 | -15,1646 | 0,000005 | -0,169687 | -0,122535 | -0,073056 | 0,004818 | -0,084844 | -0,061268 |

МЕЗ при виготовленні отворів чавунним ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\delta) = 0,138 + 0,013x_1 - 0,042x_2. \quad (3.7)$$

Математична модель МЕЗ при виготовленні отворів має наступний

вигляд, мм:

$$\delta = 0,069 \cdot I^{0,175} \cdot P_s^{-0,871}. \quad (3.8)$$

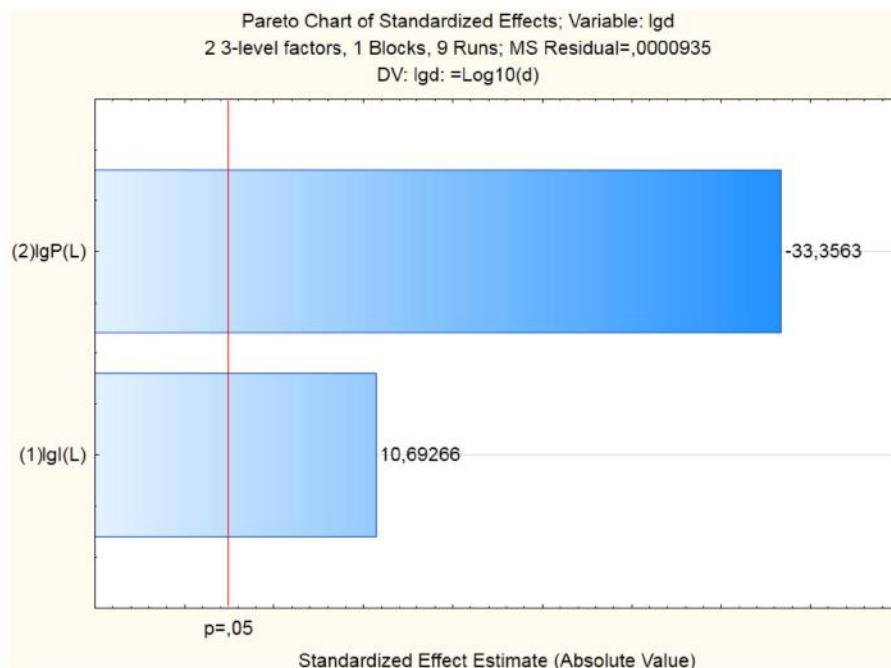


Рис. 3.7. Степінь впливу факторів на МЕЗ δ

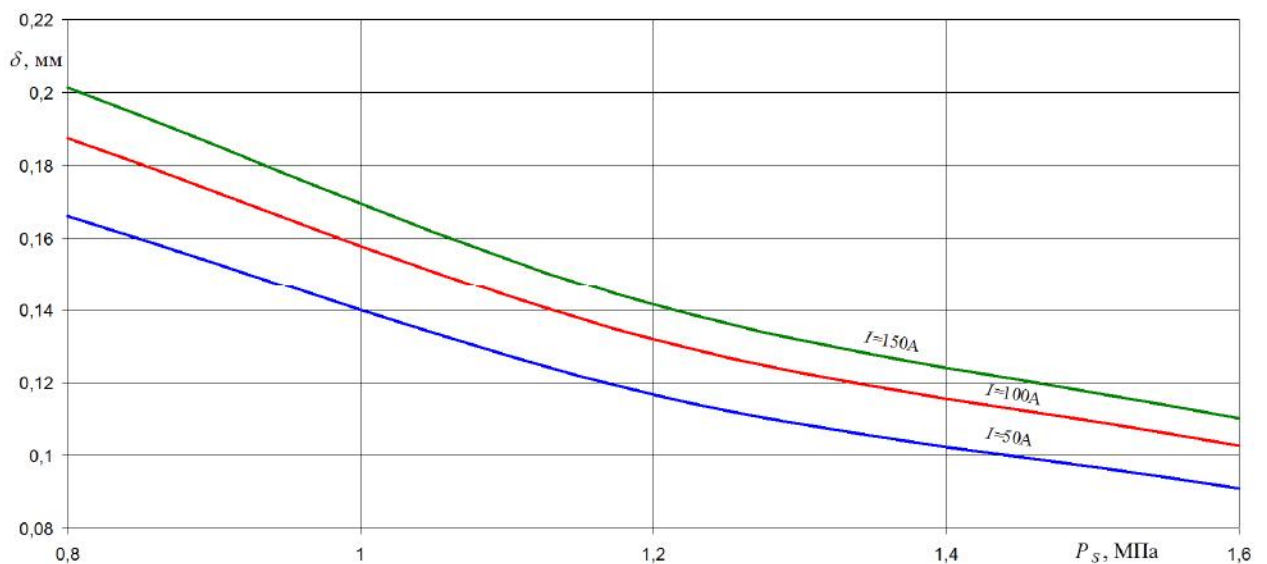


Рис. 3.8. Залежність МЕЗ δ від I та P_s

Як видно з рис. 3.7 на міжелектродний зазор найбільший вплив чинить статичний тиск робочої рідини P_s , менш впливовим є сила технологічного струму I .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.9 – ANOVA

| ANOVA; Var.:lgd; R-sqr=.99513; Adj.:.99351 (чавун.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0000935 DV: lgd =Log10(d) | | | | | | |
|--|-----------------|----------|----------|----------|----------|--|
| Factor | SS | df | MS | F | p | |
| (1)lgI L | 0,010694 | 1 | 0,010694 | 114,333 | 0,000039 | |
| (2)lgP L | 0,104069 | 1 | 0,104069 | 1112,646 | 0,000000 | |
| Error | 0,000561 | 6 | 0,000094 | | | |
| Total SS | 0,115324 | 8 | | | | |

Таблиця 3.10 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgd; R-sqr=.99513; Adj.:.99351 (чавун.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0000935 DV: lgd =Log10(d) | | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------|----------|----------|---------------------|---------------------|-----------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95, % Cnf Limit | +95, % Cnf Limit | Coeff. | Std Err. Coeff. | -95, % Cnf Limit | +95, % Cnf Limit |
| Mean/Interc. | -0,871909 | 0,003249 | -268,335 | 0,000000 | -0,879860 | -0,863959 | -0,871909 | 0,003249 | -0,879860 | -0,863959 |
| (1)lgI(L) | 0,083486 | 0,007808 | 10,693 | 0,000039 | 0,064381 | 0,102591 | 0,041743 | 0,003904 | 0,032191 | 0,051296 |
| (2)lgP(L) | -0,262141 | 0,007859 | -33,356 | 0,000000 | -0,281370 | -0,242911 | -0,131070 | 0,003929 | -0,140685 | -0,121455 |

3.2. Визначення технологічних характеристик РОД сталевим ЕІ

Вихідні данні для досліджень: робоча рідина суміш мастила індустріального І20А і гасу в співвідношенні 50% кожного, матеріал оброблюваної деталі – сталь 45, матеріал з якого виготовлено ЕІ – сталь 45, полярності електродів – зворотна, продуктивність обробки.

Основні керуючі фактори, що впливають на якісні та кількісні показники, є сила струму і статичний тиск потоку робочої рідини.

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

Таблиця 3.11 - Межі варіювання факторів

| Фактори | X_{max} | X_{min} | X_0 | ΔX |
|---------------------------|-----------|-----------|-------|------------|
| Сила току I, A | 150 | 50 | 100 | 50 |
| Статичний тиск P_s, MPa | 1,6 | 0,8 | 1,2 | 0,4 |

Таблиця 3.12 - Матриця планування експерименту

| Номер експерименту | $x_1 (I)$ | $x_2 (P_s)$ | $y_1 (M)$ мм ³ /хв | $y_2 (Ra)$ мкм | $y_3 (\delta)$ мм | $y_4 (\gamma)$ % |
|--------------------|-----------|-------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 1 | - | - | 425 | 11 | 0,14 | 80,6 |
| 2 | - | 0 | 303 | 7,3 | 0,11 | 78,2 |
| 3 | - | + | 196 | 5,0 | 0,05 | 75,4 |
| 4 | 0 | - | 1615 | 14 | 0,18 | 81,9 |
| 5 | 0 | 0 | 1074 | 9,8 | 0,13 | 79,9 |
| 6 | 0 | + | 796 | 6,3 | 0,07 | 77,6 |
| 7 | + | - | 2890 | 17,2 | 0,22 | 82,8 |
| 8 | + | 0 | 1978 | 11,2 | 0,16 | 80,9 |
| 9 | + | + | 1593 | 7,5 | 0,09 | 78,8 |

Продуктивність обробки отворів сталевим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(M) = 1207,778 + 922,833x_1 - 390,833x_2. \quad (3.9)$$

