

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:**

**«Удосконалення станції робочої рідини для РОД з використанням
електроерозійних головок»**

**«Improvement of the working fluid station for ROD using
electroerosion heads»**

Виконав здобувач вищої освіти

II курсу, групи ПМ(ОТ)-21 М 1,4

спеціальності 131

«Прикладна механіка»,

_____ Сурін В. В.

12 грудня 2022 р.

Керівник проекту

канд. техн. наук, доцент

_____ Віталій ШМЕЛЬОВ

14 грудня 2022 р.

Рецензент

канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр КУЗИК

14 грудня 2022 р.

Центральноукраїнський національний технічний університет
 Факультет: Механіко-технологічний
 Кафедра: Обробки металів тиском та спецтехнологій
 Рівень вищої освіти: другий (магістерський)
 Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
 Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»
 Освітньо-професійна програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Зав. кафедри ММР
 канд. техн. наук, доцент
 _____ Андрій ГРЕЧКА
 26 серпня 2022 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
 ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
 ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ
Суріна Володимира Вікторовича**

1. Тема роботи: «Удосконалення станції робочої рідини для РОД з використанням електроерозійних головок».
2. Керівник роботи: Шмельов Віталій Миколайович, канд. техн. наук, доцент.
3. Строк подання роботи до захисту: 14 грудня 2022 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.
 Мета: дослідження технологічних характеристик процесу розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.
 Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методику експериментальних досліджень; виконати експериментальні дослідження та провести аналіз отриманих результатів; розробити конструкцію установки для РОД з використанням електроерозійних головок; виконати розрахунки з економічної частини.
5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
№ 5 «Економічна частина»	Савеленко Г. В., к. т. н., ст. викл.	29.08.2022 р.	24.11.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	15.09.2022 р.	
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу	03.10.2022 р.	
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові	15.11.2022 р.	
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту	01.12.2022 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	12.12.2022 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	14.12.2022 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	29.12.2022 р.	

Дата видачі завдання

29 серпня 2022 р.

Підпис керівника

_____ Шмельов В. М.

Завдання прийнято до виконання

29 серпня 2022 р.

Підпис здобувача

_____ Сурін В. В.

АНОТАЦІЯ

Сурін В.В. «Удосконалення станції робочої рідини для РОД з використанням електроерозійних головок», спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП - «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2022 рік.

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

Проведено аналіз існуючої і дані рекомендації щодо нової конструкції установки для розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок, що відрізняється низькою економічною собівартістю порівняно з дорогими традиційними електроерозійними верстатами.

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

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

ANNOTATION

Surin V. "Improvement of the working fluid station for ROD using electroerosion heads", specialty 131 "Applied Mechanics", EP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2022.

The purpose of the work is to improve the existing and develop new equipment for the implementation of the method of dimensional processing with an electric arc using electroerosion heads as a highly effective alternative to traditional methods of metalworking.

An analysis of the existing one was carried out and recommendations were given for the new design of the installation for dimensional treatment with an electric arc using EDM heads, which is characterized by a low economic cost compared to expensive traditional EDM machines.

The technological characteristics of the process of dimensional processing by an electric arc using electroerosion heads, namely its electrical and hydrodynamic characteristics, were studied and described, and mathematical models of the productivity of the processing process, roughness of the processed surface, linear wear of the electrode-tool and the interelectrode gap were obtained.

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

ЗМІСТ

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1. ЕЛЕКТРИЧНА ГОЛОВКА РОД ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНА АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ МЕТОДАМ.....	9
1.1. Сутність розмірної обробки металів електричною дугою.....	12
1.2. Класифікаційні ознаки та класифікація способів ЕРО.....	15
1.3. Електрична дуга як джерело енергії для нових технологій.....	23
1.4 Висновки.....	29
РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	30
2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень.....	30
2.2. Обладнання, пристрої, апаратура.....	32
2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів.....	34
2.4 Охорона праці при роботі на верстатах РОД.....	38
2.5. Висновки.....	39
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД	40
3.1. Визначення технологічних характеристик РОД.....	40
3.2. Висновки.....	53
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК.....	55
4.1. Призначення і область застосування	55
4.2. Опис установки.....	56
4.3. Опис ЕЕГ.....	57
4.4. Станція робочої рідини	60
4.5. Висновки.....	64
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК.....	65
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72
ДОДАТКИ.....	74

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення енергоефективності та продуктивності приобробці деталей з важкооброблюваних металів стає все більш актуальним у зв'язку із ростом цін й зменшенням лімітів на енергоносії для більшості машинобудівних підприємств. Як доведено у працях таких відомих вчених як Б. Р. Назаренка, Н. І. Назаренко, Б. Н. Золотих, А. С. Зінгермана, Б. Г. Гуткіна, А. Л. Лівшиця, В. І. Носуленка, М. Zhang, електрофізичні і, зокрема, електроерозійний метод обробки дозволяють значно підвищити продуктивність та енергоефективність виготовлення складних за формою деталей з твердих металів і їх сплавів.

Одним із найбільш перспективних високопродуктивних методів електроерозійної обробки є спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), який відомий за роботами Носуленка В. І. РОД забезпечує значно більшу продуктивність обробки (в 5...10 разів) і менші витрати електроенергії (в 1,5..2 рази), ніж електроіскрова або електроімпульсна обробка [1].

Універсальні та спеціальні верстати РОД є відносно дорогими для застосування їх на підприємствах з одиночним та дрібносерійним виробництвом, а також у ремонтних майстернях. Одним з перспективних напрямків є розробка електроерозійних головок (ЕЕГ) до металорізальних верстатів, що дозволяють без суттєвих змін в конструкції верстату встановлювати на нього ЕЕГ, а після завершення обробки знімати ЕЕГ і використовувати верстат за своїм призначенням.

Проте, на металорізальних верстатах непередбачено жодного пристрою для подачі електрода-інструмента (ЕІ) в процесі обробки. При цьому застосування ручного приводу ЕІ обмежується значними зусиллями на рукоятці переміщення ЕІ, а розробка складних гідравлічних або електричних

приводів із слідкуючими системами призведе до значного подорожчання установки.

Таким чином, виконання досліджень, спрямованих на розробку методів, системсамоподачі ЕІ та розробка відповідних конструкцій ЕЕГ РОД для металорізальних верстатів є актуальнимнауково-прикладним завданням, успішне виконання якого дозволить більш широко впроваджувати процес РОД у виробництво.

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

Задачі дослідження:

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

Наукова новизна отриманих результатів

1. Описано електричні і гідродинамічні характеристики процесу РОД з ЕЕГ, що дозволить отримувати деталі заданих розмірів з необхідною якістю обробленої поверхні.
2. Запропоновано конструкцію станції робочої рідини для РОД з ЕЕГ, що дозволить отримати компактну установку і знизити собівартість її виготовлення та покращити умови праці на установці.

Практичне значення отриманих результатів

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

Удосконалено існуючу та запропоновано нову концепцію конструкції станції робочої рідини для реалізації способу РОД з ЕЕГ, що дозволить отримати компактну установку і знизити собівартість її виготовлення та покращити умови праці на установці.

Особистий внесок здобувача

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

Апробація результатів та публікації.

Брав участь у LVI науково-технічна конференція здобувачів вищої освіти за результатами якої опубліковано 1 тези у збірнику тез доповідей здобувачів вищої освіти LVI науково-технічної конференції «Наука виробництву, 2022» за підсумками проведення «Дня науки – 2022».

Розділ 1. ЕЛЕКТРИЧНА ГОЛОВКА РОД ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНА АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ МЕТОДАМ

Підвищення ефективності суспільного виробництва пов'язано, перш за все, з розвитком машинобудування та широким впровадженням у виробництво прогресивних технологій. Основою машинобудування є металообробка, яка представлена різноманітними традиційними способами обробки металів різанням, тиском та литтям, а також перспективними, але порівняно мало вивченими і такими, що мають обмежене практичне застосування різноманітними процесами так званої електротехнології (електрофізичними та електрохімічними способами обробки) [1].

Одним із прогресивних способів розмірної електрофізичної обробки металів, що забезпечує широкі технологічні можливості, є традиційна електророзрядна обробка (ЕРО) або інакше електроерозійна обробка (ЕЕО), що заснована на використанні нестационарних, іскрових (імпульсних) електричних розрядів. проте вона знаходить обмежене практичне застосування, оскільки не забезпечує достатньо високої продуктивності. В цьому зв'язку помітний практичний інтерес являє спосіб, що отримав назву розмірна обробка металів електричною дугою, надалі РОД [1].

РОД – це принципово новий процес [2], заснований на використанні стаціонарної електричної дуги. Він є різновидом ЕРО, по суті, наступним етапом її розвитку. Порівняно з відомими способами ЕРО, заснованими на використанні нестационарного електричного розряду (електроіскрова обробка), РОД забезпечує такі переваги:

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

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

3. Джерела живлення технологічним струмом (звичайні джерела живлення зварювальної дуги) значно дешевші (в 3...5 разів), широко розповсюджені та загальнодоступні, є в достатній кількості.

4. Розроблені порівняно прості та дешеві електроерозійні верстати РОД та системний ряд компактних, простих і дешевих електроерозійних головок (ЕЕГ) реалізують концепцію локального підведення робочої рідини в зону обробки (тобто робочої ванни з рідиною, як це характерно для звичайних електроерозійних верстатів, нема). Це дозволяє високоефективно здійснити обробку як профільованим, так і непрофільованим електродом, як на універсальних і спеціальних верстатах РОД, так і на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми своїх основних функцій, як в найбільш сучасному інструментальному цеху, так і в будь-якій ремонтній майстерні. тому верстати РОД стають верстатами масового попиту.

Як високоефективний альтернативний процес спосіб РОД порівняно з традиційними методами металообробки (різанням, тиском) забезпечує такі переваги:

1. Вихідний енергоносіє (електроенергія) не перетворюється в силову енергію (тобто не потрібен двигун і відповідні ланки кінематичного ланцюга верстата), а реалізується в зоні обробки безпосередньо, виконуючи відповідну операцію обробки; при цьому продуктивність обробки може бути змінена простим регулюванням струму обробки. В результаті верстат значно спрощується та здешевлюється, а процес стає більш мобільним.

2. Обробка здійснюється без докладання помітних механічних зусиль до інструмента (силове різання, тиск на інструмент відсутні) та без силової дії на заготовку. Відповідно виключається необхідність передачі значних механічних зусиль через систему верстат-пристосування-інструмент-деталь (ВПД), що дозволяє помітно спростити та здешевити верстат в цілому.

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

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

5. Широкі можливості реалізації різноманітних технологічних схем формоутворення як непрофільованим, так і, особливо, профільованим електродом, зокрема, копіювання форми електрода на поверхні заготовки при простому поступальному русі електрода, що дозволяє отримати аналогічно процесу штампування різноманітні отвори, порожнини, стержні та інші вироби складної форми. При цьому для використання таких операцій в умовах РОД потрібні порівняно прості і дешеві верстати і порівняно дешеві електроди, в той час як при традиційних методах металообробки для досягнення того ж результату треба мати металоємність, порівняно дорогі, часто унікальні верстати та преси і порівняно дорогі інструменти.

6. Існує можливість виконувати ряд технологічних операцій, що не можуть бути виконані іншими методами обробки, наприклад різноманітні глибокі отвори в важкооброблюваних матеріалах.

Викладені переваги РОД, досягнутий рівень розробок, простота реалізації та наявність відповідної техніки (джерел живлення дуги і т. і.) роблять РОД високоефективним альтернативним процесом металообробки, що має широкі технологічні можливості, визначену область раціонального застосування та забезпечує високу економічну ефективність, перш за все, більш високу продуктивність та ресурсозбереження.

1.1. Сутність розмірної обробки металів електричною дугою

Сутність розмірної обробки металів електричною дугою (РОД) полягає в тому [2], що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою, яка горить поміж електродом-інструментом (ЕІ) і електродом-заготовкою (ЕЗ) в потоці рідини при динамічному тиску потоку в зоні обробки не менше 1...2 кПа (що відповідає швидкості потоку приблизно 1...2 м/с). Звичайно РОД здійснюється дуговим розрядом, що горить в поперечному, по суті, потоці робочої рідини (рис. 1.1). Одержаний таким чином дуговий розряд переміщується по поверхні електродів і має високі енергетичні характеристики, в зв'язку з чим відбувається інтенсивне локальне руйнування металу за рахунок випаровування і крапельного викидання розплаву, а потік рідини видаляє із зони обробки отримані продукти ерозії. Все це в сукупності забезпечує оптимальне протікання процесу розмірної обробки.

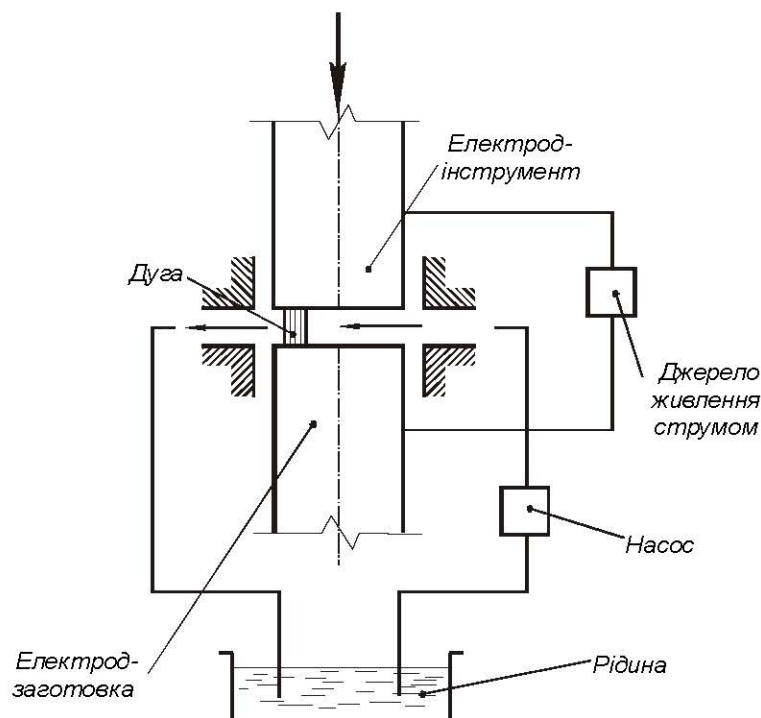


Рис. 1.1. Принципова схема РОД

Типова осцилограма струму і напруги дуги при РОД (рис. 1.2) не відрізняється від типової осцилограми струму і напруги звичайної

стаціонарної дуги типу зварювальної [3] чи плазмової дуги для різання металу [4].