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

$$M = 0,3 \cdot I^{1,801} \cdot P_s^{-0,994}. \quad (3.10)$$

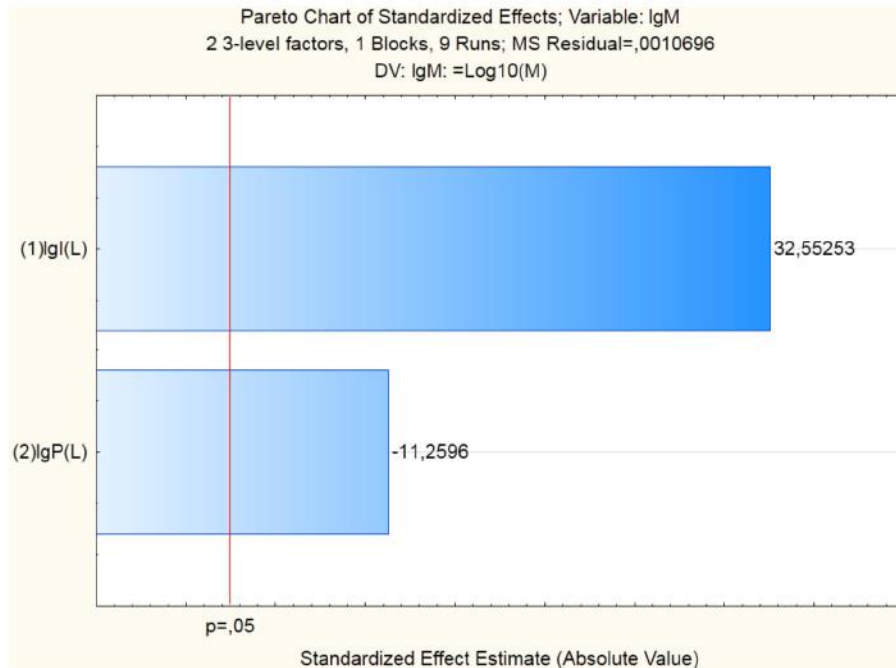


Рис. 3.9. Степень впливу факторів на продуктивність процесу M

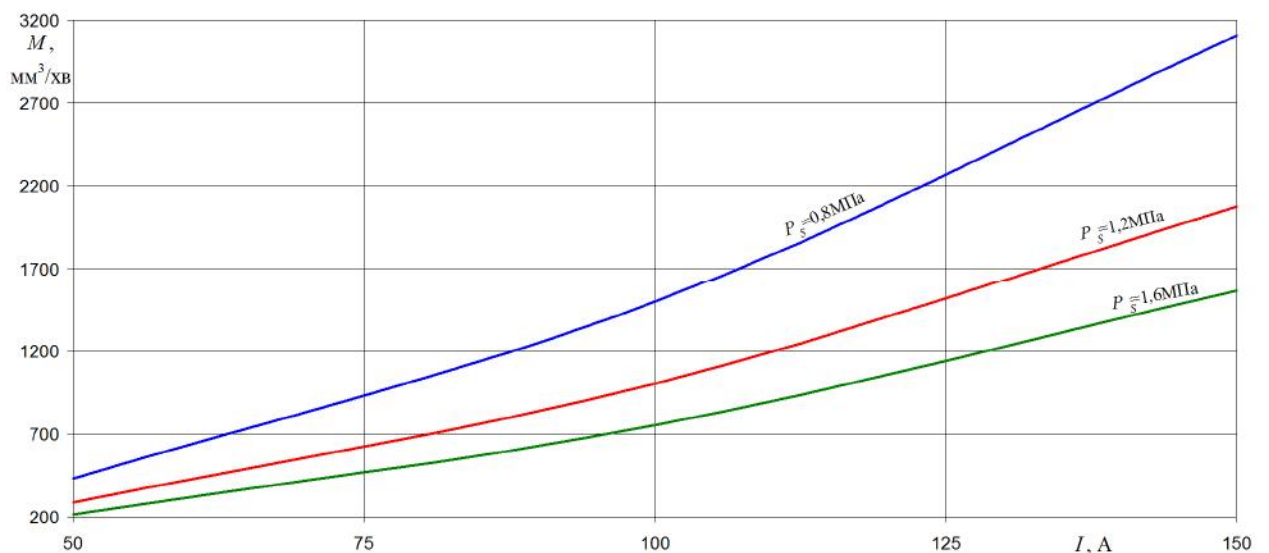


Рис. 3.10. Залежність продуктивності процесу M від I та P_s

Як видно з рис. 3.9 на продуктивність процесу найбільший вплив чинить сила технологічного струму I менш впливовим є статичний тиск робочої рідини P_s .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.13 - ANOVA

| ANOVA; Var.:lgM; R-sqr=.99497; Adj.:.99329 (сталь.ста) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0010696 DV: lgM: =Log10(M) | | | | | | |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|--|
| Factor | SS | df | MS | F | p | |
| (1)lgL | 1,133447 | 1 | 1,133447 | 1059,667 | 0,000000 | |
| (2)lgP L | 0,135607 | 1 | 0,135607 | 126,780 | 0,000029 | |
| Error | 0,006418 | 6 | 0,001070 | | | |
| Total SS | 1,275472 | 8 | | | | |

Таблиця 3.14 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgM; R-sqr=.99497; Adj.:.99329 (сталь.ста) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0010696 DV: lgM: =Log10(M) | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95,% Cnf.Limit | +95,% Cnf.Limit | Coeff. | Std.Err. Coeff. | -95,% Cnf.Limit | +95,% Cnf.Limit |
| Mean/Interc. | 2,915576 | 0,010988 | 265,3357 | 0,000000 | 2,888689 | 2,942463 | 2,915576 | 0,010988 | 2,888689 | 2,942463 |
| (1)lg(L) | 0,859503 | 0,026404 | 32,5525 | 0,000000 | 0,794896 | 0,924111 | 0,429752 | 0,013202 | 0,397448 | 0,462055 |
| (2)lgP(L) | -0,299237 | 0,026576 | -11,2596 | 0,000029 | -0,364266 | -0,234208 | -0,149618 | 0,013288 | -0,182133 | -0,117104 |

Шорсткість поверхні отворів оброблених сталевим EI

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ra) = 9,922 + 2,1x_1 - 3,9x_2. \quad (3.11)$$

Математична модель шорсткості поверхні отворів має наступний

вигляд, МКМ:

$$Ra = 1,912 \cdot I^{0,386} \cdot P_s^{-1,151}. \quad (3.12)$$

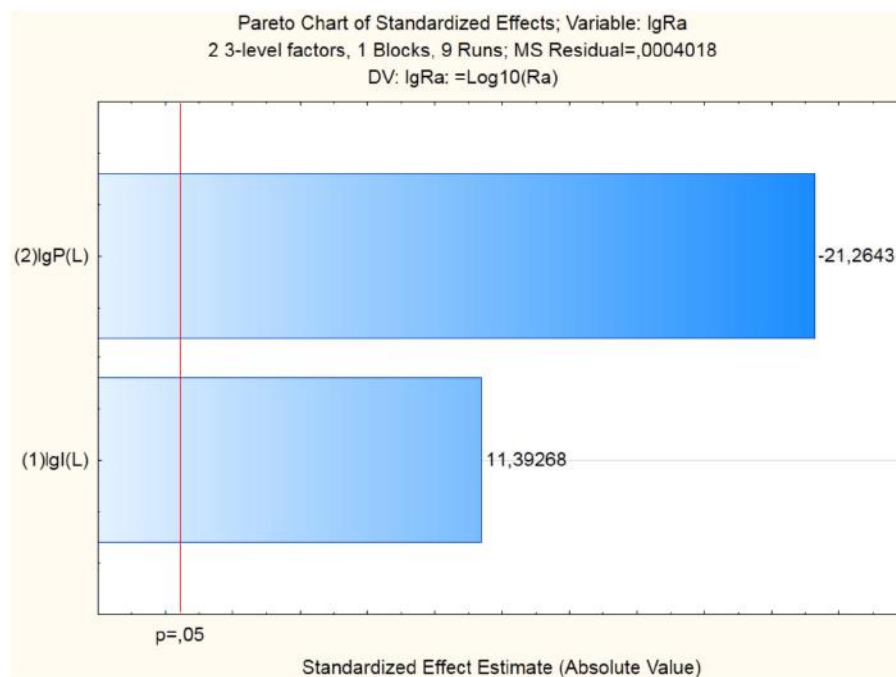


Рис. 312. Степень впливу факторів на шорсткість поверхні Ra

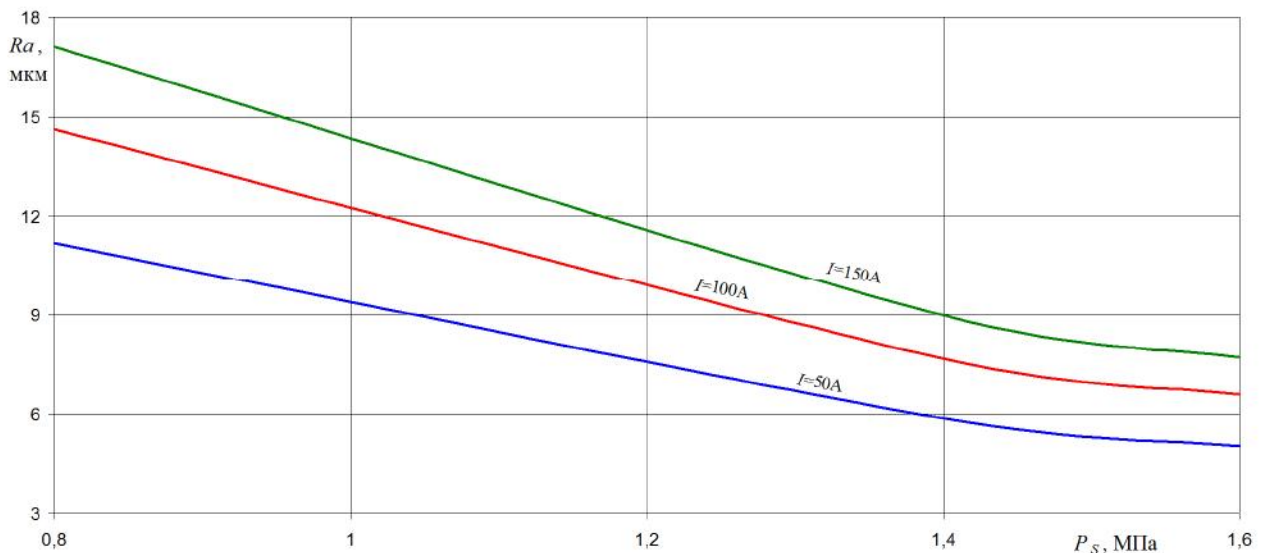


Рис. 3.13. Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від P_s та I

Як видно з рис. 3.12 на шорсткість обробленої поверхні найбільший вплив чинить статичний тиск робочої рідини P_s , менш впливовим є сила технологічного струму I .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.15 - ANOVA

| ANOVA; Var.:lgRa; R-sqr=,9898; Adj.,98639 (сталь. ста) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0004018 DV: lgRa: =Log10(Ra) | | | | | |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Factor | SS | df | MS | F | p |
| (1)lgI L | 0,052147 | 1 | 0,052147 | 129,7932 | 0,000027 |
| (2)lgP L | 0,181668 | 1 | 0,181668 | 452,1709 | 0,000001 |
| Error | 0,002411 | 6 | 0,000402 | | |
| Total SS | 0,236226 | 8 | | | |

Таблиця 3.16 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgRa; R-sqr=,9898; Adj.,98639 (сталь. ста) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0004018 DV: lgRa: =Log10(Ra) | | | | | | | | | | |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. Coeff. | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | 0,968450 | 0,006734 | 143,8058 | 0,000000 | 0,951972 | 0,984929 | 0,968450 | 0,006734 | 0,951972 | 0,984929 |
| (1)lgI(L) | 0,184358 | 0,016182 | 11,3927 | 0,000027 | 0,144762 | 0,223954 | 0,092179 | 0,008091 | 0,072381 | 0,111977 |
| (2)lgP(L) | -0,346349 | 0,016288 | -21,2643 | 0,000001 | -0,386204 | -0,306494 | -0,173175 | 0,008144 | -0,193102 | -0,153247 |

Об'ємний знос EI при виготовленні отвору сталевим EI

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\gamma) = 79,567 + 1,383x_1 - 2,25x_2. \quad (3.13)$$

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

$$\gamma = 69,695 \cdot I^{0,032} \cdot P_s^{-0,081} \quad (3.14)$$

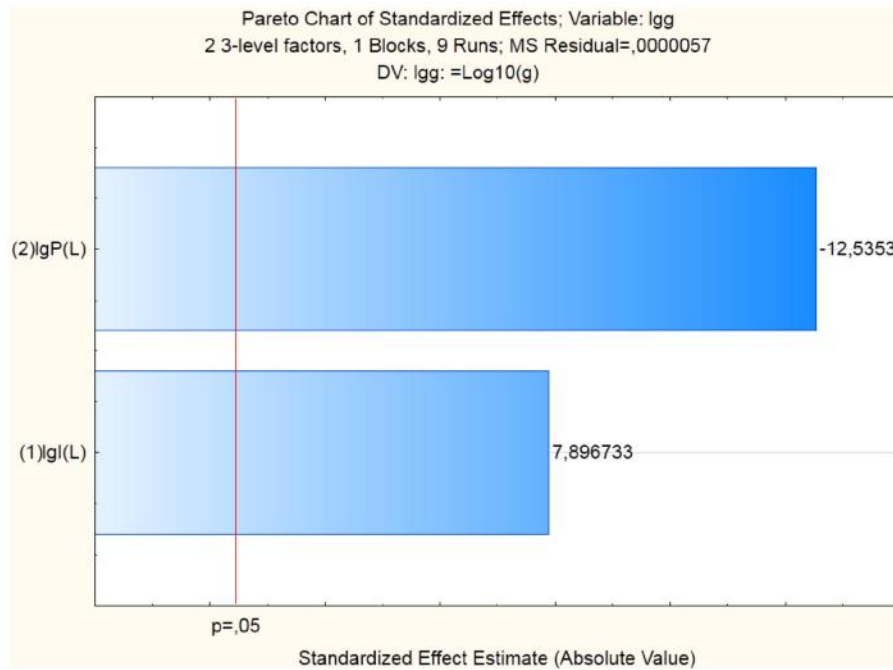


Рис. 3.14. Степінь впливу факторів на об'ємний знос ЕІ γ

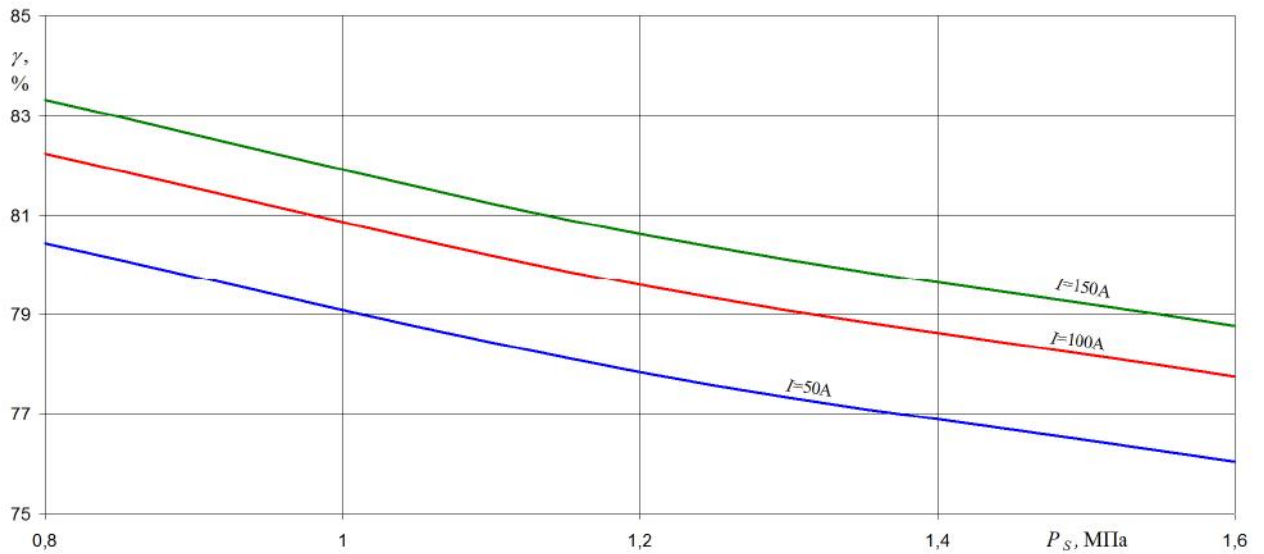


Рис. 3.15. Залежність об'ємного зносу ЕІ γ від P_s та I

Як видно з рис. 3.14 на знос ЕІ γ найбільший вплив чинить статичний тиск робочої рідини P_s менш впливовим є сила технологічного струму I .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.17 - ANOVA

| ANOVA; Var.:lgg; R-sqr=,97339; Adj.:96452 (сталь.ста) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0000057 DV: lgg: =Log10(g) | | | | | | |
|--|-----------------|----------|----------|----------|----------|--|
| Factor | SS | df | MS | F | p | |
| (1)lgL | 0,000354 | 1 | 0,000354 | 62,3584 | 0,000219 | |
| (2)lgP L | 0,000893 | 1 | 0,000893 | 157,1335 | 0,000016 | |
| Error | 0,000034 | 6 | 0,000006 | | | |
| Total SS | 0,001282 | 8 | | | | |

Таблиця 3.18 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgg; R-sqr=,97339; Adj.:96452 (сталь.ста) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0000057 DV: lgg: =Log10(g) | | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------|----------|----------|--------------------|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. Coeff. | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | 1,900592 | 0,000801 | 2372,910 | 0,000000 | 1,898632 | 1,902552 | 1,900592 | 0,000801 | 1,898632 | 1,902552 |
| (1)lg(L) | 0,015198 | 0,001925 | 7,897 | 0,000219 | 0,010489 | 0,019907 | 0,007599 | 0,000962 | 0,005244 | 0,009954 |
| (2)lgP(L) | -0,024283 | 0,001937 | -12,535 | 0,000016 | -0,029023 | -0,019543 | -0,012142 | 0,000969 | -0,014512 | -0,009771 |

МЕЗ при виготовленні отворів сталевим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\delta) = 0,128 + 0,028x_1 - 0,055x_2. \quad (3.15)$$

Математична модель МЕЗ при виготовленні отворів має наступний

вигляд, мм:

$$\delta = 0,021 \cdot I^{0,422} \cdot P_s^{-1,336}. \quad (3.16)$$

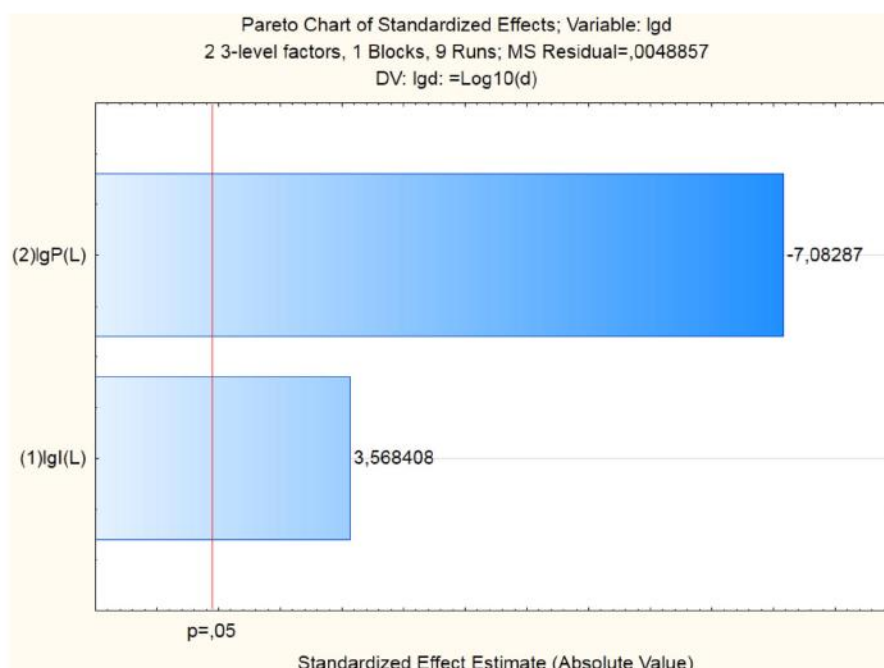


Рис. 3.16. Степінь впливу факторів на МЕЗ δ

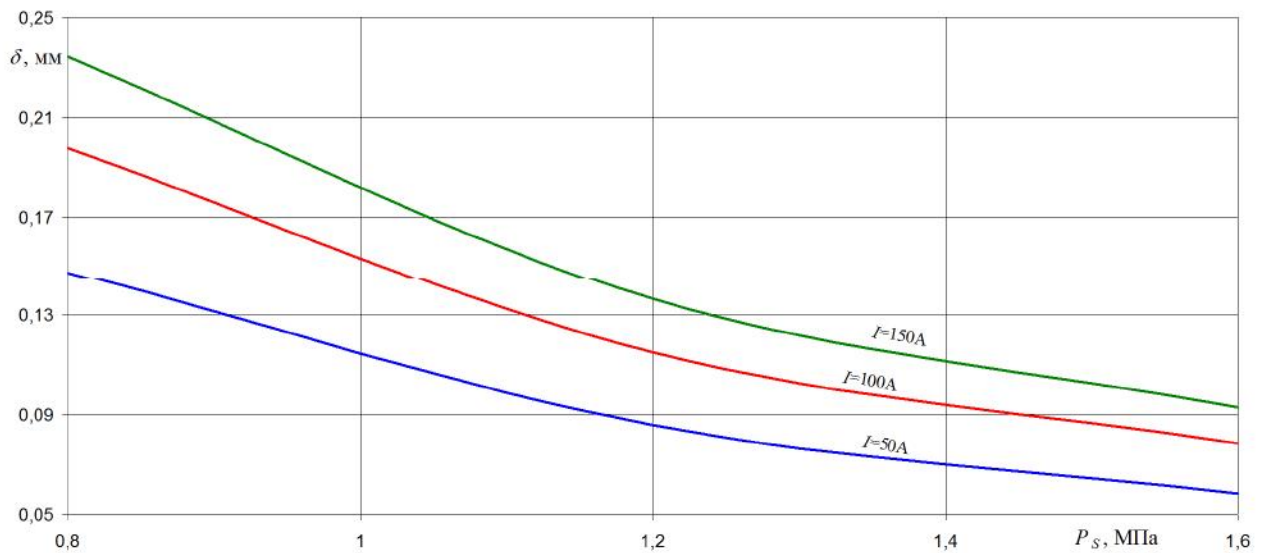


Рис. 3.17. Залежність МЕЗ δ від I та P_s

Як видно з рис. 3.16 на міжелектродний зазор найбільший вплив чинить статичний тиск робочої рідини P_s , менш впливовим є сила технологічного струму I .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.19 – ANOVA

| ANOVA; Var.:lgd; R-sqr=,91292; Adj.,88389 (сталь ста) | | | | | | |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|--|
| 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0048857 | | | | | | |
| DV: lgd: =Log10(d) | | | | | | |
| Factor | SS | df | MS | F | p | |
| (1)lgL | 0,062212 | 1 | 0,062212 | 12,73354 | 0,011807 | |
| (2)lgP L | 0,245101 | 1 | 0,245101 | 50,16699 | 0,000397 | |
| Error | 0,029314 | 6 | 0,004886 | | | |
| Total SS | 0,336627 | 8 | | | | |

Таблиця 3.20 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgd; R-sqr=,91292; Adj.,88389 (сталь ста) | | | | | | | | | | |
|--|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0048857 | | | | | | | | | | |
| DV: lgd: =Log10(d) | | | | | | | | | | |
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95, % Cnf Limit | +95, % Cnf Limit | Coeff. | Std.Err. Coeff. | -95, % Cnf Limit | +95, % Cnf Limit |
| Mean/Interc. | -0,930562 | 0,023484 | -39,6246 | 0,000000 | -0,988015 | -0,873088 | -0,930562 | 0,023484 | -0,988015 | -0,873088 |
| (1)lg(L) | 0,201365 | 0,056430 | 3,5684 | 0,011807 | 0,063286 | 0,339445 | 0,100683 | 0,028215 | 0,031643 | 0,169722 |
| (2)lgP(L) | -0,402297 | 0,056799 | -7,0829 | 0,000397 | -0,541278 | -0,263316 | -0,201149 | 0,028399 | -0,270639 | -0,131658 |

3.3. Визначення технологічних характеристик РОД графітовим ЕІ

Вихідні данні для досліджень: робоча рідина суміш мастила індустріального І20А і гасу в співвідношенні 50% кожного, матеріал оброблюваної деталі – сталь 45, матеріал з якого виготовлено ЕІ – МПГ-7, полярності електродів – зворотна, продуктивність обробки.