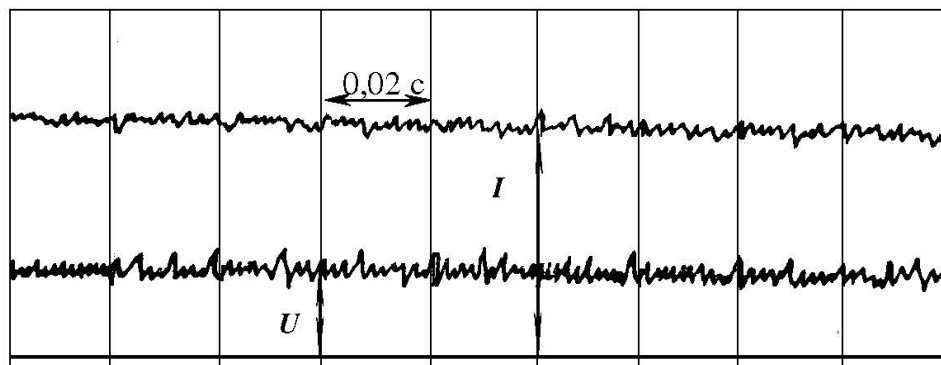


Рис. 1.2. Типова осцилограма струму I та напруги U дуги при РОД

В умовах РОД енергетичні характеристики розряду (густина струму, напруженість електричного поля і т. і.) регулюються легко, плавно і в широких межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку і при збільшенні (зменшенні) останнього збільшуються (зменшуються), що необхідно розглядати як результат саморегулювання енергетичних характеристик розряду в функції динамічного тиску потоку. Як наслідок, в умовах такого процесу можна легко керувати якістю процесу обробки за рахунок зміни динамічного тиску, здійснюючи обробку в широкому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення і аж до превалюючого тонкого розмірного випаровування. Таким чином, динамічний тиск потоку робочої рідини в умовах РОД є основним параметром процесу, який визначає, в кінцевому підсумку, можливість та якісну сторону процесу обробки.

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

ЕІ можуть бути плавкими, наприклад сталевими, і неплавкими, наприклад вольфрамовими, профільованими і непрофільованими. Вони

виготовляються з тих же матеріалів і мають приблизно таку ж ерозійну стійкість, як і при відомих способах ЕРО. Так, високу стійкість забезпечують ЕІ з графіту при застосуванні робочої рідини із нафтопродуктів.

Дуга при РОД може живитись як постійним, так і змінним струмом. При живленні дуги змінним струмом стабільність процесу гірша, а продуктивність помітно знижується. В цьому зв'язку, а також з метою використання ефекту полярності електричної ерозії, який дозволяє забезпечити максимальну продуктивність обробки ЕЗ і мінімальний знос ЕІ, дугу при РОД живлять постійним струмом. Джерелом живлення струмом є зварювальні випрямлячі або генератори із зовнішньою падаючою характеристикою. Напруга робочого ходу джерел живлення визначається особливостями реалізації технологічних схем формоутворення і коливається в межах 20...50 В і більше; напруга холостого ходу коливається в межах 50...100 В і більше. Потужність джерел живлення струмом визначає продуктивність обробки і може досягати десятків і сотень кіловат.

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

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

Оптимальна величина міжелектродних зазорів (МЕЗ) коливається в межах 0,05...0,15 мм. Точність обробки, яка визначається перш за все зносом

ЕІ та коливаннями величини МЕЗ, в цілому не поступається досягнутій при відомих способах ЕРО.

Порівняльна оброблюваність матеріалів в умовах РОД оцінюється аналогічно, як і при відомих способах ЕРО. Продуктивність обробки в першому наближенні прямо пропорційна струму, який може досягати кількох тисяч ампер, і в багато разів перевищує продуктивність електроіскрової (електроімпульсної) обробки. Наприклад, при струмі обробки 1000 А продуктивність при обробці сталей досягає 30000 мм³/хв при R_a 6,3 мкм та глибині зони термічного впливу в межах кількох сотих долей міліметра. Питомі витрати електроенергії в залежності від режимів обробки складають для сталей 3...10 кВт·год/кг (100...300 кДж/см³).

Особливістю способу є необхідність реалізації досить великих розходу та тиску (до 2Мпа і більше) робочої рідини.

Процес РОД потрібно розглядати як спосіб ЕРО.

1.2. Класифікаційні ознаки та класифікація способів ЕРО

В світі не існує ізольованих явищ, кожне з них обумовлене якимось іншими явищами. Явище ж, якщо воно вирване із свого природного зв'язку, перетворюється в дещо незрозуміле, ірраціональне. Звичайно в процесі пізнання, ми, щоб дослідити те чи інше явище, виділяємо його на початку із загального зв'язку. Але рано чи пізно логіка дослідження вимагає поновлення цього зв'язку, інакше не можливо отримати дійсний образ явища. Загальний універсальний зв'язок, взаємодія явищ і процесів повинні знайти відображення у взаємозв'язку людських понять. Тільки в цьому випадку людина може пізнати світ в його єдності і руху. Наукове поняття чи система понять, що утворюються людиною в процесі пізнання, зокрема, класифікація способів ЕРО, є не що інше, як відображення внутрішнього зв'язку явищ, процесів поміж ними.

Поява РОД, на нашу думку, дозволяє по новому поглянути на процес ЕРО і на фізичні умови його реалізації. Дійсно, якщо раніше вважали, що необхідною умовою є дискретність, перерваність, нестаціонарність електричних розрядів [5], то зараз цього сказати не можна. Зокрема, ми переконуємось, що застосування нестаціонарних електричних розрядів не є обов'язковою умовою реалізації процесу ЕРО, і отже, для цього, в кінцевому підсумку, важливою є не тривалість і енергія імпульсу, а дещо інше. В зв'язку з цим плідною є спроба проаналізувати основні фактори, що забезпечують оптимальне протікання ЕРО, з тим, щоб установити основні фізичні умови її реалізації, а отже, і основні класифікаційні ознаки ЕРО.

Розробка класифікаційних ознак і удосконалення класифікації способів ЕРО має велике наукове і методологічне значення, оскільки дозволяє поглянути на процес електричної ерозії з точки зору простої суті, яка лежить в основі цього складного явища, дозволяє відокремити ознаки суттєві від несуттєвих і виявити загальні для всіх способів ще невідомі внутрішні зв'язки та закономірності, дозволяє знаходити нові комбінації визначальних ознак та описати деякі ще невідомі властивості обробки, дозволяє вибрати напрямки пошукових досліджень і передбачити основні тенденції та можливі напрямки в розвитку ЕРО.

Основні класифікаційні ознаки ЕРО повинні відображувати основні фізичні умови її реалізації і тому розробка класифікаційних ознак повинна починатись з аналізу останніх. Теплова природа електричної ерозії, як відомо, доведена. Тому проаналізуємо класифікаційні ознаки відомих способів ЕРО перш за все з точки зору фізики тепла (рис. 1.3).

ЕЕО заснована на використанні для локального руйнування металу перетвореної в тепло енергії електричних дугових розрядів. Сформулюємо основні фізичні умови реалізації ЕРО. Для цього почнемо з аналізу різновидів електричних розрядів, які застосовують для ЕРО.



Рис. 1.3. Класифікаційні ознаки і класифікація способів ЕРО

Для ЕРО, як зазначалось, можна використовувати як стаціонарний, так і нестационарний електричні дугові розряди, причому за своїм ефектом теплової дії на металеві електроди (зона термічного впливу, шорсткість і інше) ці розряди практично не відрізняються. Є можливим, наприклад, підібрати режими, при яких для обох видів розрядів можна отримати однаковий результат (наприклад, при однаковій шорсткості обробленої поверхні зона термічного впливу також не буде відрізнятися).

В такому випадку стаціонарний розряд в умовах РОД і нестационарний розряд при відомих способах ЕРО треба за їх якістю розглядати як рівноцінні джерела тепла, а їх енергетичні характеристики (напруженість електричного поля і густина струму в стовпі розряду, сумарне значення катодного і анодного падінь напруги та інше) при відповідних умовах повинні співпадати. І дійсно, якщо порівняти енергетичні характеристики стаціонарного розряду в умовах РОД і енергетичні характеристики нестационарного розряду в умовах відомих способів ЕРО [5], то виявляється

що це саме так. Є, проте, і відміни. Різними є і технологічні можливості таких джерел тепла. Дійсно, при протіканні нестаціонарного розряду його енергетичні характеристики змінюються в широких межах (наприклад, напруженість електричного поля в стовпі розряду може змінюватись від 5 до 0,5 кВ/см), тоді як енергетичні характеристики стаціонарного розряду в умовах РОД досить стабільні (так напруженість електричного поля в стовпі розряду може бути незалежно від величини струму не менше 3 кВ/см). Проте з точки зору фізичної суті явища – це одне й те ж, це електричний дуговий розряд відповідних енергетичних характеристик. Можна, наприклад, сказати, що електрична іскра – це дуга зі змінними в часі енергетичними характеристиками, а можна, навпаки, сказати, що дуга в умовах РОД – це тривала іскра. Тому, як уже зазначалось, стаціонарний і нестаціонарний електричні розряди в умовах ЕРО мають однакову фізичну природу і підкоряються одним і тим же законам.

Враховуючи викладене, сформулюємо основні фізичні умови реалізації ЕРО. Ці умови повинні, певно, включати в себе, по-перше, загальні умови протікання електричного дугового розряду, по-друге, повинні відображати особливі вимоги до розряду, що використовується в умовах ЕРО, і, по-третє, повинні відображати особливі вимоги до процесу електричної ерозії з точки зору його оптимального протікання.

Найбільш загальні умови протікання електричного дугового розряду можна звести до таких:

1. Наявність двох електродів-провідників електричного струму із середовищем-діелектриком в МЕЗ, що забезпечує безперервно поновлюваний електричний опір протіканню струму в МЕЗ.
2. Наявність напруги на електродах не менше 10...20В [6].
3. Струм не менше 1 А [7].

Основні вимоги до електричного розряду, який використовується в умовах ЕРО, полягають в тому, щоб він забезпечував достатньо високі для локального руйнування металу енергетичні характеристики (оскільки,

наприклад, звичайна зварювальна дуга цього не забезпечує). Основні вимоги до процесу електричної ерозії зводяться, перш за все, до необхідності безперервного видалення із зони обробки продуктів ерозії. в такому випадку запитасмо, яким чином можна забезпечити оптимальне протікання процесу ЕРО або, що те ж, яким чином забезпечуються основні фізичні умови реалізації процесу РОД?

Перш за все, установимо фактори, що обумовлюють отримання достатньо високих для локального руйнування металу енергетичних характеристик розряду. Як відомо, енергетичні характеристики розряду є головним чином функцією складу і стану зовнішнього середовища в міжелектродному зазорі та матеріалу електродів. якщо змінювати матеріал електродів і склад зовнішнього середовища в міжелектродному зазорі, можна регулювати енергетичні характеристики розряду. Проте при цьому вони виявляються недостатніми для локального руйнування металу, а отже і для ЕРО. Тобто, в умовах ЕРО такий технологічний прийом (зміна складу зовнішнього середовища в міжелектродному зазорі та матеріалу електродів) може розглядатись лише як допоміжний, в поєднанні з іншими, більш важливими технологічними факторами.

Стан зовнішнього середовища характеризується, як відомо, температурою і тиском. Змінювати температуру зовнішнього середовища з метою регулювання енергетичних характеристик складно і малоефективно. Тиск зовнішнього середовища, а це перш за все рідини і газу, може мати статичний характер, коли середовище практично нерухоме, або ж динамічний характер, коли розряд горить в потоці середовища-діелектрика, наприклад рідини. Коли тиск зовнішнього середовища має статичний характер, з підвищенням тиску середовища напруженість електричного поля і густина струму, а відповідно, і енергетичні характеристики розряду зростають [6]. Проте малоефективність та труднощі практичного здійснення роблять цей спосіб регулювання енергетичних характеристик розряду в умовах ЕРО неприйнятним.

Отже, щоб отримати достатньо високі для ЕРО енергетичні характеристики розряду залишається, таким чином, єдина можливість, єдиний технологічний фактор – динамічний тиск робочого середовища, тобто розряд повинен горіти в потоці середовища-діелектрика, а якщо більш конкретно – в поперечному потоці середовища-діелектрика. При цьому енергетичні характеристики розряду виявляються достатніми для локального руйнування металу, а потік середовища-діелектрика видаляє продукти ерозії.

Таким чином в найзагальнішому випадку основні фізичні умови реалізації ЕРО можуть бути сформульовані таким чином: ЕРО реалізується електричним дуговим розрядом в поперечному потоці середовища-діелектрика.

Проведемо аналіз існуючих способів ЕРО з точки зору відповідності цій умові реалізації процесу. При РОД ця умова, як зазначалось, очевидна. Електроіскрова та електроімпульсна обробка реалізують нестационарні електричні розряди в нерухомій діелектричній рідині. Такі розряди забезпечують достатньо високі для локального руйнування металу енергетичні характеристики також завдяки достатньо високому динамічному тиску зовнішнього середовища на розряд. це досягається використанням початкової стадії розвитку розряду, коли в результаті протидії рідини розширенню каналу розряду динамічний тиск зовнішнього середовища виявляє себе найбільш ефективно. Дійсно, з цього приводу Б. Н. Золотих [5] зазначає: «Будь-яка рідина в силу її інерційності буде протидіяти розширенню каналу розряду і діяти на перших етапах розвитку розряду як тверда стінка. Це механічне «фокусування» призводить до різкого збільшення густини енергії, а, отже і до різкого збільшення величини ерозії».

Таким чином, нестационарні електричні розряди, які реалізуються в умовах електроіскрової та електроімпульсної обробки, забезпечують зазначені вище основні фізичні умови реалізації ЕРО також в результаті горіння розряду в поперечному потоці середовища-рідини з тією лише особливістю, що при цьому середовище-рідина нерухоме, а переміщується

фронт розряду (що, проте, не змінює зазначеної суті), а надалі в результаті пульсацій розряду створюється поперечний потік рідини, який забезпечує евакуацію продуктів ерозії.

Отже, електрична дуга (стаціонарний електричний дуговий розряд) в умовах РОД та іскра, імпульс (нестаціонарний електричний дуговий розряд) – це лише різні форми прояву одного й того ж явища, які відрізняються різним характером взаємодії електричного розряду з поперечним потоком середовища-діелектрика; при цьому стаціонарний електричний розряд відрізняється достатньо усталеною формою такої взаємодії, а нестаціонарний електричний розряд - неусталеною.

При електроконтактній обробці використовуються як нестаціонарні, так і квазістаціонарні електричні дугові розряди [6]. Правомірно зробити висновок, що при електроконтактній обробці реалізується інший, ніж при електроіскровій і електроімпульсній обробці, механізм підвищення енергетичних характеристик розряду, а застосування нестаціонарних електричних розрядів взагалі не обов'язкова умова реалізації процесу. Який же в такому випадку фізичний механізм цього процесу? Очевидно, це також результат динамічного тиску поперечного потоку середовища-рідини на розряд з тією лише особливістю, що цей потік створюється як безпосередньо, так і імпульсами, що механічно генеруються електродами, які обертаються. Саме тому застосування нестаціонарних електричних розрядів в цьому випадку не є обов'язкове. Доречно зазначити, що назва способу «електроконтактна обробка», певно, взагалі не відображає фізичну суть способу. Але тоді назву способу "електроконтактна обробка" слід змінити на таку, що відображає фізичну суть способу і назвати цей процес "електромеханічна обробка" (ЕМО). В умовах такого процесу енергетичні характеристики дуги обмежені, але є достатніми для локального руйнування металу. Так, зона термічного впливу може становити соті частки міліметра.

За умов плазмової обробки, у плазмотронах ефект всебічного, постійного, рівномірного, поперечного до стовпа дуги динамічного впливу

поток середовища-діелектрика досягається за рахунок обмеження площі поперечного перерізу каналу розряду соплом плазмотрона з додатковим динамічним впливом поздовжньо-поперечного потоку на стовп дуги за рахунок прокачування через сопло середовища-діелектрика. До числа основних технологічних факторів слід віднести геометричні параметри сопла і витрата середовища-діелектрика, що, власне, визначає і, відповідно, обмежує енергетичні характеристики дуги. При цьому енергетичні характеристики дуги обмежені, але є достатніми для локального руйнування металу, а зона термічного впливу може становити десятки частки міліметра.