Основні керуючі фактори, що впливають на якісні та кількісні показники, є сила струму і статичний тиск потоку робочої рідини.

Межі варіювання факторів і план експерименту представлено в табл. 3.21 і табл. 3.22.

Таблиця 3.21 - Межі варіювання факторів

| Фактори | X_{max} | X_{min} | X_0 | ΔX |
|---------------------------|-----------|-----------|-------|------------|
| Сила току I, A | 150 | 50 | 100 | 50 |
| Статичний тиск P_s, MPa | 1,6 | 0,8 | 1,2 | 0,4 |

Таблиця 3.22 - Матриця планування експерименту

| Номер експерименту | $x_1 (I)$ | $x_2 (P_s)$ | $y_1 (M)$ мм ³ /хв | $y_2 (Ra)$ мкм | $y_3 (\delta)$ мм | $y_4 (\gamma)$ % |
|--------------------|-----------|-------------|----------------------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| 1 | - | - | 725 | 8,2 | 0,11 | 0,7 |
| 2 | - | 0 | 597 | 7 | 0,08 | 0,55 |
| 3 | - | + | 410 | 4,8 | 0,06 | 0,45 |
| 4 | 0 | - | 1362 | 10,5 | 0,16 | 0,95 |
| 5 | 0 | 0 | 1120 | 8,3 | 0,12 | 0,75 |
| 6 | 0 | + | 942 | 6 | 0,09 | 0,65 |
| 7 | + | - | 2232 | 12 | 0,21 | 1,2 |
| 8 | + | 0 | 1892 | 10 | 0,15 | 0,95 |
| 9 | + | + | 1705 | 8,4 | 0,12 | 0,8 |

Продуктивність обробки стержнів графітовим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(M) = 1220,556 + 682,833x_1 - 210,333x_2. \quad (3.17)$$

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

$$M = 7,751 \cdot I^{1,111} \cdot P_s^{-0,573}. \quad (3.18)$$

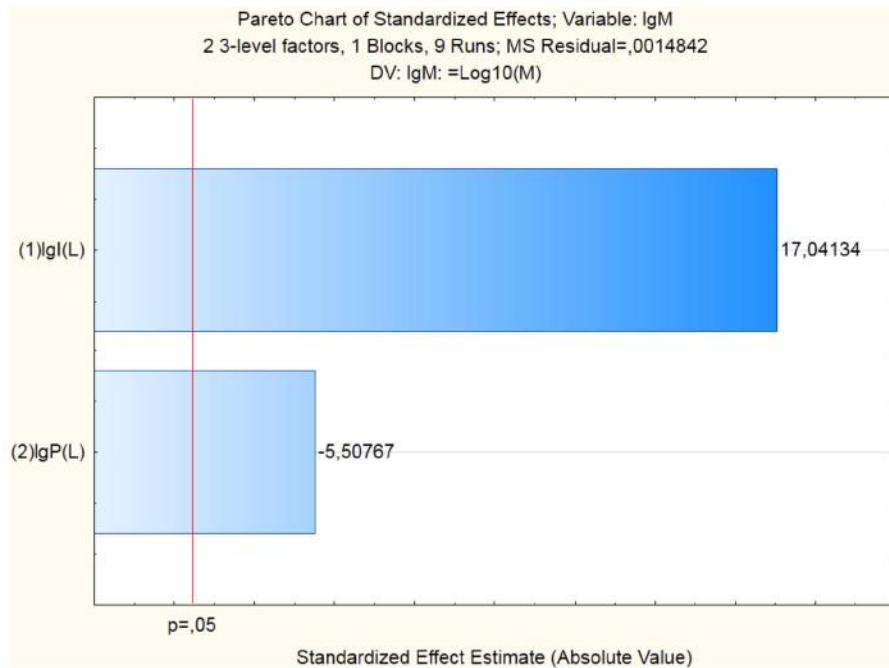


Рис. 3.18. Степінь впливу факторів на продуктивність процесу M

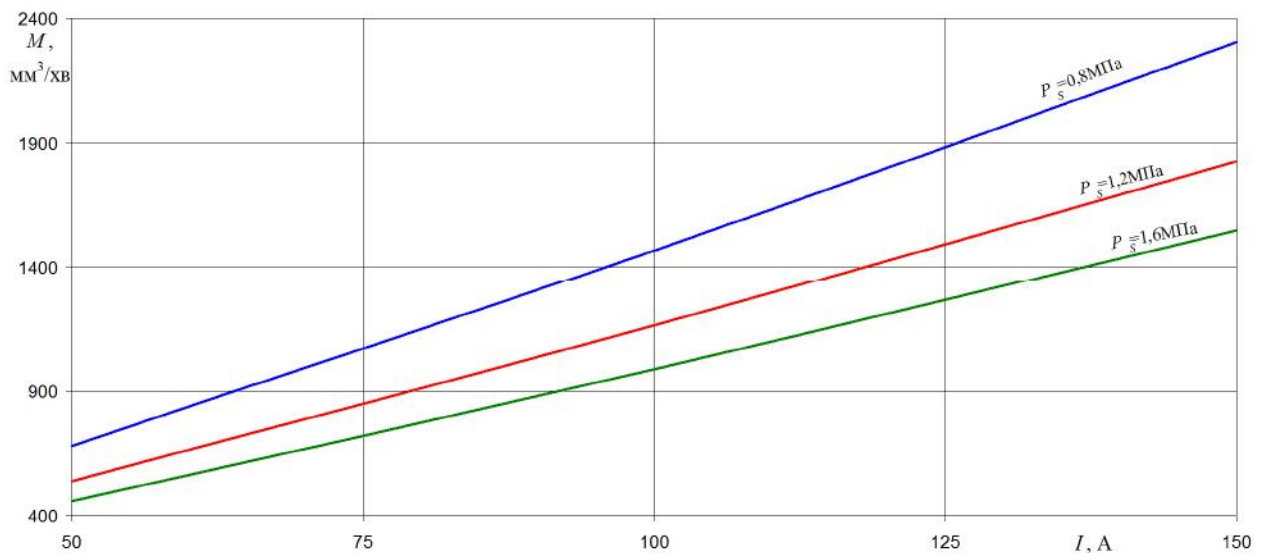


Рис. 3.19. Залежність продуктивності процесу M від I та P_s

Як видно з рис. 3.18 на продуктивність процесу найбільший вплив чинить сила технологічного струму I менш впливовим є статичний тиск робочої рідини P_s .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.23 - ANOVA

| ANOVA; Var.:lgM; R-sqr=.98164; Adj.:97552 (rpaфir.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0014842 DV: lgM: =Log10(M) | | | | | |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Factor | SS | df | MS | F | p |
| (1)lgL | 0,431032 | 1 | 0,431032 | 290,4074 | 0,000003 |
| (2)lgP L | 0,045023 | 1 | 0,045023 | 30,3344 | 0,001504 |
| Error | 0,008905 | 6 | 0,001484 | | |
| Total SS | 0,484961 | 8 | | | |

Таблиця 3.24 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgM; R-sqr=.98164; Adj.:97552 (rpaфir.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0014842 DV: lgM: =Log10(M) | | | | | | | | | | |
|--|-----------|----------|----------|----------|---------------------|---------------------|-----------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Factor | Effect | Std Err. | t(6) | p | -95, % Cnf Limit | +95, % Cnf Limit | Coeff. | Std Err. Coeff | -95, % Cnf Limit | +95, % Cnf Limit |
| Mean/Interc. | 3,011071 | 0,012944 | 232,6256 | 0,000000 | 2,979399 | 3,042744 | 3,011071 | 0,012944 | 2,979399 | 3,042744 |
| (1)lg(L) | 0,530031 | 0,031103 | 17,0413 | 0,000003 | 0,453926 | 0,606137 | 0,265016 | 0,015551 | 0,226963 | 0,303068 |
| (2)lgP(L) | -0,172422 | 0,031306 | -5,5077 | 0,001504 | -0,249025 | -0,095820 | -0,086211 | 0,015653 | -0,124512 | -0,047910 |

Шорсткість поверхні стержнів оброблених графітовим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ra) = 8,355 + 1,733x_1 - 1,917x_2. \quad (3.19)$$

Математична модель шорсткості поверхні стержня має наступний

вигляд, мкм:

$$Ra = 1,573 \cdot I^{0,384} \cdot P_s^{-0,683}. \quad (3.20)$$

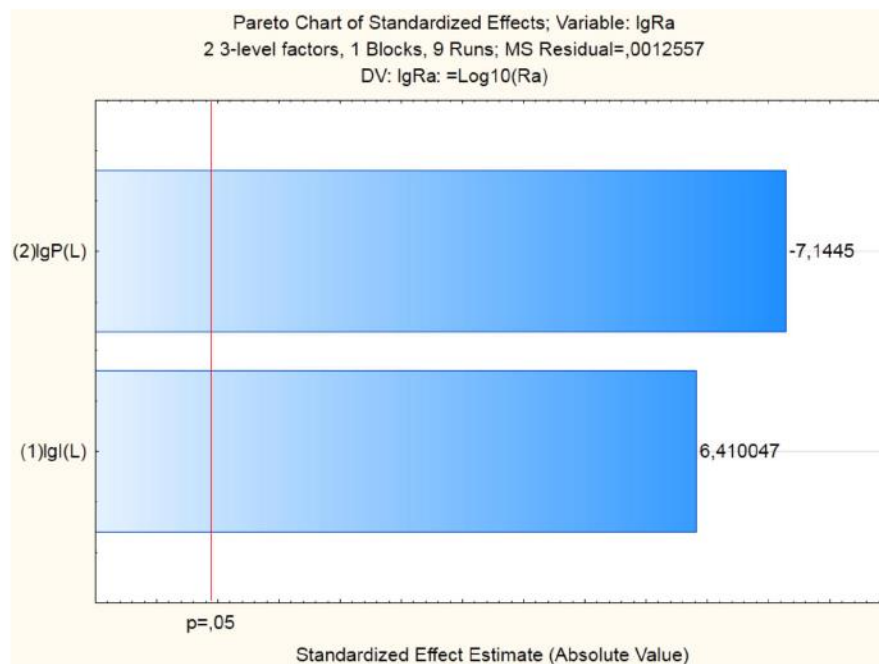


Рис. 3.20. Степень впливу факторів на шорсткість поверхні Ra

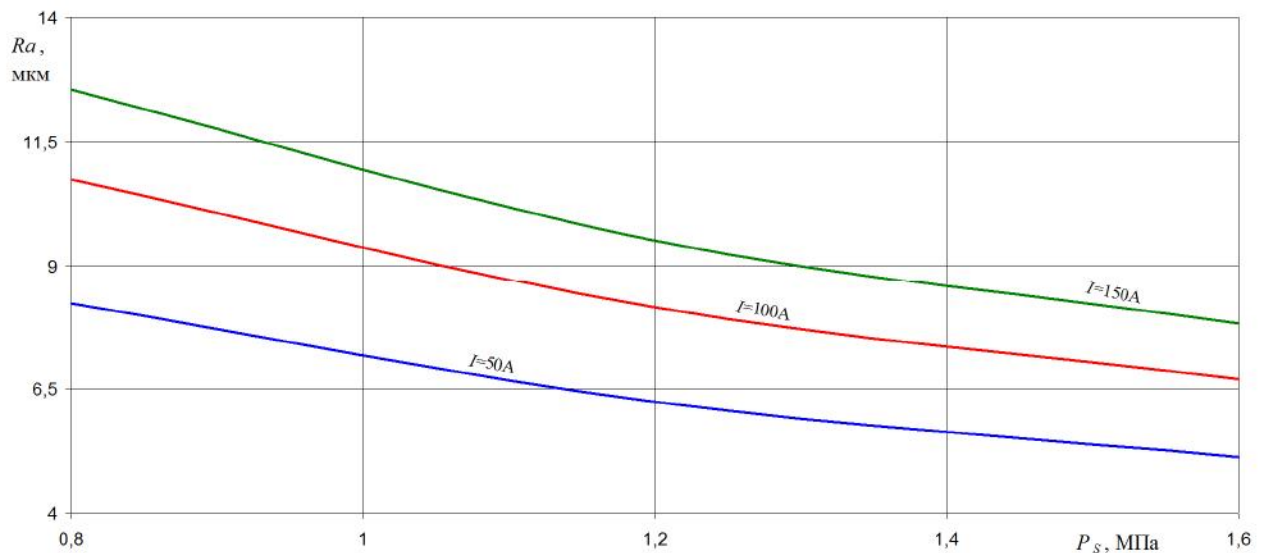


Рис. 3.21. Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від P_s та I

Як видно з рис. 3.20 на шорсткість обробленої поверхні найбільший вплив чинить статичний тиск робочої рідини P_s , менш впливовим є сила технологічного струму I .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.25 - ANOVA

| ANOVA; Var.:lgRa; R-sqr=,93886; Adj.,91848 (графіт.sta) | | | | | |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0012557 | | | | | |
| DV: lgRa: =Log10(Ra) | | | | | |
| Factor | SS | df | MS | F | p |
| (1)lgI L | 0,051596 | 1 | 0,051596 | 41,08871 | 0,000680 |
| (2)lgP L | 0,064096 | 1 | 0,064096 | 51,04390 | 0,000379 |
| Error | 0,007534 | 6 | 0,001256 | | |
| Total SS | 0,123226 | 8 | | | |

Таблиця 3.26 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgRa; R-sqr=,93886; Adj.,91848 (графіт.sta) | | | | | | | | | | |
|--|-----------|----------|----------|----------|---------------------|---------------------|-----------|-------------------|---------------------|---------------------|
| 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0012557 | | | | | | | | | | |
| DV: lgRa: =Log10(Ra) | | | | | | | | | | |
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95, % Cnf Limit | +95, % Cnf Limit | Coeff. | Std.Err. Coeff | -95, % Cnf Limit | +95, % Cnf Limit |
| Mean/Interc. | 0,904716 | 0,011906 | 75,98965 | 0,000000 | 0,875583 | 0,933848 | 0,904716 | 0,011906 | 0,875583 | 0,933848 |
| (1)lgI(L) | 0,183380 | 0,028608 | 6,41005 | 0,000680 | 0,113379 | 0,253382 | 0,091690 | 0,014304 | 0,056689 | 0,126691 |
| (2)lgP(L) | -0,205727 | 0,028795 | -7,14450 | 0,000379 | -0,276186 | -0,135268 | -0,102863 | 0,014398 | -0,138093 | -0,067634 |

Об'ємний знос EI при виготовленні стержня графітовим EI

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\gamma) = 0,778 + 0,208x_1 - 0,158x_2. \quad (3.21)$$

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

$$\gamma = 0,085 \cdot I^{0,5} \cdot P_s^{-0,59} \quad (3.22)$$

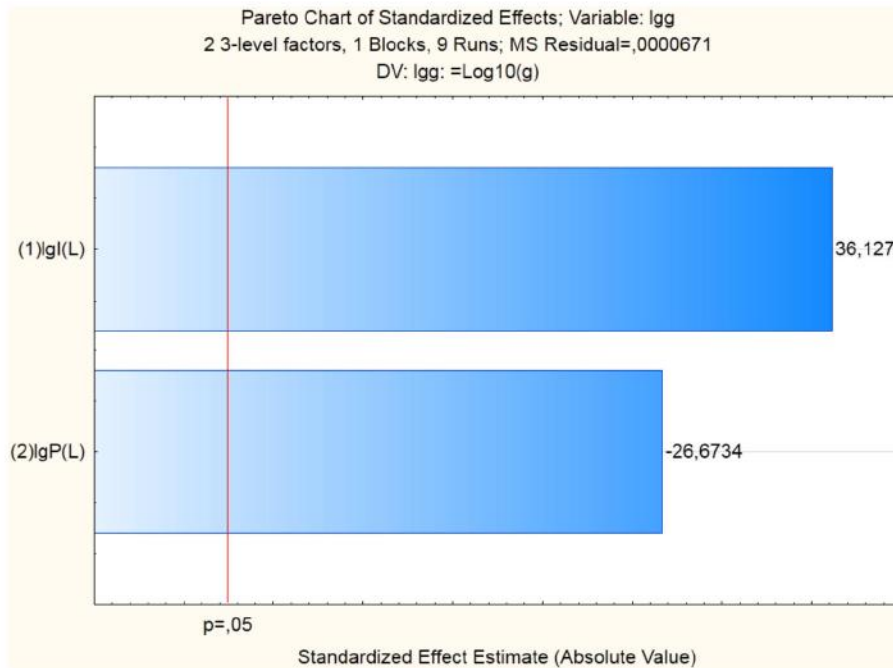


Рис. 3.22. Степінь впливу факторів на об'ємний знос ЕІ γ

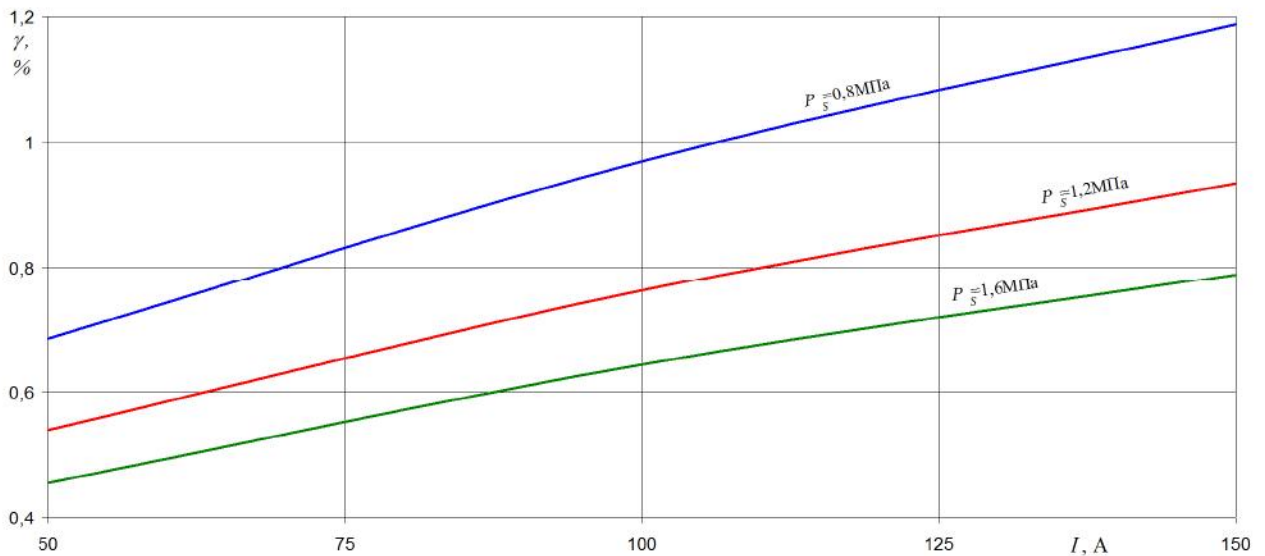


Рис. 3.23. Залежність об'ємного зносу ЕІ γ від P_s та I

Як видно з рис. 3.22 на знос ЕІ γ найбільший вплив чинить сила технологічного струму I менш впливовим є статичний тиск робочої рідини P_s .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.27 - ANOVA

| ANOVA; Var.:lgg; R-sqr=,99703; Adj.:99604 (графіт. sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0000671 DV: lgg: =Log10(g) | | | | | |
|--|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| Factor | SS | df | MS | F | p |
| (1)lgL | 0,087525 | 1 | 0,087525 | 1305,229 | 0,000000 |
| (2)lgP L | 0,047709 | 1 | 0,047709 | 711,472 | 0,000000 |
| Error | 0,000402 | 6 | 0,000067 | | |
| Total SS | 0,135637 | 8 | | | |

Таблиця 3.28 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgg; R-sqr=,99703; Adj.:99604 (графіт. sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0000671 DV: lgg: =Log10(g) | | | | | | | | | | |
|---|-----------|----------|----------|----------|--------------------|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. Coeff. | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | -0,131579 | 0,002751 | -47,8245 | 0,000000 | -0,138311 | -0,124847 | -0,131579 | 0,002751 | -0,138311 | -0,124847 |
| (1)lg(L) | 0,238843 | 0,006611 | 36,1280 | 0,000000 | 0,222667 | 0,255020 | 0,119422 | 0,003306 | 0,111333 | 0,127510 |
| (2)lgP(L) | -0,177491 | 0,006654 | -26,6734 | 0,000000 | -0,193773 | -0,161208 | -0,088745 | 0,003327 | -0,096887 | -0,080604 |

МЕЗ при виготовленні стержнів графітовим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\delta) = 0,122 + 0,038x_1 - 0,035x_2. \quad (3.23)$$