Таким чином всі способи ЕРО засновані на використанні електричних дугових розрядів в поперечному потоці середовища-діелектрика, що є основною і обов'язковою умовою реалізації ЕРО. Отже в такому випадку основною класифікаційною ознакою способів ЕРО треба прийняти спосіб реалізації зазначеної умови.

Зараз, згідно викладеного, відомо три основних прийоми (способи) реалізації цієї основної фізичної умови ЕРО, а саме:

1. Електричний розряд протікає безпосередньо в поперечному потоці середовища-діелектрика. Основний технологічний фактор – швидкість потоку. Цей прийом реалізують при РОД і плазмовій обробці (ПО).

2. Електричний розряд протікає в поперечному потоці середовища-рідини, який (потік) утворюється електродами, що взаємно переміщуються (звичайно обертаються). Основний технологічний фактор – швидкість відносного руху електродів. Цей прийом реалізують при електроконтактній обробці.

3. Реалізуються нестационарні електричні розряди в нерухомому середовищі-рідині. Основний технологічний фактор – тривалість імпульсу. Цей прийом використовують при електроіскровій та електроімпульсній обробках.

Отже, якщо виходити з того, що основною класифікаційною ознакою способів ЕРО є спосіб їх реалізації згідно зазначеної основної фізичної умови, то можна виділити три основних способи ЕРО:

1. Обробка стаціонарним електричним дуговим розрядом в поперечному потоці рідини (РОД і ПО).

2. Обробка в рідині електричним дуговим розрядом електродами, що обертаються (електроконтактна обробка, а якщо по фізичній суті, то, це електромеханічна обробка).

3. Обробка в рідині нестаціонарними електричними дуговими розрядами (електроіскрова, електроімпульсна обробка).

Зазначимо, що наведені способи ЕРО можна комбінувати, в зв'язку з чим їх кількість зростає. Крім того, враховуючи викладене, можна запропонувати принципово нові способи ЕРО, наприклад, спосіб, що реалізує в рідині електричний дуговий розряд, який рухається поміж ЕІ та ЕЗ в результаті взаємодії з деяким магнітним полем. Проте про практичну значимість цих способів можна робити висновки тільки після проведених відповідних пошукових досліджень. Тому включати їх в класифікатор способів ЕРО поки недоречно. Тим більше, що, на нашу думку, нестачі в кількості способів ЕРО нема, їх і зараз достатньо для того, щоб в кожному конкретному випадку економічно ефективно можна було вирішити питання оптимального поєднання кількісних і якісних сторін процесу, зокрема за рахунок комбінації способів ЕРО та відповідного узгодження енергетичних характеристик розряду з теплофізичними характеристиками електродів.

1.3. Електрична дуга як джерело енергії для нових технологій

Технології, що засновані на використанні відомих електричних дуг, досягли «технологічної стелі», досягли критичної «точки насичення» і, певною мірою, себе вичерпали. Тому поява нових технологій з

використанням електричної дуги може бути пов'язано лише з появою якісно нових дуг, які відрізняються новим, більш високим рівнем регульованих енергетичних, а, отже, і технологічних характеристик.

У зв'язку з цим науковий і практичний інтерес представляє запропонована нами і вже така, що отримала практичне застосування, електрична дуга в поперечному силовому полі в умовах динамічного впливу, наприклад, в поперечному потоці середовища-діелектрика, і яка відрізняється тим, що її отримують при динамічному тиску потоку більше 5...10 кПа, тобто при тисках, які раніше не були реалізовані ні наукою, ні практикою. Така дуга дозволяє отримати якісно новий рівень енергетичних характеристик, які легко регулюються в самих широких межах і значно перевищують відомі, що дозволяє розглядати її як якісно нове джерело енергії для цілей науки і нових технологій.

При цьому беремо до уваги:

1. Встановлена невідома раніше закономірність взаємодії електричного поля, матеріальною формою прояву якого є електрична дуга, що характеризується силою струму I , і силового поля, матеріальною формою прояву якого є, наприклад, потік середовища-діелектрика, що характеризується динамічним тиском P_d , яка полягає в тому, що така взаємодія супроводжується явищем саморегулювання енергетичних характеристик плазми в стовпі дуги, власне, температури T , концентрації елементарних частинок n , тиску p , а також магнітної індукції власного магнітного поля дуги B , які описуються в функції векторного добутку сили струму дуги I на динамічний тиск поперечного до стовпа дуги силового поля, наприклад, потоку середовища-діелектрика P_d , тобто $\vec{I} \times \vec{P}_d$, і одночасно зростають при збільшенні останнього.

2. Викладена закономірність означає, що при протіканні електричного розряду в поперечному потоці середовища-діелектрика енергетичні характеристики плазми в стовпі дуги (температура, концентрація

елементарних частинок, тиск) регулюються в самих широких межах в функції динамічного тиску потоку, а власне магнітне поле дуги стискає і утримує в стовпі дуги отриману плазму заданих, регульованих енергетичних характеристик, починаючи від значень, характерних для звичайних зварювальних дуг і кінчаючи плазмою, енергетичні характеристики якої обмежуються лише можливостями застосовуваної техніки (робочою напругою джерела живлення дуги і динамічним тиском потоку середовища-діелектрика). Таким чином електрична дуга в умовах такого процесу є, що важливо, не тільки високоефективним джерелом теплової енергії (це стовп дуги, що характеризується тиском плазми p , концентрацією частинок n і температурою T), але і високоефективним джерелом магнітної енергії (власне магнітне поле дуги, що характеризується магнітною індукцією B), які регулюються в самому широкому діапазоні режимів, а їх значення обмежуються лише можливостями застосовуваної техніки. Тобто, як говорять у цьому випадку, "знайдена ручка", що дозволяє легко і плавно керувати цим ефектом. Це дозволяє використовувати таку дугу, назовемо її високотемпературною дугою, в різноманітних областях науки і нових технологій.

Опишемо теоретичні основи і результати експериментальних досліджень такої високотемпературної електричної дуги в поперечному силовому полі, енергетичні характеристики якої значно перевищують енергетичні характеристики відомих дуг і яка, таким чином, дозволяє реалізувати нові високоефективні технології.

Нагадаємо, і цього будемо слідувати, теорія - це система знань, що має практичну цінність. Немає нічого практичніше доброї теорії. Основним критерієм наукового рівня теорії є її практична цінність. Що розумієш, тим і володієш. Беремо до уваги також, що будь-яке точне знання можна отримати лише емпірично. Не слід множити причини при поясненні явища. Найпростіше пояснення - найкраще. Ознака істини - простота і ясність. Все це означає, що теорія електричної дуги повинна не тільки пояснювати це складне фізичне явище з точки зору простої суті, а й описувати дугу як

технологічний засіб для відомих і для нових застосувань і, скажімо так, володіти здатністю передбачення. Сучасний стан теорії дуги далеко не повністю відповідає цим вимогам.

У зв'язку з цим відзначимо, що найбільш складною для розуміння і створення теорії дуги виявилася проста суть цього явища, яка так і залишилася непоміченою. Полягає вона в тому, що електрична дуга є саморегульованою системою, а процеси саморегулювання забезпечує власне магнітне поле дуги. Тому перш за все необхідно описати закони такого саморегулювання в їх сукупності, взаємозв'язку і взаємозалежності. Це дозволяє системно описати закономірності взаємодії дуги із зовнішнім середовищем, зокрема, з поперечним силовим полем і, як наслідок, не тільки пояснити процеси що протікають в дузі, і які раніше не отримували пояснення (наприклад, "зворотний рух дуги в поперечному магнітному полі у вакуумі"), але й управляти її енергетичними, а, отже, і технологічними характеристиками, в тому числі і раніше не відомими, в найширшому діапазоні режимів, що дозволяє розглядати таку електричну дугу як якісно новий технологічний засіб для невідомих раніше вискоефективних застосувань, зокрема, таких:

1. Електрична дуга в поперечному силовому полі за своїми енергетичними характеристикам є унікальним джерелом енергії, який, єдиний з відомих, забезпечує одночасне підвищення температури і тиску плазми (концентрації елементарних частинок, їх густині, інакше щільності) до найвищих значень, а також їх одночасне утримання. Енергетичні характеристики плазми в стовпі такої дуги, власне, температура T , число елементарних частинок n , тиск плазми p регулюються в найширшому діапазоні режимів і обмежуються лише можливостями застосовуваної техніки (робочою напругою джерела живлення електричним струмом U_p і динамічним тиском силового поля P_δ), а власне магнітне поле дуги утримує плазму отриманих енергетичних характеристик. До того ж, що надзвичайно важливо, електрична дуга є джерелом енергії, потужність якого регулюється в найширшому діапазоні (від сотень ватів до багатьох тисяч кіловат), що, в

кінцевому рахунку, дозволяє реалізувати джерело енергії унікальних технологічних можливостей.

Так, наприклад, в стовпі такої дуги створюються умови для синтезу хімічних елементів зовнішнього середовища і електродів відповідно до таблиці Менделєєва зліва направо. У зв'язку з цим, наприклад, досить підстав стверджувати, що в стовпі такої дуги є можливим отримати і утримувати високотемпературну плазму для керованого термоядерного синтезу (КТС) і таким чином технологічно здійснити процес КТС, використовуючи механізми природних зв'язків і рухів елементарних частинок. Нагадаємо, що, згідно з існуючих уявлень, «... головна об'єктивна перешкода, яка стояло і до сих пір стоїть на шляху реалізації УТС, полягає в тому, що неможливо забезпечити одночасно і високу температуру плазми, і високу концентрацію частинок ізотопів водню в цій плазмі (щільність плазми) з тим, щоб відбувся синтез." [Ялишев Ф.Х., 10.10.2010, www.termoyadu.net].

2. Електрична дуга в поперечному силовому полі є високоефективним перетворювачем енергії електричного поля в енергію власного магнітного поля дуги. При цьому в зоні дії такого магнітного поля є можливим здійснити, наприклад, розщеплення хімічних елементів зовнішнього середовища і електродів згідно таблиці Менделєєва справа наліво і таким чином отримати вуглеводи з води і повітря.

При цьому як в першому випадку (синтез хімічних елементів), так і у другому випадку (розщеплення хімічних елементів) за рахунок зміни умов і режимів горіння дуги є можливість управляти цими процесами, забезпечуючи необхідні або прийнятні форми таких перетворень.

3. При протіканні електричної дуги в поперечному силовому полі енергетичні характеристики катодного і анодного джерел тепла на електродах регулюються в найширшому діапазоні режимів, починаючи від значень, характерних для звичайних дуг, типу зварювальних, достатніх для плавлення металу, і закінчуючи значеннями, достатніми для тонкого розмірного випаровування будь-яких струмопровідних матеріалів. Це

дозволяє реалізувати найрізноманітніші нові високоефективні технології, зокрема, розмірну обробку металів, різні способи поверхневого зміцнення металів, більш ефективно у порівнянні з відомим підводне різання металів, плазмове різання металів при відсутності зони термічного впливу, отримання металевих порошків, отримання металевих суспензій, проведення хімічних реакцій та ін.

1.3.1. Загальні відомості

Електрична дуга - це фізичне явище, яке супроводжує протіканням електричного струму більше 1 А поміж двома електродами через середовище-діелектрик при напрузі не менше 10...20 В. Електрична дуга - це породження того, що називають електричним полем, енергія якого руйнує діелектричну міцність середовища-діелектрика, створюючи з матеріалу електродів і зовнішнього середовища електропровідний стовп плазми, який електрично "з'єднує" обидва електроди, утворюючи замкнутий контур. Але електрична дуга - це не тільки електропровідний стовп плазми, це ще й незначні по довжині (висоті) перехідні зони електричного контакту стовпа з електродами, які називаються катодною і анодною областями дуги і де більші значення температури плазми стовпа дуги знижуються до значно менших значень на поверхні електродів.

Таким чином електрична дуга, функціонально, це провідник електричного струму, а в електричному ланцюзі - це електричний опір. На відміну від металевих провідників кожна дуга відрізняється своїм електричним опором, яке залежить від складу і стану зовнішнього середовища, матеріалу електродів, електричних і геометричних параметрів розряду і таким чином електричний опір кожної окремої дуги є функцією багатьох змінних. Електрична дуга характеризується різко вираженою нелінійністю, тобто між силою струму і напругою немає пропорційної зв'язку. Електричний опір, а отже і напруга дуги U_d , що є функцією і одночасно мірою електричного опору дуги, розподіляються по довжині дуги L_d нерівномірно (рис. 1.4).

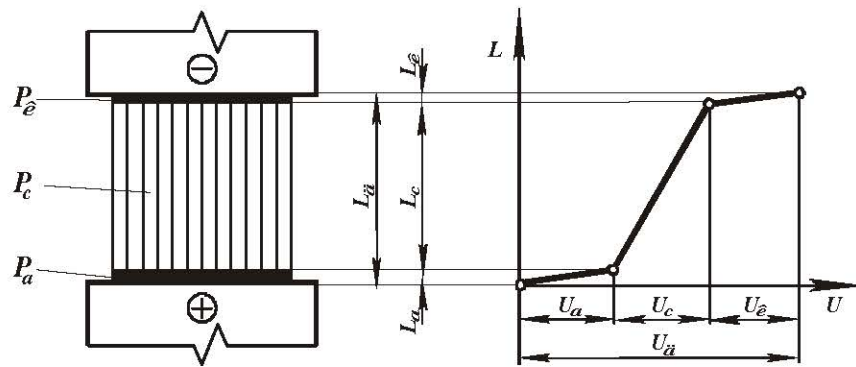


Рис. 1.4. Принципова схема електричної дуги як джерела тепла

В катодній L_a і анодній L_a областях, незважаючи на їх малу протяжність (в межах одного мікрметра), напруги U_k і U_a є значними, що свідчить про високу напруженість електричного поля в них. У стовпі напруженість електричного поля значно менше. У зв'язку з цим електричну дугу розглядають як суму трьох самостійно діючих джерел тепла в катодній області потужністю P_k , анодній області потужністю P_a і стовпі дуги потужністю P_c . Схема трьох джерел тепла в дузі дає можливість представити дугу таким чином: одне джерело тепла потужністю P_k розташований в плоскому шарі на поверхні катода, друге потужністю P_a розташовано в плоскому шарі на поверхні анода і третє потужністю P_c розташовано в об'ємі стовпа дуги. Це дозволяє розглядати і досліджувати дугу як єдність трьох дуже різних за енергетичними характеристиками джерел тепла, кожне з яких в межах своєї області характеризується досить однорідними характеристиками. При цьому приелектродні області (катодна і анодна) представляють собою потужні концентровані, певною мірою, плоскі джерела тепла, в той час як стовп дуги є значно менш концентрування об'ємним джерелом тепла.

1.4. Висновок

Показано, що спосіб РОД з ЕЕГ для виготовлення деталей складного профілю, з важкооброблюваних матеріалів, забезпечує необхідну якість і продуктивність обробки та можливість отримання готових деталей, з необхідними показниками якості і точність обробки і є високоефективною альтернативою традиційним технологіям.

РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень

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

Переважно спосіб РОД застосовують при копіювально-прошивних операцій профільованим ЕІ за цих умов форма та розміри ЕІ повторюють форму та розміри отримувомої деталі. Застосування РОД з використанням електроерозійних головок являє значний інтерес для отримання різноманітних порожнин та отворів в важкооброблюваних та загартованих сталей. Тому необхідні дослідження фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД, розробка технології та пристроїв, дослідження гідродинамічних процесів, що протікають в процесі обробки, приклади реалізації конкретних технологій, впровадження цих технологій у виробництво та визначення області раціонального практичного застосування процесу і його конкурентоспроможності порівняно з іншими способами обробки.

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

Із попередніх досліджень відомо, що найкращу ерозійну стійкість мають електрод-інструмент (ЕІ) з графітизованих матеріалів при застосуванні робочої рідини з нафтопродуктів. Тому для досліджень використовувались ЕІ з матеріалу МПГ- 7 та робочу рідину, яка являє собою суміш мастила і гасу. Найкраща якість обробки досягається при застосуванні зворотної полярності електродів.

Відомо, що при РОД з ЕЕГ основними факторами, що обумовлюють характеристики дуги, фізичний механізм процесу і технологічні характеристики РОД є сила технологічного струму I і статичний тиск робочої рідини на вході в МЕЗ P_s .

Для визначення технологічних характеристик процесу РОД використано математичні методи планування експерименту [8,9,10,11], що дало можливість отримати деякі теоретичні уявлення про фізичний механізм процесу і оцінити теоретичні передумови кількісно.

Технологічні характеристики процесу можуть бути представлені у вигляді функціональної ступеневої залежності від сили струму I та статичного тиску потоку робочої рідини P_s , що і було реалізовано нами при визначенні цих характеристик процесу.

Для реалізації способу РОД необхідне створення різноманітного обладнання та пристроїв. Установка для РОД з ЕЕГ побудованих на основі настільного свердлувального верстату 2М112 (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Настільний свердлувальний верстат 2М112

2.2. Обладнання, пристрої, апаратура

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

Експериментальні дослідження процесу РОД насамперед його технологічних характеристик та виготовлення експериментальних деталей здійснювались на настільному свердлувальному верстаті 2М112 з встановленою в патрон верстату електроерозійною головкою, що призначений для обробки фасонних об'ємних поверхонь, виготовлення фасонних стержнів та прошивання глухих і наскрізних отворів різних поперечних перерізів в деталях як із конструкційних, так і важкооброблюваних сталей і сплавів, зокрема загартованих сталей і твердих сплавів тощо.



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

Технічна характеристика ЕЕГ

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

Для макро- і мікроаналізу протікання процесу в часі, його основні параметри, зокрема, напругу, силу технологічного струму та статичний тиск робочої рідини записували за допомогою плати АЦП L-264 [12], встановленої на персональному комп'ютері (процесор Intel®-486) із програмним забезпеченням “Oscilloskop”, яке дозволяло переглядати і аналізувати отримані осцилограми в різних масштабах часу.

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

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

Таблиця 2.1 - Параметри АЦП

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

2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів

Експериментальні дані, отримані на основі планування та реалізації багатофакторного експерименту із елементами аналізу дисперсії та регресії являють помітний практичний інтерес. Побудовані за результатами експериментів моделі дозволяють визначити ступінь та характер впливу

технологічних факторів на параметри, що досліджуються і, таким чином, створити передумови для керування процесом. В таких випадках важливо отримати максимально компактну адекватну модель, яка не містить зайвих членів та факторів.

Звичайно для відокремлення факторів, які суттєво впливають на досліджуваний параметр (відгук) проводять так звані експерименти для відсіювання, наприклад, на основі методів випадкового балансу або планів Плакетта-Бермана, а потім переходять до реалізації основного плану. Проте, така стратегія проведення експерименту потребує значних витрат. Тому доцільно провести багатофакторний експеримент, який включає і сумнівні фактори із подальшим аналізом дисперсії результатів.

При дослідженні технологічних характеристик процесу РОД основних технологічних схем формоутворення – продуктивності, якості, точності обробки, стійкості ЕІ та гідродинаміки було виконано математичне планування експериментів [8,9,10,11]. Крім точок, визначених планами, при отриманні експериментальних партій деталей перевірялась точність побудованих моделей роботою на інших режимах в рамках меж варіювання керуючих факторів. Це дозволило побудувати також емпіричні графіки, які добре апроксимуються моделями, отриманими в результаті реалізації планів.

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

Регулювання сили струму I і тиску P_s в зазначених далі межах обумовлені можливостями техніки, що при цьому використовувалась, та технологічною доцільністю. Зокрема, в якості джерел живлення для РОД використовують стандартні зварювальні випрямлячі з зовнішньою падаючою

характеристикою ВДУ-504, розраховані на максимальний струм $I_{max} = 500$ А, які при безперервній роботі працюють при $I_{max} = 400$ А. Робоча напруга U в межах 22...30 В, яку забезпечують зазначені джерела живлення, відповідає мінімальній необхідній величині МЕЗ.

Планування експерименту та обробка отриманих результатів виконані за допомогою програми STATISTICA 6.0, зокрема таких модулів як Планування експерименту, Основні статистики і таблиці, Множинна регресія, Нелінійне оцінювання.

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

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

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

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

Тепер задача зводиться до побудови лінійної моделі виду

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^2 b_i \cdot X_i, \quad (2.3)$$

де $Y = \lg y$

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

$$b_1 = \beta_1$$

$$X_1 = \lg I$$

$$b_2 = \beta_2$$

$$X_2 = \lg P_s \text{ і т.д.}$$

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

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

Розрахунок моделі виконують згідно відомих методик [8,9,10,11] і застосуванням програмного пакету STATISTICA 6.0 [11]. В табл. 2.4 представлено приклад значення оцінок коефіцієнтів регресії (*BETA*) та значення коефіцієнтів регресії (*B*), значення критерію Стюдента (*t*) для коефіцієнтів регресії та рівні його значимості (*p*). Побудовано довірчі інтервали ($\pm 95\%$).

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

N=9	Regression Summary for Dependent Variable: lgM (stal.sta) R= ,99824650 R²= ,99649607 Adjusted R²= ,99532810 F(2,6)=853,18 p<,00000 Std.Error of estimate: ,02615					
	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(6)	p-value
Intercept			0,166077	0,072080	2,30405	0,060762
lgI	0,983979	0,024166	1,419427	0,034860	40,71774	0,000000
lgP	-0,168174	0,024166	-0,491145	0,070576	-6,95915	0,000437

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

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

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

2.4. Охорона праці при роботі на верстатах РОД

Безпека при експлуатації електроерозійних верстатів РОД

Верстати РОД повинні експлуатуватися в строгій відповідності з вимогами техніки безпеки. При порушенні цих вимог створюється підвищена небезпека враження електричним струмом, одержання опіків унаслідок загоряння робочої рідини, отруєння газоподібними продуктами розкладання робочого середовища, а також травмування рухомими деталями і вузлами верстата. Крім того, у заходах щодо охорони праці повинні бути враховані збільшений шум, вплив робочого середовища й інші супутні явища при роботі, що становлять визначену небезпеку і погіршують умови праці [13,14].

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 [13, 14].

Вимоги до технологічного обладнання

Вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів.

Безпека праці на виробництві містить такі складові:

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

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

2.5. Висновки

2.5.1. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень РОД з ЕЕГ.

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

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

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД

3.1. Визначення технологічних характеристик РОД

При дослідженні технологічних характеристик РОД використовувалась робоча рідина, що являє собою суміш мастила індустріального і гасу. Матеріал заготовок – сталь 45, електрод-інструмент виготовлений з електроерозійного графіту марки МПГ-7. Полярність електродів при виконанні досліджень – зворотна.

На основі імперичних знань було вибрано три фактори, що впливають на технологічні характеристики РОД, а саме: сила технологічного струму I ; статичний тиск робочої рідини P_s ; висота робочого пояса електрод-інструмента h .

Таблиця 3.1

Межі варіювання факторів при РОД

Фактори	X_{max}	X_{min}	X_0	ΔX
Сила технологічного I (X_1), А	400	100	250	150
Статичний тиск рідини на вході в зазор P_s (X_2), МПа	1,4	1,0	1,2	0,2
Висота робочого пояса ЕІ h (X_3), мм	1,5	0,5	1,0	0,5

3.1.1. Матриця планування експерименту

Таблиця 3.2

Номер експерименту	$X1(I)$	$X2(P_s)$	$X3(h)$	$Y1(M),$ мм ³ /хв	$Y2(Ra),$ мкм	$Y3(\delta),$ мм	$Y4(\gamma),$ %
1	+	+	+	5740,858	12,1	0,3	0,208
2	-	+	-	1679,463	3,8	0,205	0,065
3	+	-	+	8062,942	12,8	0,7	0,257
4	-	-	-	1711,365	4,8	0,4	0,08
5	-	-	+	1914,301	11,5	0,3	0,135
6	-	+	+	2277,061	10,7	0,192	0,109
7	+	+	-	8366,300	4,8	0,55	0,124
8	+	-	-	4661,900	5,6	0,45	0,153
9	+	-	0	6947,594	9,2	0,6	0,212
10	-	+	0	2358,500	6,7	0,197	0,09

11	-	-	0	1896,666	7,8	0,5	0,111
12	+	+	0	8432,586	8,4	0,4	0,172
13	0	0	-	5074,614	4,8	0,5	0,11
14	0	0	+	5265,191	12,5	0,5	0,184
15	0	+	+	4308,960	12,0	0,246	0,167
16	+	0	+	6901,900	12,5	0,4	0,229
17	0	+	0	5695,543	7,6	0,297	0,138
18	+	0	0	7690,090	8,6	0,5	0,189
19	-	0	0	2127,583	7,1	0,4	0,099
20	0	-	0	4622,130	8,3	0,55	0,17
21	0	-	-	3286,632	5,2	0,425	0,123
22	-	0	-	1695,414	4,0	0,4	0,071
23	0	+	-	5322,880	4,3	0,378	0,099
24	+	0	-	6514,100	5,1	0,5	0,136
25	0	-	+	5188,622	12,7	0,5	0,206
26	-	0	+	2095,681	11,0	0,3	0,12
27	0	0	0	5543,084	7,9	0,65	0,152

3.1.2. Продуктивність обробки

Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

Таблиця 3.3

Factor	Regr. Coefficients; Var.: LogM; R-sqr=.93922; Adj.:.93129 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=.0041433 DV: LogM: =Log10(M)					
	Regressn Coeff.	Std Err.	t(23)	p	-95.% Cnf.Limt	+95.% Cnf.Limt
Mean/Interc.	1,426936	0,117349	12,15975	0,000000	1,184181	1,669691
(1)Logl(L)	0,922209	0,049551	18,61124	0,000000	0,819705	1,024713
(2)LogPs(L)	0,442042	0,207409	2,13126	0,043977	0,012983	0,871101
(3)Logh(L)	0,132872	0,062883	2,11300	0,045662	0,002789	0,262955

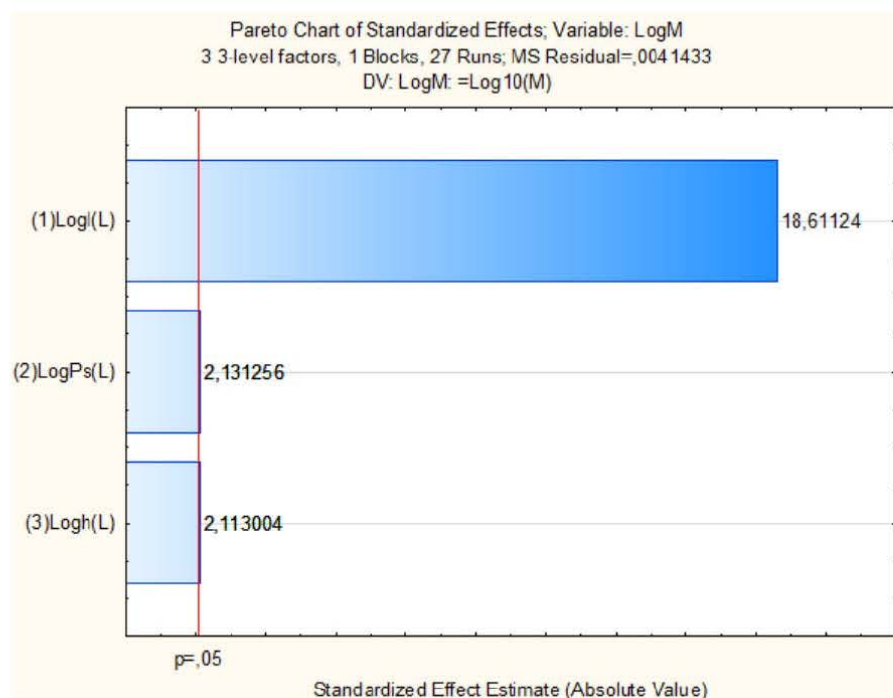


Рис. 3.1. Карта Порето

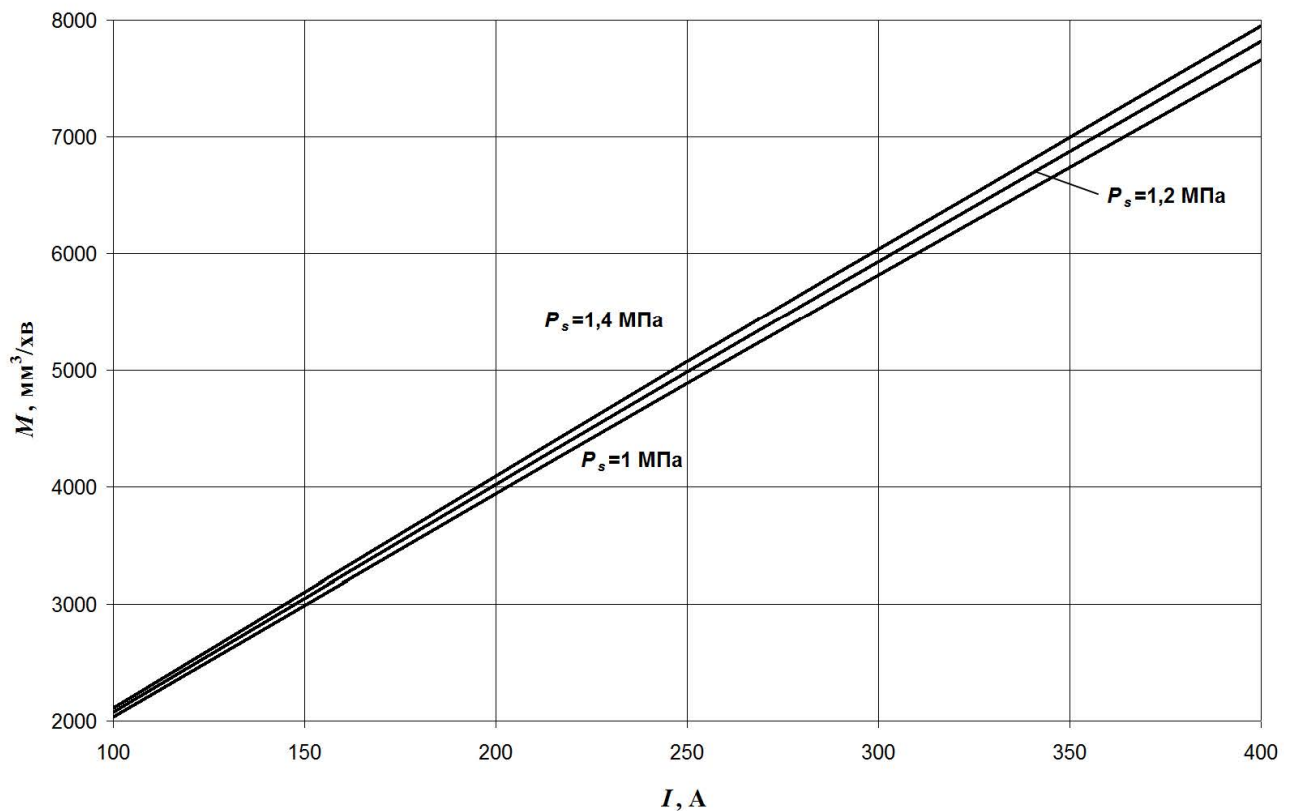


Рис. 3.2. Залежність продуктивності процесу M від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s ($h=0,5\text{мм}$)

Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

Таблиця 3.4

Regression Summary for Dependent Variable: LogM (Spreadsheet1.sta)						
R= ,96913126 R²= ,93921541 Adjusted R²= ,93128698 F(3,23)=118,46 p<,00000 Std.Error of estimate: ,06437						
N=27	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(23)	p-value
Intercept			1,426936	0,117349	12,15975	0,000000
LogI	0,956771	0,051408	0,922209	0,049551	18,61124	0,000000
LogPs	0,109564	0,051408	0,442042	0,207409	2,13126	0,043977
Logh	0,108626	0,051408	0,132872	0,062883	2,11300	0,045662

Рівняння регресії згідно значень БЕТА:

$$y(M) = 4643,776 + 2531,235 x_1 + 327,222 x_2 + 191,269 x_3, \quad (3.1)$$

Відповідно, математична модель в функції трьох факторів, mm^3/hV :

$$M = 26,726 \cdot I^{0,957} \cdot P_s^{0,11} \cdot h^{0,109}, \quad (3.2)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.5

ANOVA; Var.:LogM; R-sqr=.93922; Adj.:.93129 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=.0041433 DV: LogM: =Log10(M)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)LogI L	1,435161	1	1,435161	346,3783	0,000000
(2)LogPs L	0,018820	1	0,018820	4,5423	0,043977
(3)Logh L	0,018499	1	0,018499	4,4648	0,045662
Error	0,095297	23	0,004143		
Total SS	1,567777	26			

Таблиця 3.6

Effect Estimates; Var.:LogM; R-sqr=.93922; Adj.:.93129 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=.0041433 DV: LogM: =Log10(M)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	3,572964	0,012566	284,3286	0,000000	3,546968	3,598959	3,572964	0,012566	3,546968	3,598959
(1)LogI(L)	0,555225	0,029833	18,6112	0,000000	0,493511	0,616939	0,277613	0,014916	0,246756	0,308469
(2)LogPs(L)	0,064595	0,030308	2,1313	0,043977	0,001897	0,127292	0,032297	0,015154	0,000949	0,063646
(3)Logh(L)	0,063396	0,030003	2,1130	0,045662	0,001331	0,125461	0,031698	0,015001	0,000665	0,062731

Аналіз математичної моделі

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

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s , третім – величина робочого пояса ЕІ h . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при збільшені (зменшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h продуктивність процесу РОД M збільшується (зменшується). В рамках експерименту продуктивність процесу РОД M змінюється в межах від 2000 до 8000 мм³/хв.

3.1.3. Шорсткість обробленої поверхні

Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

Таблиця 3.7

Regr. Coefficients; Var.:LogRa; R-sqr=.9871; Adj.:.98542 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=.0004462 DV: LogRa: =Log10(Ra)						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,651257	0,038509	16,91169	0,000000	0,571595	0,730920
(1)LogI(L)	0,125687	0,016261	7,72949	0,000000	0,092049	0,159325
(2)LogPs(L)	-0,362313	0,068063	-5,32316	0,000021	-0,503113	-0,221513
(3)Logh(L)	0,843932	0,020636	40,89677	0,000000	0,801244	0,886620

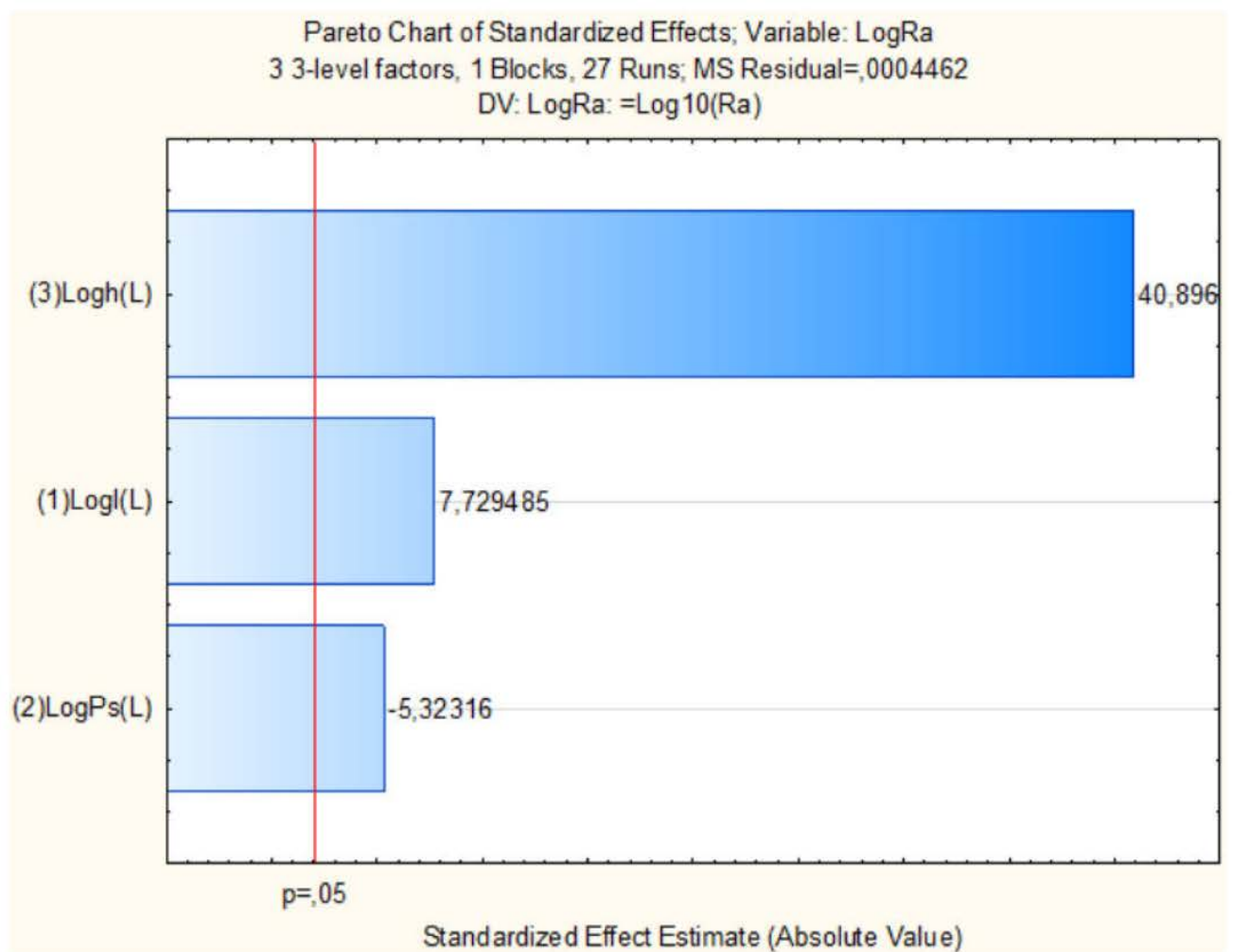


Рис. 3.3. Карта Порето

Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

Таблиця 3.8

Regression Summary for Dependent Variable: LogRa (Spreadsheet1.sta)						
R= ,99353154 R²= ,98710493 Adjusted R²= ,98542296 F(3,23)=586,88 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,02112						
N=27	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(23)	p-value
Intercept			0,651257	0,038509	16,91169	0,000000
Logl	0,183020	0,023678	0,125687	0,016261	7,72949	0,000000
LogPs	-0,126043	0,023678	-0,362313	0,068063	-5,32316	0,000021
Logh	0,968360	0,023678	0,843932	0,020636	40,89677	0,000000

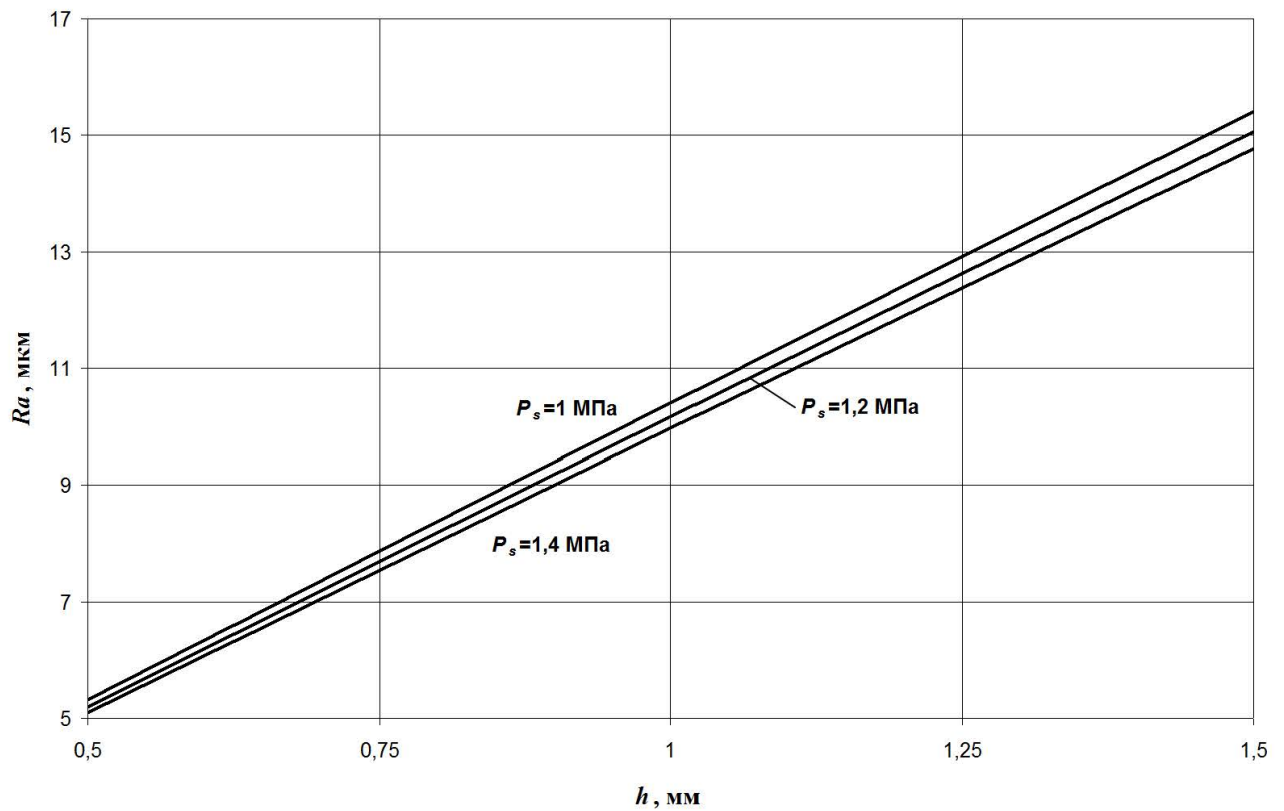


Рис. 3.4. Залежність шорсткості поверхні Ra від величини робочого пояса h та статичного тиску робочої рідини P_s ($I=100A$)

Рівняння регресії згідно значень БЕТТА:

$$y(Ra) = 8,215 + 0,65x_1 - 0,417 x_2 + 3,633x_3, \quad (3.3)$$

Відповідно, математична модель в функції трьох факторів, мкм:

$$Ra = 4,48 \cdot I^{0,183} \cdot P_s^{-0,126} \cdot h^{0,968}, \quad (3.4)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.9

ANOVA: Var.:LogRa; R-sqr=.9871; Adj.:98542 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0004462 DV: LogRa: =Log10(Ra)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)LogI L	0,026658	1	0,026658	59,745	0,000000
(2)LogPs L	0,012643	1	0,012643	28,336	0,000021
(3)Logh L	0,746276	1	0,746276	1672,546	0,000000
Error	0,010262	23	0,000446		
Total SS	0,795840	26			

Таблиця 3.10

Factor	Effect Estimates; Var.:LogRa; R-sqr=.9871; Adj.:98542 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=.0004462 DV: LogRa: =Log10(Ra)									
	Effect	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	0,861275	0,004124	208,8565	0,000000	0,852744	0,869806	0,861275	0,004124	0,852744	0,869806
(1)Logl(L)	0,075671	0,009790	7,7295	0,000000	0,055419	0,095923	0,037836	0,004895	0,027710	0,047962
(2)LogPs(L)	-0,052944	0,009946	-5,3232	0,000021	-0,073519	-0,032369	-0,026472	0,004973	-0,036759	-0,016185
(3)Logh(L)	0,402658	0,009846	40,8968	0,000000	0,382290	0,423025	0,201329	0,004923	0,191145	0,211513

Аналіз математичної моделі

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

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I , третім – статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h шорсткості поверхні Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткості поверхні Ra змінюється в межах від 5 до 15,5 мкм.