Математична модель МЕЗ при виготовленні отворів має наступний

вигляд, мм:

$$\delta = 0,009 \cdot I^{0,594} \cdot P_s^{-0,833}. \quad (3.24)$$

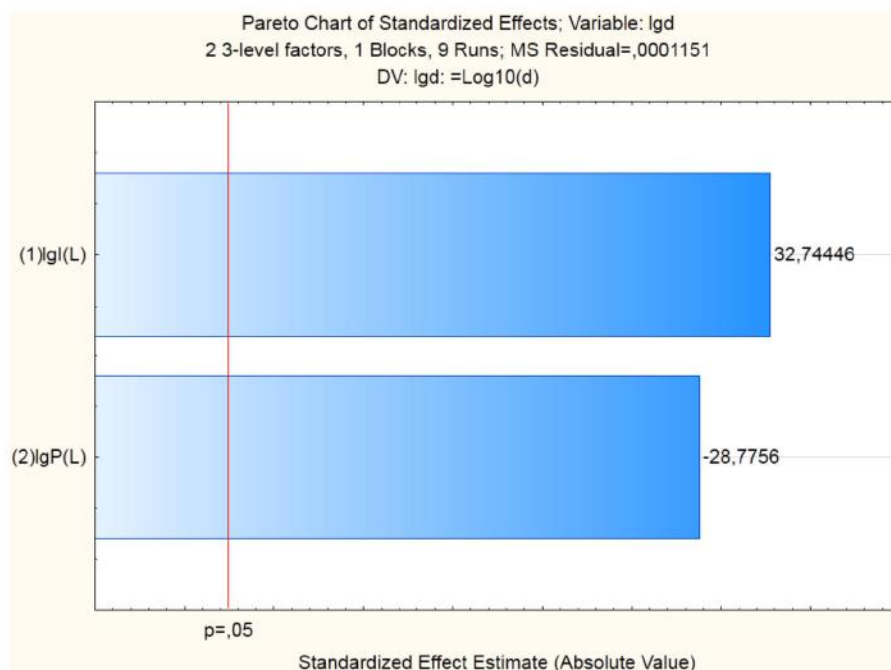


Рис. 3.24. Степень впливу факторів на МЕЗ δ

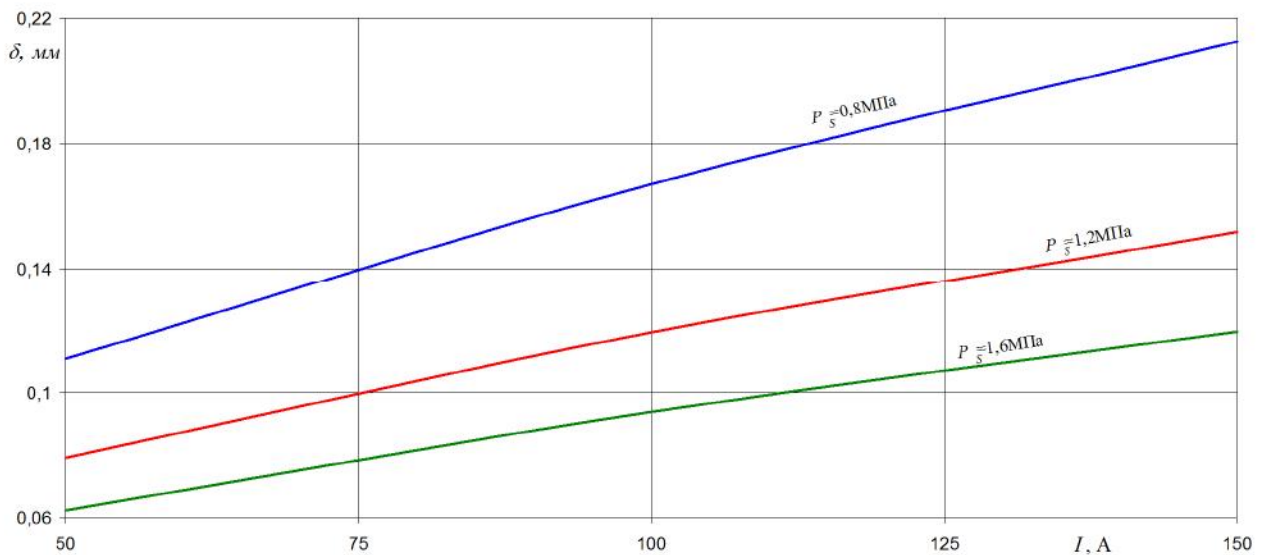


Рис. 3.25. Залежність МЕЗ δ від I та P_s

Як видно з рис. 3.24 на міжелектродний зазор найбільший вплив чинить статичний тиск робочої рідини P_s , менш впливовим є сила технологічного струму I .

Аналіз дисперсії виконуємо за допомогою модулю «Industrial Statistics & Six Sigma»

Таблиця 3.29 – ANOVA

| ANOVA; Var.:lgd; R-sqr=,99685; Adj.,9958 (графіт.sta) | | | | | |
|---|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0001151 | | | | | |
| DV: lgd: =Log10(d) | | | | | |
| Factor | SS | df | MS | F | p |
| (1)lgI L | 0,123368 | 1 | 0,123368 | 1072,200 | 0,000000 |
| (2)lgP L | 0,095274 | 1 | 0,095274 | 828,035 | 0,000000 |
| Error | 0,000690 | 6 | 0,000115 | | |
| Total SS | 0,219332 | 8 | | | |

Таблиця 3.30 - Effect Estimates

| Effect Estimates; Var.:lgd; R-sqr=,99685; Adj.,9958 (графіт.sta) | | | | | | | | | | |
|--|-----------|----------|----------|----------|--------------------|--------------------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0001151 | | | | | | | | | | |
| DV: lgd: =Log10(d) | | | | | | | | | | |
| Factor | Effect | Std.Err. | t(6) | p | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt | Coeff. | Std.Err. Coeff. | -95, % Cnf.Limt | +95, % Cnf.Limt |
| Mean/Interc. | -0,945531 | 0,003604 | -262,361 | 0,000000 | -0,954350 | -0,936713 | -0,945531 | 0,003604 | -0,954350 | -0,936713 |
| (1)lgI(L) | 0,283562 | 0,008660 | 32,744 | 0,000000 | 0,262372 | 0,304752 | 0,141781 | 0,004330 | 0,131186 | 0,152376 |
| (2)lgP(L) | -0,250820 | 0,008716 | -28,776 | 0,000000 | -0,272148 | -0,229492 | -0,125410 | 0,004358 | -0,136074 | -0,114746 |

3.4. Висновки

3.4.1. Теоретично і експериментально досліджено і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу за умов обробки чавунним ЕІ: продуктивності процесу обробки, шорсткості обробленої

поверхні, між електродний зазор, знос ЕІ. Залежно від режиму обробки чавунним ЕІ продуктивність при виготовленні отворів складає 400...1700 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 5...18 мкм; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах 14,5...26 %, міжелектродний зазор в межах 0,09...0,21 мм.

3.4.2. Теоретично і експериментально досліджено і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу за умов обробки сталевим ЕІ: продуктивності процесу обробки, шорсткості обробленої поверхні, між електродний зазор, знос ЕІ. Залежно від режиму обробки сталевим ЕІ продуктивність при виготовленні отворів складає 200...2800 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 5...17 мкм; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах 76...84 %, міжелектродний зазор в межах 0,06...0,24 мм.

3.4.3. Теоретично і експериментально досліджено і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу за умов обробки графітовим ЕІ: продуктивності процесу обробки, шорсткості обробленої поверхні, між електродний зазор, знос ЕІ. Залежно від режиму обробки графітовим ЕІ продуктивність при виготовленні стержнів складає 450...2300 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 5...12 мкм; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах 0,45...1,2 %, міжелектродний зазор в межах 0,06...0,21 мм.

3.4.4. При порівнянні отриманих результатів дослідження технологічних характеристик процесу РОД можемо зробити висновок, що продуктивність процесу обробки і міжелектродний зазор в рамках експериментів відрізняються незначно, шорсткість обробленої поверхні в рамках експерименту при обробці графітовим ЕІ із збільшенням струму і тиску краща в порівнянні з обробкою сталевим і чавунним ЕІ. Суттєва відмінність в отриманих результатах у зносу ЕІ, у графітових ЕІ він найменший, а у сталевих найбільший.

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОДИ-ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ РОД

4.1. Передумови вибору матеріалу ЕІ

Спосіб род переважно застосовують для обробки різного типу деталей складного профілю профільованим ЕІ. Що не виключає можливості його застосування при обробці непрофільованим ЕІ.

В переважній більшості ЕІ для електроерозій в процесі обробки зношуються. Степінь зносу матеріалу ЕІ по відношенню до ерозійного зносу матеріалу деталі, що обробляють, характеризуються поняттям ерозійної стійкості матеріалу, що спривидливо і для розмірної обробки електричною дугою.

На ерозійну стійкість ЕІ за умов РОД, в тій чи іншій мірі, впливають багато факторів. До таких факторів відносять: матеріал ЕІ, полярність електричної ерозії, технологічні характеристики процесу РОД, конструкція ЕІ, гідродинамічні умови в зоні обробки тощо.

Вибір матеріалу для виготовлення ЕІ в значній мірі залежить від серійності обробки деталей та вибраних технологічних прийомів, які необхідно застосувати для реалізації конкретної технологічної задачі.

Так, зазвичай, при необхідності серійного виробництва, наприклад, листових деталей, необхідно щоб за допомогою одного ЕІ можна було виготовити серію однотипних деталей, що за своїми розмірами будуть відповідати допускам на виготовлення цієї деталі. У цьому випадку матеріал ЕІ повин мати високу ерозійну стійкість.

Відомо, що найкращу ерозійну стійкість за умов РОД мають ЕІ виготовлені з електроерозійного графіту марок МПГ-7, МПГ-8. Тому доцільно за умов серійного виробництва деталей способом РОД застосовувати саме його.

Проте, за деяких умовах, наприклад, якщо треба виготовити наскрізний отвір складного профілю в деталі, яка виготовляється єдиному екземплярі, економічно не доцільно виготовляти ЕІ з графіту. В цьому випадку доцільно

використовувати для виготовлення ЕІ матеріал, що мають нижчу ціну та порівняно не високу ерозійну стійкість. До таких матеріалів можуть відноситись різні метали.

В традиційні елетроерозії (електроімпульсній обробці) в якості матеріалу широко застосовують мідь та латунь. З економічної точки зору використання ЕІ з міді чи латуні за умов процесу РОД як заміна графіту є не вигідним з огляду на високу вартість кольорових металів.

Для одиничного виробництва наскрізних отворів за умовах РОД з економічної точки зору в якості матеріалу для ЕІ доцільно використовувати сталь, або чавун, що на відміну від ЕІ з графіту мають нижчу ерозійну стійкість, як видно з розділу 3, проте мають нижчу вартість, що є суттєвим фактором в одиничному виробництві.

На відміну від традиційної електроерозійної обробки (електроіскрова, електроімпульсна) де застосовують зазвичай пряму полярність електродів при РОД більша ерозійна стійкість, в переважній більшості випадків, спостерігається при зворотній полярності ЕІ. Тому зазвичай при розробці технології РОД закладають зворотню полярність ЕІ.

До основних технологічних характеристик процесу РОД, що впливають на відносяться сила технологічного струму I і величина динамічного тиску робочої ріди в зоні обробки. В зв'язку з тим, що динамічний тиск робочої рідини на вході в міжелектродний зазор, у кожній точці міжелектродного зазору і на виході з нього різний ним не зручно користуватись при розробці технологічного процесу обробки. Тому, для зручності, користуються статичним тиском робочої рідини на вході в міжелектродний зазор P_s .

Залежності впливу технологічних характеристик РОД на знос ЕІ наведено в розділі 3.

Гідродинамічні умови в зоні обробки суттєво впливають на стійкість ЕІ. Для того щоб електрична дуга здійснювала розмірної обробки вона повинна бути стиснена динамічним тиском робочої рідини, лише тоді дуга буде мати необхідні енергетичні характеристики для розмірної обробки. В

місцях де буде спостерігатись застій робочої рідини, суттєве зниження швидкості потоку робочої рідини дуга буде мати енергетичні характеристики наближені до характеристик звичайної зварювальної дуги, яка не може вести розмірну обробку. Тому при проектуванні ЕІ необхідно аналізувати умови течії робочої рідини в зоні обробки, і закладати в конструкцію ЕІ конструктивні елементи, що будуть сприяти оптимальним умовам течії робочої рідини в зоні обробки.