3.1.4. Відносний лінійний знос EI

Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

Таблиця 3.11

Factor	Regr. Coefficients; Var.:LogY _n ; R-sqr=.99997; Adj.:99996 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=.0000009 DV: LogY _n : =Log10(g)					
	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-1,88765	0,001775	-1063,19	0,00	-1,89133	-1,88398
(1)Logl(L)	0,46662	0,000750	622,41	0,00	0,46507	0,46817
(2)LogPs(L)	-0,62677	0,003138	-199,73	0,00	-0,63326	-0,62027
(3)Logh(L)	0,47277	0,000951	496,93	0,00	0,47081	0,47474

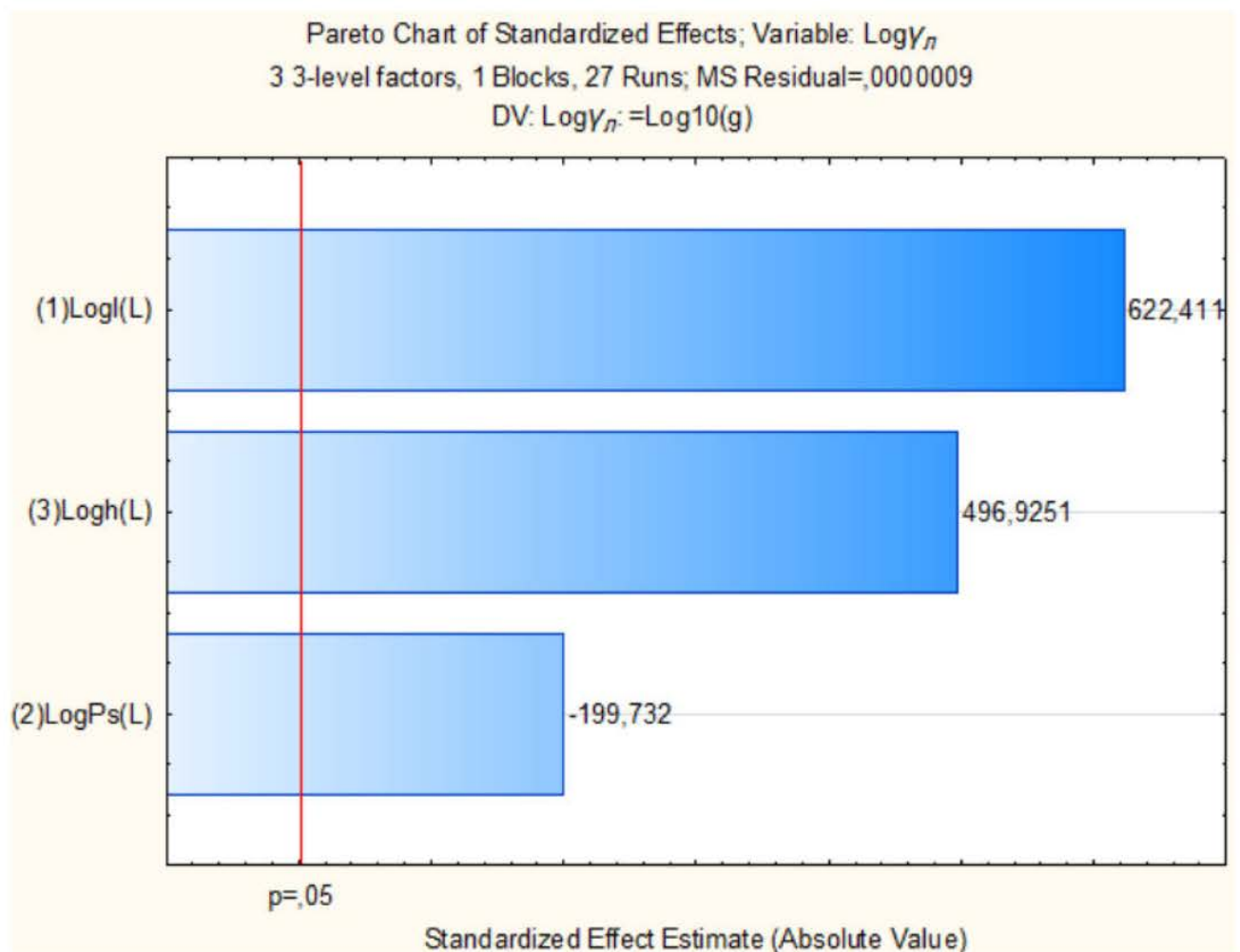


Рис. 3.5. Карта Порето

Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

Таблиця 3.12

Regression Summary for Dependent Variable: $\text{Log}Y_n$ (Spreadsheet1.sta)						
R= ,99998294 R ² = ,99996589 Adjusted R ² = ,99996144 F(3,23)=2247E2 p<0,0000 Std.Error of estimate: ,00097						
N=27	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(23)	p-value
Intercept			-1,88765	0,001775	-1063,19	0,000000
Logl	0,757999	0,001218	0,46662	0,000750	622,41	0,000000
LogPs	-0,243241	0,001218	-0,62677	0,003138	-199,73	0,000000
Logh	0,605176	0,001218	0,47277	0,000951	496,93	0,000000

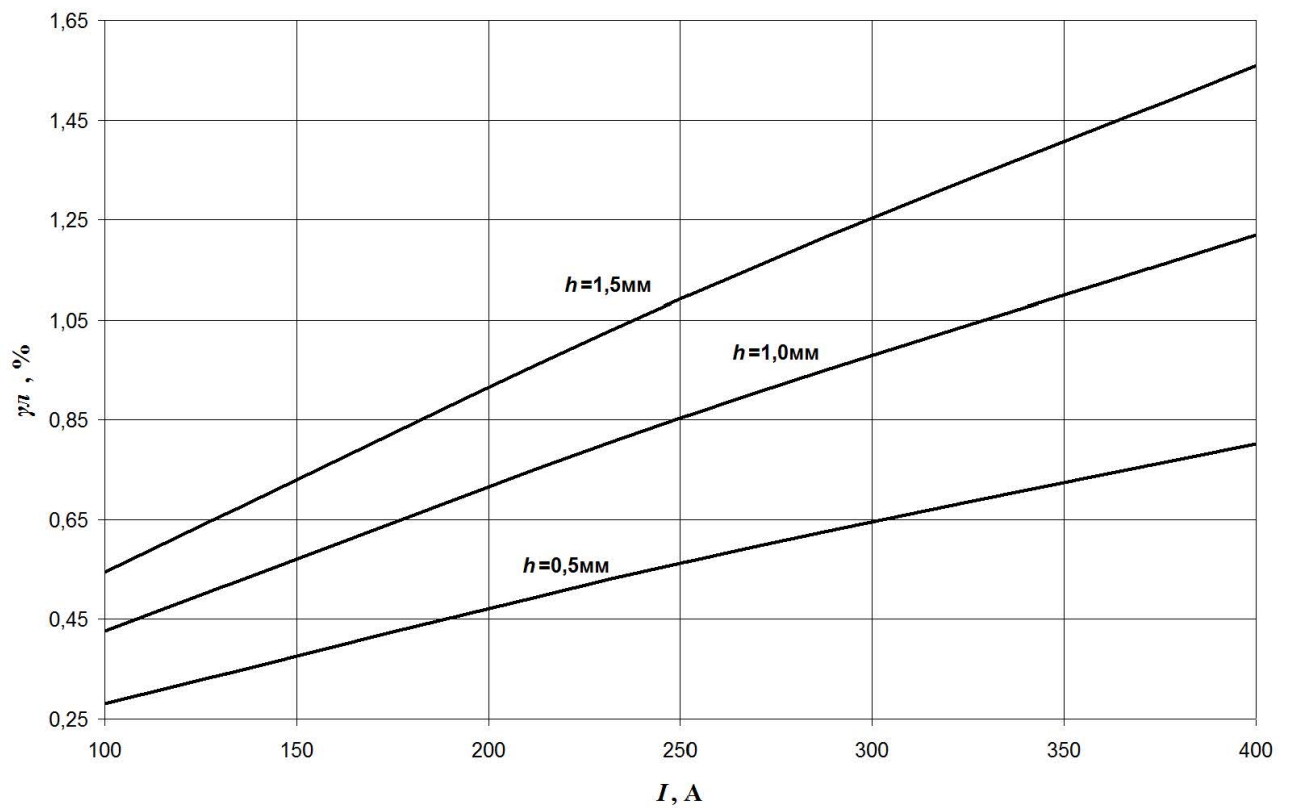


Рис. 3.6. Залежність відносного лінійного зносу ЕІ γ_l від сили технологічного струму I та статичного тиску робочої рідини P_s

Рівняння регресії згідно значень БЕТТА:

$$y(\gamma_l) = 0,145 + 0,044x_1 - 0,015x_2 + 0,036x_3, \quad (3.5)$$

Відповідно, математична модель в функції трьох факторів, %:

$$\gamma_l = 0,013 \cdot I^{0,758} \cdot P_s^{-0,243} \cdot h^{0,605}, \quad (3.6)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.13

ANOVA; Var.: Log γ_l ; R-sqr=,99997; Adj,99996 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0000009 DV: Log γ_l : =Log10(g)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)LogI L	0,367422	1	0,367422	387396,3	0,00
(2)LogPs L	0,037836	1	0,037836	39892,7	0,00
(3)Logh L	0,234202	1	0,234202	246934,6	0,00
Error	0,000022	23	0,000001		
Total SS	0,639482	26			

Таблиця 3.14

Factor	Effect Estimates; Var.:Log γ_L ; R-sqr=,99997; Adj,99996 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0000009 DV: Log γ_L : =Log10(g)									
	Effect	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-0,889280	0,000190	-4677,36	0,00	-0,889673	-0,888887	-0,889280	0,000190	-0,889673	-0,888887
(1)Logl(L)	0,280932	0,000451	622,41	0,00	0,279998	0,281866	0,140466	0,000226	0,139999	0,140933
(2)LogPs(L)	-0,091588	0,000459	-199,73	0,00	-0,092537	-0,090639	-0,045794	0,000229	-0,046268	-0,045320
(3)Logh(L)	0,225570	0,000454	496,93	0,00	0,224631	0,226509	0,112785	0,000227	0,112316	0,113255

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на відносний лінійний знос $EI \gamma_L$ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшенні (зменшенні) сили технологічного струму I і при зменшенні (збільшенні) статичного тиску робочої рідини P_s , відносний лінійний знос $EI \gamma_L$ збільшується (зменшується). В рамках експерименту відносний лінійний знос $EI \gamma_L$ змінюється в межах від 0,3 до 1,5 %.

3.1.5. Міжелектродний зазор

Аналіз за допомогою модуля Планування експерименту

Таблиця 3.15

Factor	Regr. Coefficients; Var.:Log δ ; R-sqr=,64944; Adj,60371 (Spreadsheet1.sta) 3 3-level factors, 1 Blocks, 27 Runs; MS Residual=,0094709 DV: Log δ : =Log10(d)					
	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-1,06755	0,177419	-6,01713	0,000004	-1,43457	-0,700532
(1)Logl(L)	0,33070	0,074916	4,41430	0,000200	0,17573	0,485676
(2)LogPs(L)	-1,46401	0,313580	-4,66871	0,000106	-2,11270	-0,815325
(3)Logh(L)	-0,10945	0,095072	-1,15127	0,261450	-0,30612	0,087218

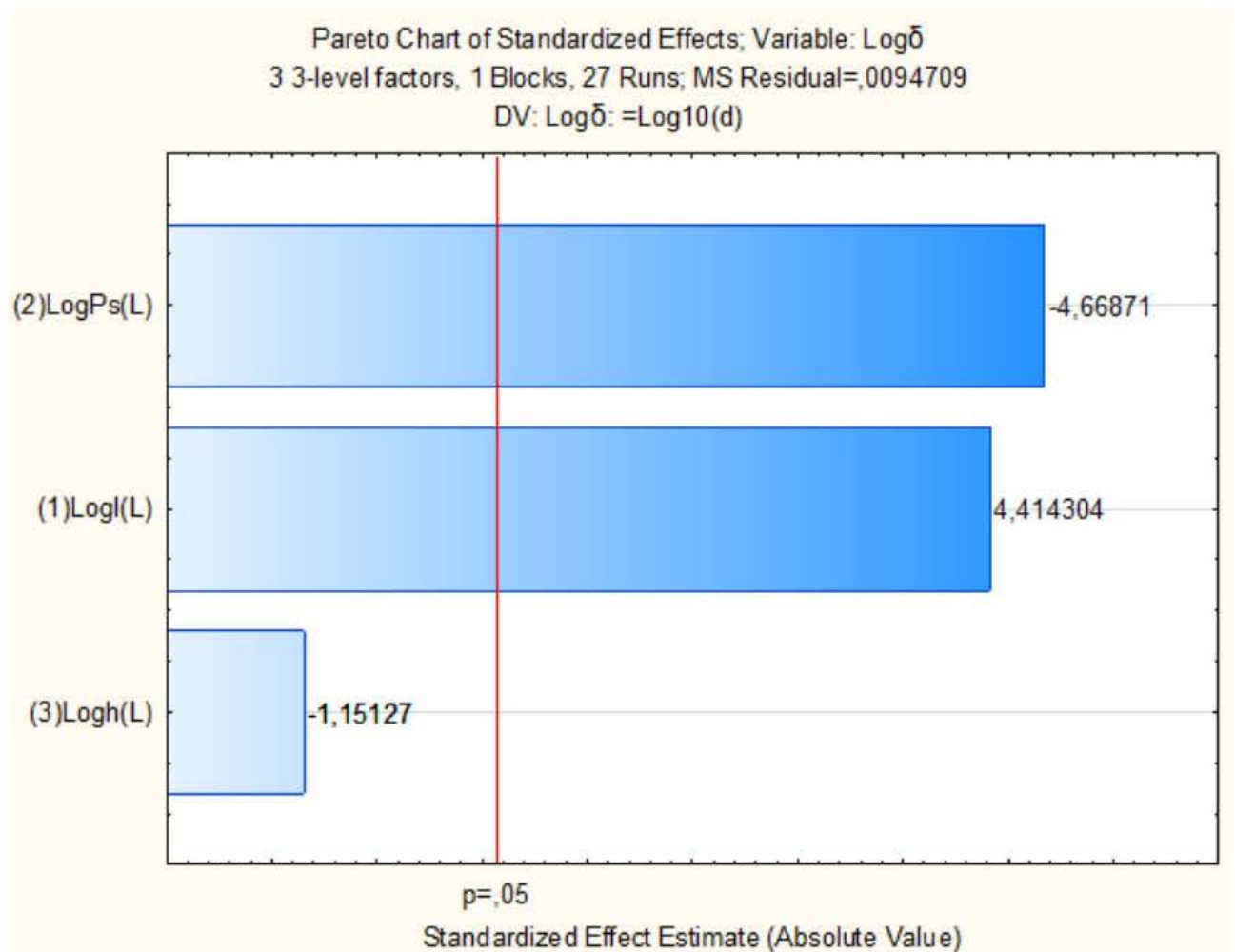


Рис. 3.7. Карта Порето

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

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

Таблиця 3.16

Номер експерименту	X1 (I)	X2 (Ps)	Y2 (δ) мм/мм
1	-	+	0,192
2	0	-	0,5
3	+	-	0,7
4	-	0	0,205
5	-	-	0,3
6	0	0	0,5
7	+	+	0,3
8	0	+	0,246
9	+	0	0,4

Таблиця 3.17

Regr. Coefficients; Var.:Log $\bar{\delta}$; R-sqr=.88178; Adj.84237 (Spreadsheet9.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0058122 DV: Log $\bar{\delta}$: =Log10($\bar{\delta}$)						
Factor	Regressn Coeff.	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-1,46181	0,240674	-6,07384	0,000904	-2,05072	-0,872905
(1)LogI(L)	0,48940	0,101651	4,81452	0,002957	0,24067	0,738131
(2)LogPs(L)	-1,97618	0,425486	-4,64453	0,003524	-3,01731	-0,935058

Розрахунок та оцінка коефіцієнтів регресії в модулі Множинна регресія

Таблиця 3.18

Regression Summary for Dependent Variable: Log $\bar{\delta}$ (Spreadsheet9.sta) R= ,93902954 R?= ,88177648 Adjusted R?= ,84236864 F(2,6)=22,376 p<,00165 Std.Error of estimate: ,07624						
N=9	b*	Std.Err. of b*	b	Std.Err. of b	t(6)	p-value
Intercept			-1,46181	0,240674	-6,07384	0,000904
LogI	0,675818	0,140371	0,48940	0,101651	4,81452	0,002957
LogPs	-0,651956	0,140371	-1,97618	0,425486	-4,64453	0,003524

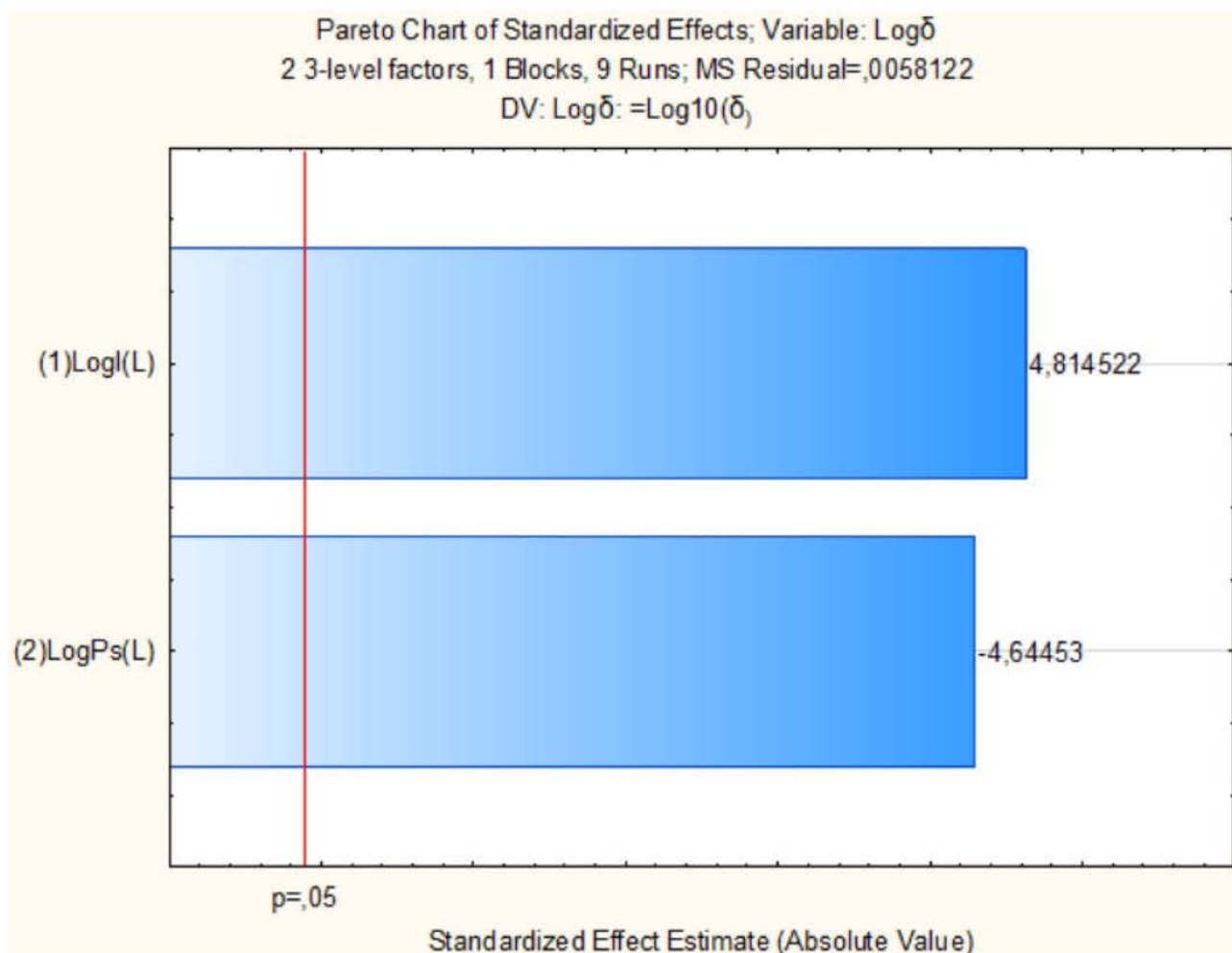


Рис. 3.8. Карта Порето

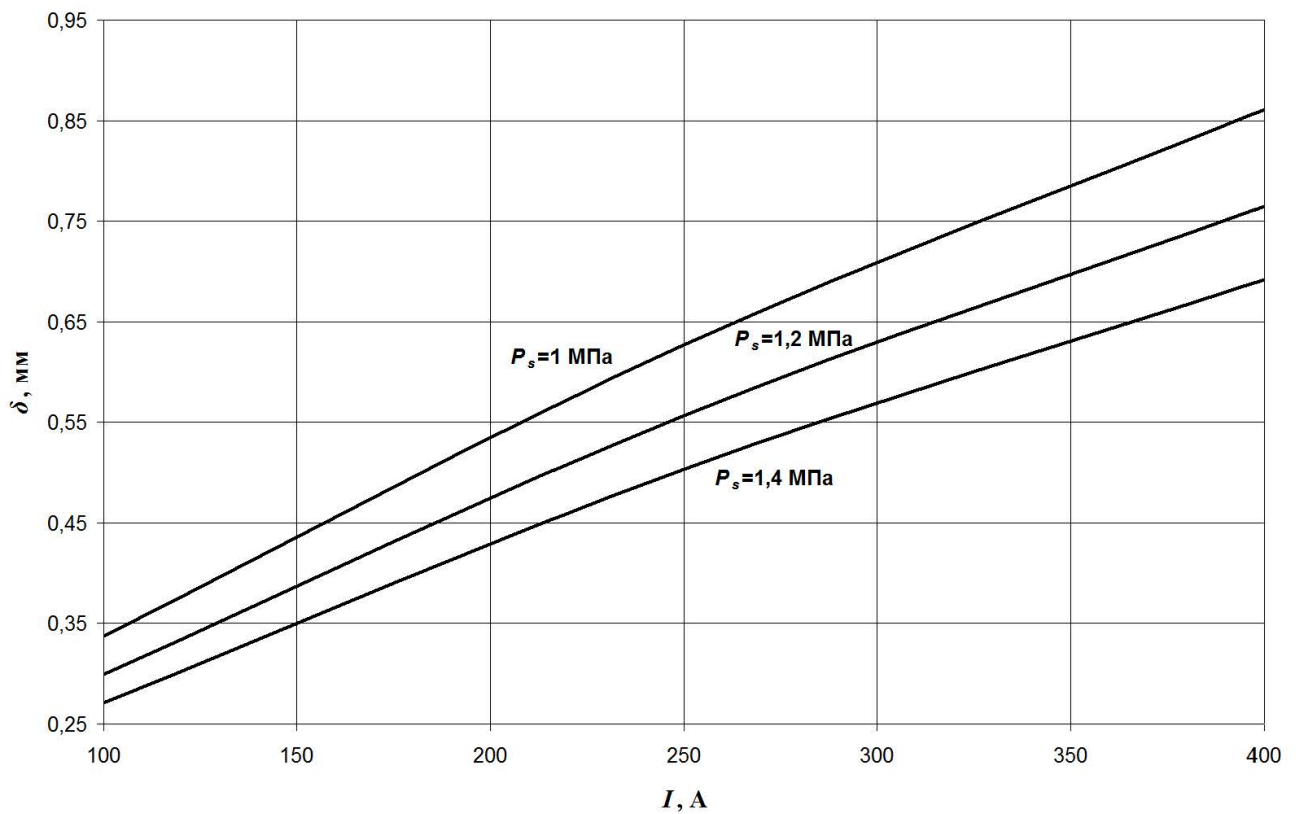


Рис.3.9. Залежність міжелектродного зазору δ від величини робочого пояса

ЕІ h та сили технологічного струму $I(P_s=1,4 \text{ МПа})$

Рівняння регресії згідно значень ВЕТА:

$$y(\delta) = 0,384 + 0,137x_1 - 0,117x_2, \quad (3.7)$$

Відповідно, математична модель в функції двох факторів, мм:

$$\delta = 0,015 \cdot I^{0,676} \cdot P_s^{-0,652}, \quad (3.8)$$

Аналіз дисперсії

Таблиця 3.19

ANOVA: Var.:Log δ ; R-sqr=,88178; Adj.:84237 (Spreadsheet9.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0058122 DV: Log δ : =Log10(δ)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)LogI L	0,134725	1	0,134725	23,17962	0,002957
(2)LogPs L	0,125380	1	0,125380	21,57170	0,003524
Error	0,034873	6	0,005812		
Total SS	0,294978	8			

Таблиця 3.20

Factor	Effect Estimates; Var.: Log δ ; R-sqr=.88178; Adj.:.84237 (Spreadsheet9.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=.0058122 DV: Log δ : =Log10(δ)									
	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-0,480076	0,025639	-18,7247	0,000001	-0,542812	-0,417341	-0,480076	0,025639	-0,542812	-0,417341
(1)LogI(L)	0,294648	0,061200	4,8145	0,002957	0,144897	0,444399	0,147324	0,030600	0,072449	0,222199
(2)LogPs(L)	-0,288776	0,062175	-4,6445	0,003524	-0,440914	-0,136638	-0,144388	0,031088	-0,220457	-0,068319

Аналіз математичної моделі

Найбільш впливовим фактором на величину МЕЗ δ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є висота робочого пояса графітового ЕІ h , третім – статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h міжелектродний зазор δ збільшується (зменшується). В рамках експерименту МЕЗ δ змінюється в межах від 0,25 до 0,9 мм.

3.2. Висновки

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

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s , третім – величина робочого пояса ЕІ h . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при збільшені (зменшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h продуктивність процесу РОД M збільшується (зменшується). В рамках експерименту продуктивність M процесу РОД пуансона змінюється в межах від 2000 до 8000 мм³/хв.

3.2.2. Отримано математичну модель шорсткості поверхні Ra . Показано, що найбільш впливовим фактором на шорсткості поверхні Ra є величина робочого пояса ЕІ h .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I , третім – статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояска h шорсткості поверхні Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткості поверхні Ra змінюється в межах від 5 до 15,5 мкм.

3.2.3. Отримано математичну модель відносного лінійного зносу ЕІ γ_n . Показано, що найбільш впливовим фактором на відносний лінійний знос ЕІ γ_n є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s , відносний лінійний знос ЕІ γ_n збільшується (зменшується). В рамках експерименту відносний лінійний знос ЕІ γ_n змінюється в межах від 0,3 до 1,5 %.

3.2.4. Отримано математичну модель МЕЗ δ . Показано, що найбільш впливовим фактором на величину МЕЗ δ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є висота робочого пояска графітового ЕІ h , третім – статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояска h міжелектродного зазору δ збільшується (зменшується). В рамках експерименту величина МЕЗ δ змінюється в межах від 0,25 до 0,9 мм.

Розділ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РОД

З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК

4.1. Призначення і область застосування

Електроерозійна прошивна головка до настільного свердлувального верстата призначена для прошивання наскрізних та глухих отворів різних поперечних перерізів, для виготовлення фасонних стержнів та порожнин в деталях з будь-яких металів і сплавів, зокрема загартованих сталей і твердих сплавів, а також для випалювання залишків поламаного інструменту. Вона значно розширює технологічні можливості свердлувального верстату, перетворюючи його за 5 хвилин наладки в електроерозійний верстат, а, при необхідності, за ті ж 5 хвилин знову в свердлувальний. Для цього свердло замінюється на електроерозійну головку.

Головка знаходить застосування в ремонтних майстернях, інструментальних цехах, а в ряді випадків і в основному виробництві для виготовлення серійних деталей.

Таблиця 4.1. Технічна характеристика

Найбільший поперечний розмір електрода, мм	40
Найбільша глибина прошивання, мм	
– без перестановки головки.	40
– з перестановкою головки	80
Джерело живлення технологічним струмом	зварювальні випрямлячі струм до 300 А
Джерело живлення робочої рідини.	гідростанція або водопровідна мережа тиском >0,3МПа
Швидкість прошивання, мм/хв	до 20

4.2. Опис установки

Установка складається із свердлувального настільного верстату, власне головки, джерела живлення технологічним струмом (яким є звичайний зварювальний випрямляч, можна трансформатор), джерела живлення робочою рідиною (гідростанції або, найпростіше, водопровідна мережа тиском $> 0,3\text{МПа}$) та комплекту універсальних пристроїв.

Установка включає в себе свердлувальний верстат 1 (рис.4.1), в якому замість свердла закріплюють електроерозійну головку 2. Джерелом живлення електричним струмом є випрямляч 3, один полюс якого з'єднують з головкою, а другий зі столом свердлувального верстата. Вода від водопровідної мережі 4 надходить до електроерозійної головки, а після головки іде на злив 5.

В залежності від умов замовника (покращення зручностей в експлуатації, відсутність водопровідної мережі з необхідними показниками тиску води, необхідність підвищення якості обробки та зменшення зносу електрода і т.і.) головка може комплектуватись по спецзамовленню пультом керування та станцією робочої рідини з використанням певного виду робочої рідини, наприклад масла індустріального.

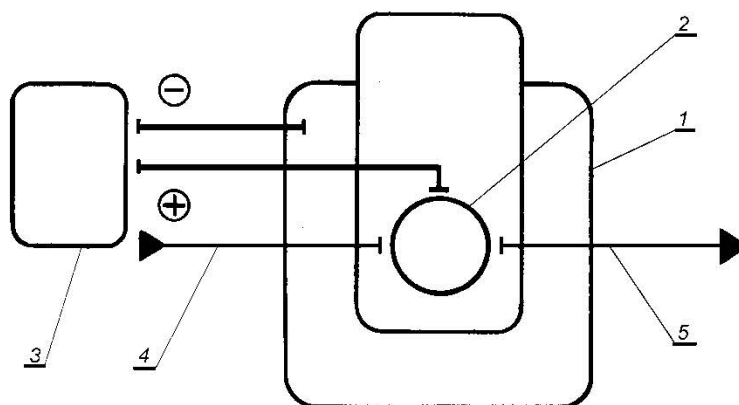


Рис. 4.1. Принципова схема підключення ЕЕГ

Інструментом є електроди відповідних форм та розмірів, що закріплюються в електроерозійній головці.

Робота установки полягає в наступному. Спочатку застопорюють шпиндель верстата від обертання. Потім монтують головку з електродом, підключаючи її до джерел живлення електричним струмом та робочої рідини згідно наведеної схеми. Далі закріплюють на столі верстата деталь. Головку опускають донизу до стискання її з деталлю, герметизуючи зону обробки. Електрод при цьому знаходиться на відстані декількох міліметрів від деталі. Потім пускають робочу рідину. Вмикають електричний струм. Подають шпиндель верстата, а значить і електрод (як і при свердлуванні) донизу. Починається процес обробки. надалі не треба допускати коротких замикань. Це не важко, оскільки, як і при свердлуванні, добре відчутним є протитиск на шпиндель і, відповідно, на ручку подачі шпинделя. По закінченні процесу спочатку (обов'язково) вимикають струм, потім робочу рідину і лише потім піднімають головку та знімають деталь.

Вказана послідовність роботи є обов'язковою.

4.3. Опис ЕЕГ

Електроерозійна головка складається (рис.4.2) зі шпинделя 4, по якому вільно рухається камера 3 з ущільненням 9. На нижню частину камери нагвинчено ізолятор 2 з ущільненням 1, що герметизує камеру при її притисканні до заготовки чи спеціального пристрою. Шпиндель ізолювано від тримача 8 прокладками 6 і 7. Кріплення головки в верстаті здійснюють за допомогою тримача 8.

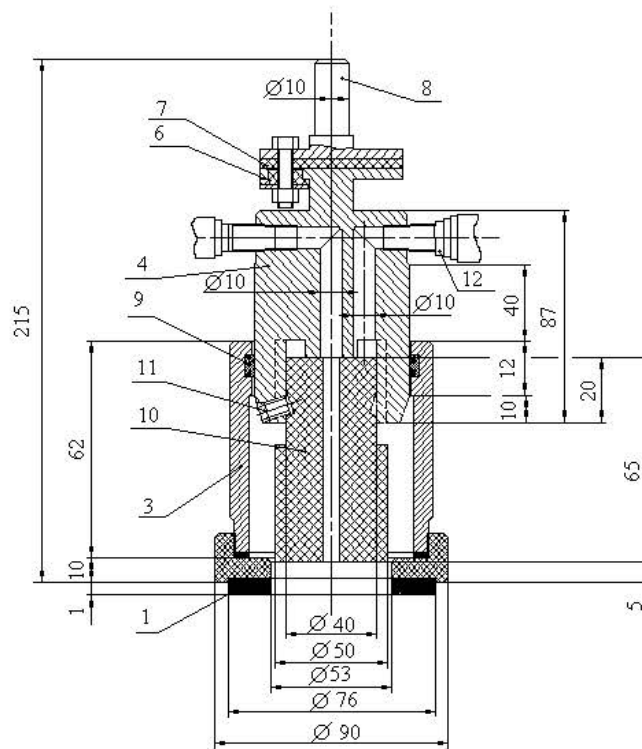


Рис. 4.2. Електроерозійна головка

РОД з використанням ЕЕГ дозволяють реалізувати практично всі розділові операції, що є характерними для листового штампування.