4.2. Особливості розробки конструкції ЕІ

З огляду на те, що ЕІ з металу мають значний відносний знос їхня конструкція повинна передбачати однаковий розмір по всій дожині ЕІ. При розробці конструкції ЕІ з металу розмір ЕІ визначають виходячи з розміру деталі яку оброблюють з урахуванням міжелектродного зазору. Довжину робочої частини ЕІ визначають з урахуванням зносу ЕІ.

При розробці ЕІ з графіту зазвичай передбачають робочий поясок. Наявність робочого пояска забезпечує кращі умови течії робочої рідини в зоні обробки, як наслідок забезпечується краща якість обробленої поверхні. При цьому чим менша висота робочого пояска тим краще якість обробленої поверхні (див. розділ 3).

Особливості конструювання ЕІ з графіту і металу розглянемо на прикладі виготовлення спряженої пари.

Для отримання вала 1 (рис. 4.1) застосовують метод зворотного копіювання профілю графітового електрод-інструмента (ЕІ) 2 з прокачуванням робочої рідини від центра ЕІ до його периферії. Висоту робочого пояска h вибирають з урахуванням допустимого зносу графітового ЕІ γ (див. розділ 3).

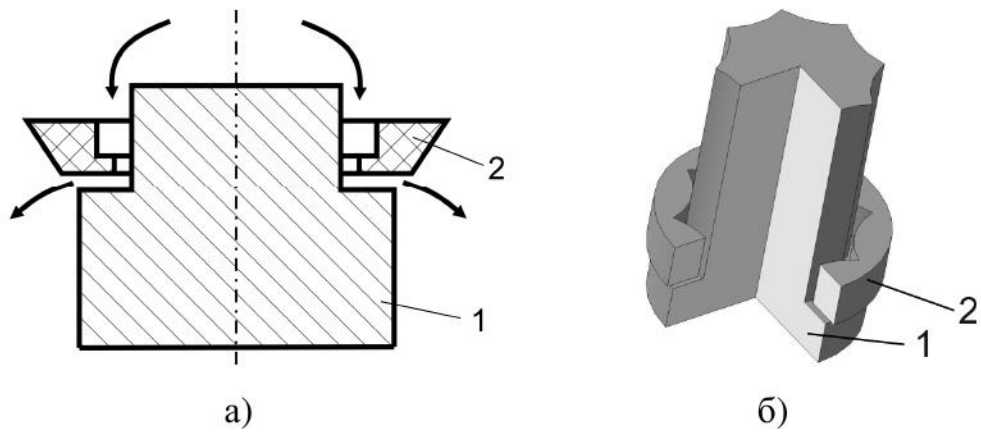


Рисунок 4.1 Схема отримання вала (а), 3D модель отримання вала (б)

Для отримання втулки 1 (рис. 4.2) застосовують метод прямого копіювання профілю графітового EI 2 з прокачуванням робочу рідину від периферії EI до його центра.

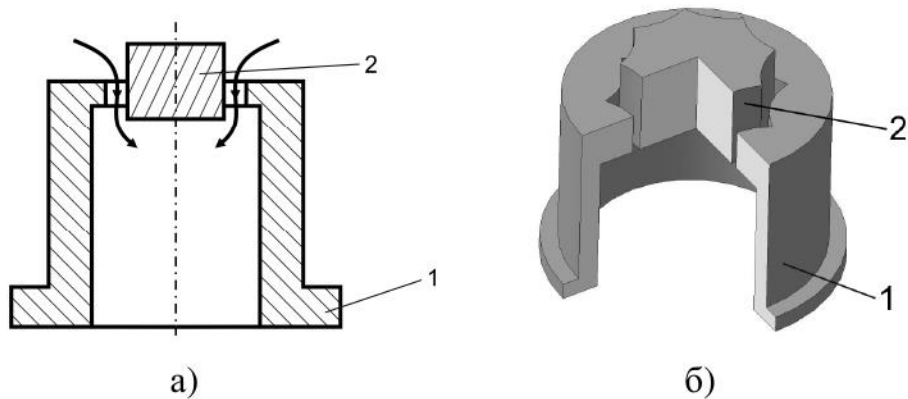


Рисунок 4.2 Схема отримання втулки (а), 3D модель отримання втулки (б)

Для отримання спряжених пар виготовлення здійснюється в такій послідовності: на 1 переході виготовляють вал 1 графітовим EI 2; на 2 переході виготовляють металевий EI 3, для виготовлення втулки 4, графітовим EI 2; на 3 переході виготовляють втулки 4 металевим EI.

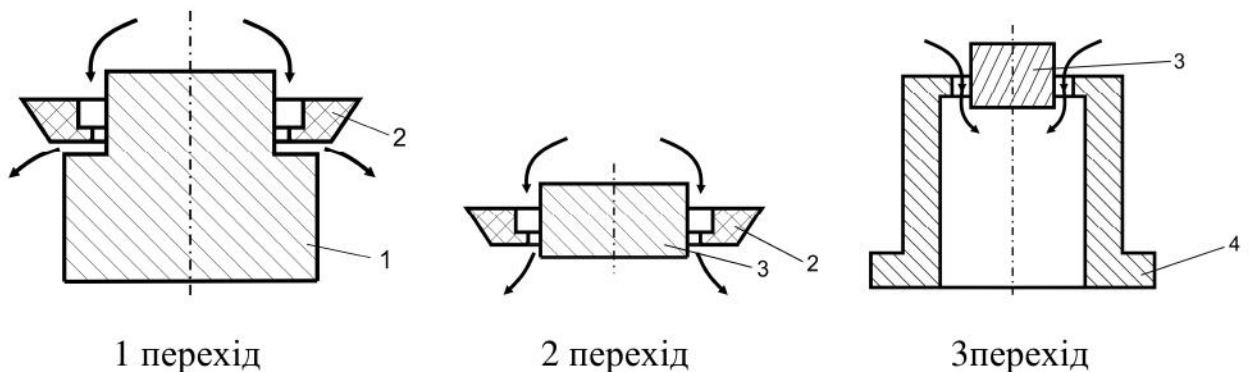


Рисунок 4.3 – Схема отримання спряженої пари вала і втулки

При виготовленні порожнин складної форми які мають складний профіль не тільки в плані, а і мають різну глибину виникає проблема з організацією течії робочої рідини при традиційній схемі організації потоку рідини з одним отвором, в наслідок того, що рідина тече в зоні найменшого опору, тому в зоні де ЕІ має найбільшу висоту рідина текти не буде і там буде горіти звичайна електрична дуга, яка не може вести розмірної обробки.

Для забезпечення течії робочої рідини у всіх точках обробки необхідно розбити ЕІ на секції з отвором в центрі кожної секції. Розхід робочої рідини через сумарну площу перерізу цих отворів не повинен перевищувати витрати рідини на вході в герметизовану камеру.

Наприклад при виготовленні вставок штампу для шматування поковоки «вилка» на КГШП обробку вставки 1 виконують графітовим ЕІ 2, при цьому робочу рідину подають від периферії ЕІ, а відводять через спеціальні отвори в ЕІ.

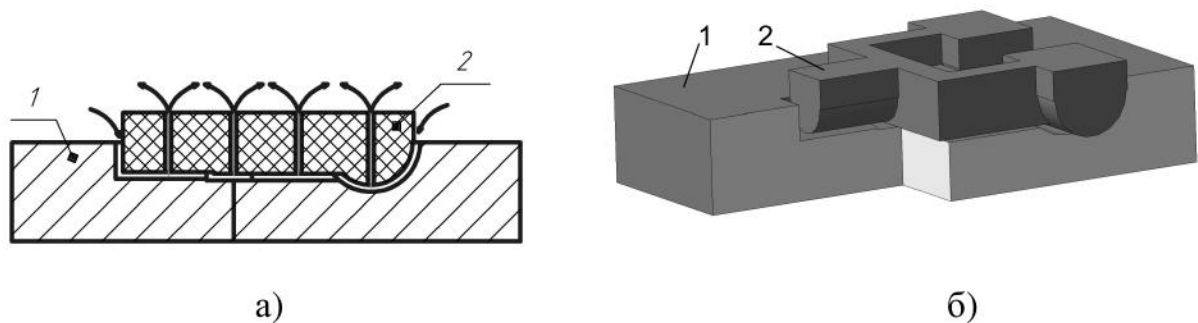


Рисунок 4.4 Схеми отримання фасонної порожнини кувального штампу (а),
3D модель отримання фасонної порожнини кувального штампу (б)

4.3. Висновки

4.3.1. Описано особливості вибору матеріалу для виготовлення ЕІ, та надані рекомендації щодо раціонального вибору матеріалу ЕІ в різних умовах обробки.

4.3.2. Описано особливості розробки конструкції ЕІ.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД

Визначення економічної ефективності процесу РОД здійснюємо за умов обробки спряженої пари вала і втулки. Довжина оброблюваної поверхні вала 40мм, глибина отвору втулки 10мм. При розрахунку будуть враховуватись лише відмінні операції в базовому і проектному варіанті.

Розрахунок очікуваного річного економічного ефекту від впровадження у виробництво способу РОД профільованим ЕІ базується на наступних умовах:

- базовий варіант - обробку вала здійснюють методами механічної обробки. Для зовнішньої поверхні вала фрезерна обробка на універсально фрезерному верстаті кінцевою модульною фрезою, а внутрішньої поверхні втулки на довбальному верстаті. Час обробки 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 $M_{баз(о)} = 18,23 \text{ мм}^3/\text{хв}$;

- проектний варіант - обробку здійснюють способом РОД профільованим ЕІ з середньою продуктивністю обробки вала графітовим ЕІ $M_{np(с)} = 1100 \text{ мм}^3/\text{хв}$, що відповідає силі технологічного струму $I = 100 \text{ А}$ і статичному тиску робочої рідини $P_s = 1,2 \text{ МПа}$, та середньою продуктивністю обробки отвору сталевим електродом $M_{np(с)} = 1000 \text{ мм}^3/\text{хв}$, що відповідає силі технологічного струму $I = 100 \text{ А}$ і статичному тиску робочої рідини $P_s = 1,2 \text{ МПа}$;

- річний об'єм виробництва спряженої пари вал-втулка способами механічної обробки становить 8 500 шт/рік.

Вихідні дані для подальшого розрахунку наведені і табл. 5.1.

Таблиця 5.1 Вихідні дані

| № п/п | Найменування показників | Умовні позначення | Одиниці виміру | Варіанти | |
|-------|--|-------------------|--------------------|---------------|-----------|
| | | | | базовий | проектний |
| 1 | Річна програма випуску | n | шт/рік | 8500 | 8500 |
| 2 | Середня трудомісткість обробки | t | хв/шт | | |
| | - вал | | | 13,8 | 3,7 |
| | - втулка | | | 40 | 1,9 |
| | Середня трудомісткість обробки | t | год/шт | | |
| | - вал | | | 0,230 | 0,062 |
| | - втулка | | | 0,667 | 0,032 |
| 3 | Вартість обробки одної спряженої пари | T | грн/шт | 60 | 30 |
| 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 | - | 100 000 |

Для визначення суми капітальних вкладень необхідно визначити: розрахункову та прийнятну кількість потрібного обладнання для обробки спряженої пари вал-втулка 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 | 0,974 2,823 | 0,262 0,203 | $H_p = \frac{n \cdot t}{F}$ $H_{p(\bar{o})}^c = \frac{8500 \cdot 0,23}{2008} = 0,974$ $H_{p(\bar{o})}^o = \frac{8500 \cdot 0,667}{2008} = 2,823$ $H_{p(n)}^c = \frac{8500 \cdot 0,062}{2008} = 0,262$ $H_{p(n)}^o = \frac{8500 \cdot 0,048}{2008} = 0,203$ |
| 2 | Прийнята кількість обладнання | H_n^c H_n^o | шт | 1 3 | 1 | - |
| 3 | Вартість всього обладнання | $K_{об}$ | грн | 2 585 550 | 980 000 | $K_{об} = K \cdot H_n$ $K_{об(\bar{o})} = 185\,550 \cdot 1 + 800\,000 \cdot 3 = 2\,585\,550$ $K_{об(n)} = 980\,000 \cdot 1 = 980\,000$ |
| 4 | Вартість виробничих приміщень | $K_{вп}$ | грн | 43 391,7 | 79 200 | $K_{вп} = S \cdot \kappa_{\partial} \cdot H_n \cdot C_n$ $K_{вп(\bar{o})} = (1,527 \cdot 1 + 2,413 \cdot 3) \cdot 1,1 \cdot 4500 = 43\,391,7$ $K_{вп(n)} = (16 \cdot 1) \cdot 1,1 \cdot 4500 = 79\,200$ |
| 5 | Загальна сума капітальних вкладень | $K_{кв}$ | грн | 2625941,7 | 1 059 200 | $K_{кв} = K_{об} + K_{вп}$ $K_{кв(\bar{o})} = 2\,585\,550 + 43\,391,7 = 2\,625\,941,7$ $K_{кв(n)} = 980\,000 + 79\,200 = 1\,059\,200$ |

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

| № пп | Найменування показників | Умовні познач. | Одиниці виміру | Варіанти | | Формули, розрахунок |
|---------|--|-------------------|-------------------|--------------|------------|---|
| | | | | Базовий | Проектний | |
| 1 | Заробітна плата | C_{zn} | грн | 555 390 | 277 695 | $C_{zn} = n \cdot T \cdot K_{\partial z}$ $C_{zn(\bar{b})} = 8500 \cdot 60 \cdot 1,089 = 555\,390$ $C_{zn(n)} = 8500 \cdot 30 \cdot 1,089 = 277\,695$ |
| 2 | Амортизація, утримання та ремонт обладнання | $C_{ам}$ | грн | 390 935,16 | 148 176 | $C_{ам} = \frac{K \cdot H_n \cdot (a_a + a_y)}{100}$ $C_{ам(\bar{b})} = \frac{(185\,550 \cdot 1 + 800\,000 \cdot 3) \cdot (11,48 + 3,64)}{100} =$ $= 390\,935,16$ $C_{ам(n)} = \frac{(980\,000 \cdot 1) \cdot (11,48 + 3,64)}{100} = 148\,176$ |
| 3 | Вартість електро- енергії | C_e | грн | 38 516,40 | 57 243,06 | $C_e = N \cdot \kappa_n \cdot F \cdot H_n \cdot C_e \cdot \kappa_{zo}$ $C_{e(\bar{b})} = (3,7 \cdot 1 + 4 \cdot 3) \cdot 0,9 \cdot 2\,008 \cdot 1,81 \cdot 0,75 = 38\,516,40$ $C_{e(n)} = (25 \cdot 1 + 5 \cdot 1) \cdot 0,7 \cdot 2\,008 \cdot 1,81 \cdot 0,75 = 57\,243,06$ |
| 4 | Ремонт та утримання виробничої площі | $C_{пл}$ | грн | 1 041,40 | 1 900,80 | $C_{пл} = \frac{S \cdot \kappa_{\partial} \cdot H_n \cdot C_n \cdot a_n}{100}$ $C_{пл(\bar{b})} = \frac{(1,527 \cdot 1 + 2,413 \cdot 3) \cdot 1,1 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 1\,041,40$ $C_{пл(n)} = \frac{(16 \cdot 1) \cdot 1,1 \cdot 4500 \cdot 2,4}{100} = 1\,900,80$ |
| 5 | Собівартість випуску продукції | C | грн | 2 001 168,92 | 967 441,86 | $C = C_{zn} + C_{ам} + C_e + C_{пл}$ $C_{(\bar{b})} = 555\,390 + 390\,935,16 + 38\,516,40 + 1\,041,40 =$ $= 985\,882,96$ $C_{(n)} = 277\,695 + 148\,176 + 57\,243,06 + 1\,900,80 = 435\,014,86$ |

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

$$E_p = [C_{(б)} - C_{(n)}] + E_n [K_{кв(б)} - K_{кв(n)}] = \\ = (985\,882,96 - 435\,014,86) + 0,15(2\,625\,941,70 - 1\,059\,200) = 785\,879,36.$$

При цьому коефіцієнт ефективності НДР:

$$K_{ef} = \frac{E_p}{E_{НДР}} = \frac{785\,879,36}{100\,000} = 7,86.$$

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень РОД з ЕЕГ.
2. Теоретичні дослідження виконано на основі теорії електроерозійної обробки, теорії математичного планування експерименту та засобів математичного моделювання.
3. Експерименти виконано на верстаті для РОД "Дуга-8Г".
4. Теоретично і експериментально досліджено і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу за умов обробки чавунним ЕІ: продуктивності процесу обробки, шорсткості обробленої поверхні, між електродний зазор, знос ЕІ. Залежно від режиму обробки чавунним ЕІ продуктивність при виготовленні отворів складає 400...1700 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 5...18 мкм; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах 14,5...26 %, міжелектродний зазор в межах 0,09...0,21 мм.
5. Теоретично і експериментально досліджено і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу за умов обробки сталевим ЕІ: продуктивності процесу обробки, шорсткості обробленої поверхні, між електродний зазор, знос ЕІ. Залежно від режиму обробки сталевим ЕІ продуктивність при виготовленні отворів складає 200...2800 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 5...17 мкм; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах 76...84 %, міжелектродний зазор в межах 0,06...0,24 мм.
6. Теоретично і експериментально досліджено і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу за умов обробки графітовим ЕІ: продуктивності процесу обробки, шорсткості обробленої поверхні, між електродний зазор, знос ЕІ. Залежно від режиму обробки графітовим ЕІ продуктивність при виготовленні стержнів складає 450...2300 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 5...12 мкм; об'ємний

знос ЕІ знаходиться в межах 0,45...1,2 %, міжелектродний зазор в межах 0,06...0,21 мм.

7. При порівнянні отриманих результатів дослідження технологічних характеристик процесу РОД можемо зробити висновок, що продуктивність процесу обробки і міжелектродний зазор в рамках експериментів відрізняються незначно, шорсткість обробленої поверхні в рамках експерименту при обробці графітовим ЕІ із збільшенням струму і тиску краща в порівнянні з обробкою сталевим і чавунним ЕІ. Суттєва відмінність в отриманих результатах у зносу ЕІ, у графітових ЕІ він найменший, а у сталевих найбільший.

8. Описано особливості вибору матеріалу для виготовлення ЕІ, та надані рекомендації щодо раціонального вибору матеріалу ЕІ в різних умовах обробки.

9. Описано особливості розробки конструкції ЕІ.

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. Ресурси Інтернету: <https://danube.pto.org.ua/index.php/component/k2/item/112-tema-2-2-zvaryvalna-duga>.
4. 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.
5. Общемашиностроительные нормативы времени на газовую сварку, газовую, газоелектрическую и кислородно-флюсовую резку черных, коррозионно-стойких и цветных металлов – М. Экономика, 1989. – 171 с.
6. Плазменно-дуговая аппаратура. Эсибян Э. М. “Техніка”, 1971, 164 с.
7. Хильчевский В. В. Новая технология производства и ремонта режущих органов сельскохозяйственных машин // Материалы конф. “Высокоэффективные технологии в машиностроении”. – Харьков: АТМ України. – 1998. – С. 91.
8. А. с. 1484500 СССР, М. Кл. В 23 Н 1/04. Электрод-инструмент для изготовления деталей типа стержней / В. М. Боков, В. И. Носуленко, В.М. Жердый (СССР). – № 4191166/25-08; Заявлено 06.02.87; Опубл. 07.06.89, Бюл. №21.
9. А. с. 722254 СССР, М. Кл. С 21 Д 1/74. Способ поверхностного упрочнения металлов и сплавов / В. И. Носуленко, Ю. Ф. Качанов, Б. Б. Крышкин (СССР). – № 2477893/22-02; Заявлено 22.04.77; Не подлежит опубл. в откр. печати.
10. Артамонов Б. А. Электроэрозионные, электрохимические и комбинированные с ними методы обработки. Часть I. Технические решения.

– М.: ВНИИПИ, 1988. – 62 с.

11. Адаптивное управление станками / Под ред. Б. С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973.

12. Башта Т. Н. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971.

13. Альберт М. Высокопроизводительная электроэрозионная обработка // В мире производства: передовая зарубежная технология. – 1991. – № 1 – С. 48...52.

14. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.04. / ТПИ. – Тула, 1977. – 26 с.

15. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.

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

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

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

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

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Авториф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТТУ „КПІ”. – Київ, 1999. – 36 с.
2. Носуленко В.І., Шмельов В.М. Розмірна обробка металів електричною дугою // Навчальний посібник ПП „Ексклюзив-Систем”, Кропивницький, 2017.
3. Ресурси Інтернету: <https://danube.pto.org.ua/index.php/component/k2/item/112-tema-2-2-zvaryuvalna-duga>.
4. 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.
5. Общемашиностроительные нормативы времени на газовую сварку, газовую, газоелектрическую и кислородно-флюсовую резку черных, коррозионно-стойких и цветных металлов – М. Экономика, 1989. – 171 с.
6. Плазменно-дуговая аппаратура. Эсибян Э. М. “Техніка”, 1971, 164 с.
7. Хильчевский В. В. Новая технология производства и ремонта режущих органов сельскохозяйственных машин // Материалы конф. “Высокоэффективные технологии в машиностроении”. – Харьков: АТМ України. – 1998. – С. 91.
8. А. с. 1484500 СССР, М. Кл. В 23 Н 1/04. Электрод-инструмент для изготовления деталей типа стержней / В. М. Боков, В. И. Носуленко, В.М. Жердий (СССР). – № 4191166/25-08; Заявлено 06.02.87; Опубл. 07.06.89, Бюл. №21.
9. А. с. 722254 СССР, М. Кл. С 21 Д 1/74. Способ поверхностного упрочнения металлов и сплавов / В. И. Носуленко, Ю. Ф. Качанов, Б. Б. Крышкин (СССР). – № 2477893/22-02; Заявлено 22.04.77; Не подлежит опубл. в откр. печати.
10. Артамонов Б. А. Электроэрозионные, электрохимические и комбинированные с ними методы обработки. Часть I. Технические решения.

– М.: ВНИИПИ, 1988. – 62 с.

11. Адаптивное управление станками / Под ред. Б. С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973.

12. Башта Т. Н. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971.

13. Альберт М. Высокопроизводительная электроэрозионная обработка // В мире производства: передовая зарубежная технология. – 1991. – № 1 – С. 48...52.

14. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.04. / ТПИ. – Тула, 1977. – 26 с.

15. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.

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

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

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

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

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