На рисунку 4.3 показано гідравлічну схему установки на базі настільного свердлувального верстату з закріпленою на шпинделі верстату ЕЕГ за умов само подачі ЕІ.

Подача робочої рідини з гідробака 1 здійснюється за допомогою шестеренного насоса 1. Для регулювання необхідного тиску робочої рідини використовують вентиль 3, що скидає надлишковий тиск в гідробак. Величину тиску в системі контролюють за допомогою манометра 4.

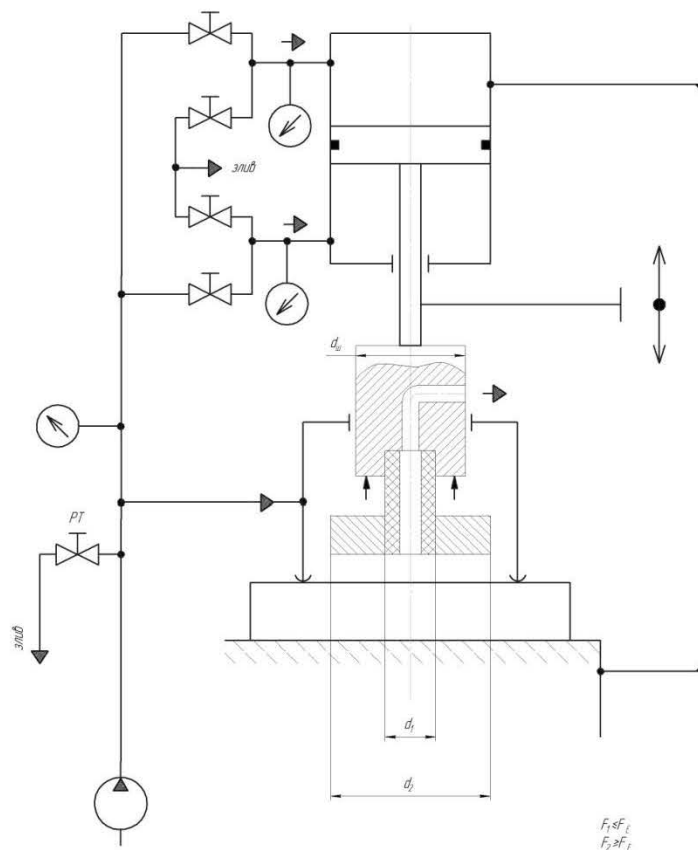


Рис. 4.3. Гідравлічна схема установки

При подачі робочої рідини під тиском в герметизовану камеру ЕЕГ 5 робоча рідина здійснює тиск на шток 6 в якому закріплено ЕІ 7 в наслідок чого збільшується зусилля на ручці подачі шпинделя свердлувального верстату. Для компенсації негативного впливу тиску пропонується на штоку верстату встановити гідроциліндр 8. Для точного регулювання тиску в нижній і верхній порожнині гідроциліндру використовується система вентилів 9. Змінюючи тиск і розхід робочої рідини і в нижній і верхній порожнині гідроциліндра створюють умови для виникнення явища само подачі. Ця умова виникає при умові, що сумарне зусилля від дії тиску робочої рідини на шток ЕЕГ і нижню частину поршня гідроциліндра було менше ніж зусилля, яке виникає від дії тиску робочої рідини на верхню частину поршня гідроциліндра.

4.4. Станція робочої рідини

Традиційна станція робочої рідини до настільного свердлувального верстату для РОД з використанням ЕЕГ має компоновку, що зображено на рис. 4.4.

Недоліком такої станції є те, що шестеренний насос 2 разом з асинхронним електродвигун 1 і конструктивно встановлені у верхній частині гідробака 3 з робочою рідиною із суміші мастило-індустріальне та освітлювального гасу. Конструктивні особливості такої станції робочої рідини спричиняють появу значних гідродинамічних опорів в середині всмоктуючого трубопроводу [15], при цьому знижується продуктивність насоса. Практичні дослідження виявили зниження продуктивності насоса в 3-4 рази. Це спричиняє недостатньої витрати робочої рідини в МЕЗ, впливає на роботу допоміжних гідравлічних систем, та знижує стійкість процесу РОД.

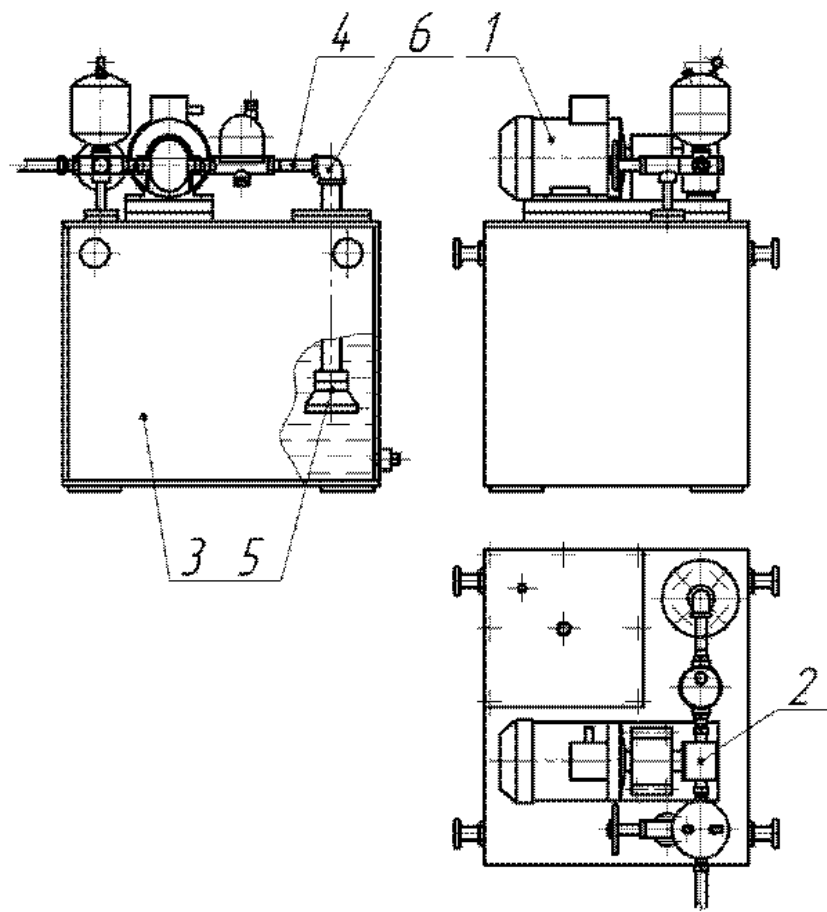


Рис. 4.4. Станція робочої рідини до електроерозійної головки

У відповідності до вимог з встановлення такого типу насосів в всмоктувальній гідролінії необхідно забезпечувати швидкість течії робочої рідини на вході в насос не більше 1,5 м/с, а довжина такої гідролінії повинна бути по можливості короткою, з мінімальною кількістю згинів. Рівень робочої рідини в гідробаку повинен бути вищим за вхідний отвір насоса на 150 мм. Бажано мати бак закритого типу з надлишковим тиском 0,02 МПа [16].

У відповідності до таких вимог насос необхідно встановити на рівні дна гідробака.

Встановлення насоса в нижню частину гідробака (рис. 4.5) дозволило забезпечити продуктивність насоса у відповідності до його паспортних характеристик.

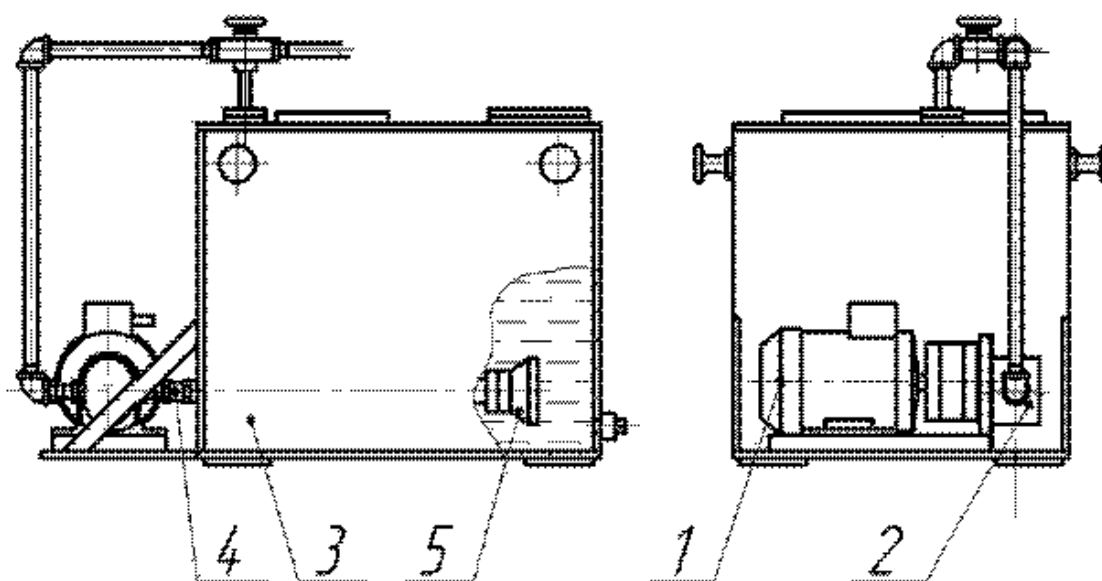


Рис. 4.5. Станція робочої рідини до електроерозійної головки з нижнім розташуванням насоса

Така конструкція станція робочої рідини може бути використана для дослідної установки. Проте не є оптимальною для комерційного використання. Враховуючи те, що дана станція робочої рідини пропонується для використання у поєднанні з настільним свердлувальним верстаком, який встановлюють на стіл або спеціальну тумбу (як наприклад рис. 4.6), необхідна площа під установку буде збільшена майже у двічі.



Рис. 4.6. Настільний свердлувальний станок встановлений на тумбу

Для економії необхідної площі під обладнання збільшення комерційної використання привабливості пропонуємо станцію робочої рідини виготовляти у формі тумби (рис. 4.7) для встановлення на неї настільного свердлувального верстату.

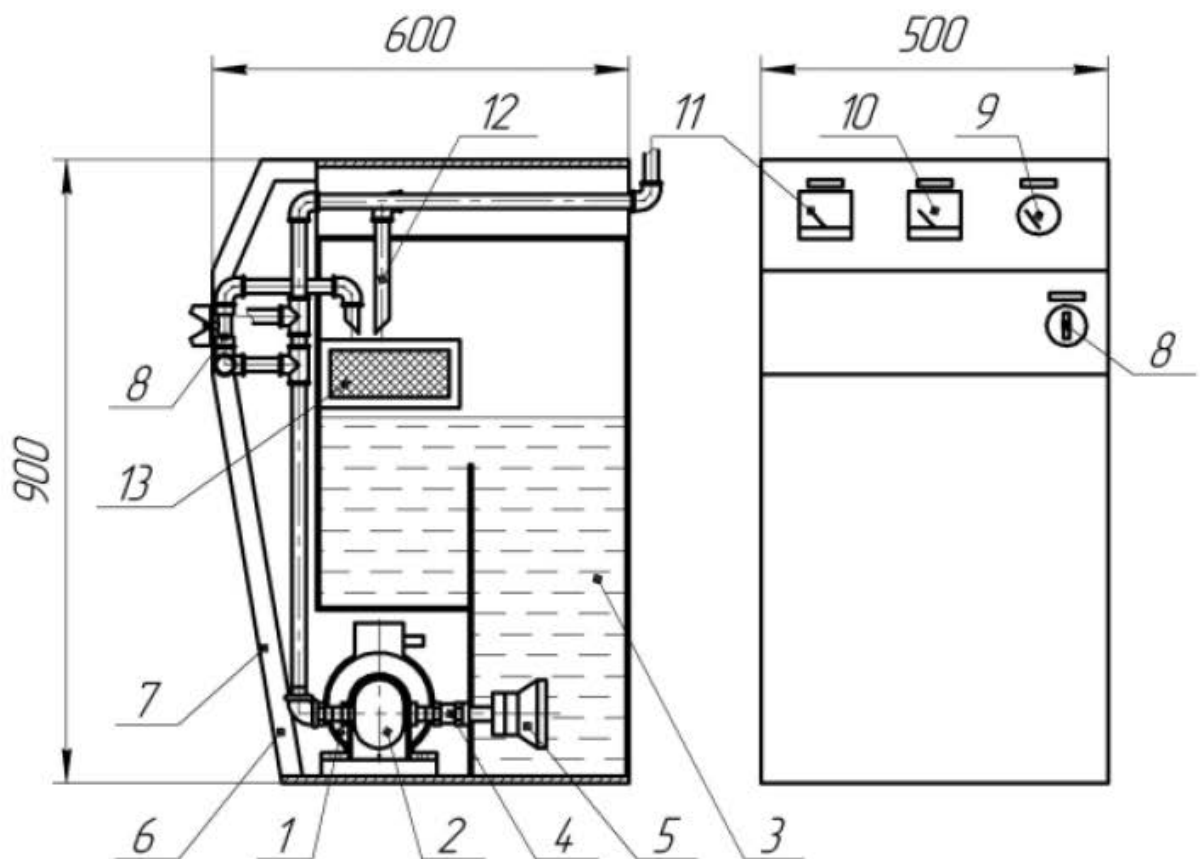


Рис. 4.7. Запропонована станція робочої рідини

Запропонована станція робочої рідини складається з каркасу 6, який виготовляють з сортового прокату у вигляді кутика, зовні каркас обшивають,

наприклад, листовим металом або вогнетривким, стійким до нафтопродуктів пластиком. В середині такого каркасу монтують гідробак 3 з електродвигуном 1 та насосом 2. В нижній частині гідробак має різьбовий отвір для під'єднання всмоктувального трубопроводу з фільтруючим елементом 5. Для можливості демонтажу насосу, наприклад для обслуговування, між насосом і всмоктувальним трубопроводом встановлюють шарів запірний вентиль 4. При увімкненні установки робоча рідина з насоса під тиском подається по напірному трубопроводу 7 до ЕЕГ і допоміжних гідравлічних систем установки. На зовнішній панелі керування станції робочої рідини встановлено вентиль 8 для регулювання тиску робочої рідини в напірному трубопроводі.

Візуальний контроль за величиною тиску робочої рідини здійснюють на контрольній панелі за допомогою манометра 9. Для контролю за напругою та струмом на панелі встановлюють покажчикі величини напруги 10 і струму 11.

Відпрацьована робоча рідина з електроерозійної головки разом з продуктами ерозії по трубопроводу 12 потрапляє в бак через сітчастий фільтруючий елемент 13.

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

При подачі робочої рідини під тиском в герметизовану камеру ЕЕГ на штоку верстата виникають зусилля, які направлені в протилежну сторону від руху електрод-інструмента при обробці. У зв'язку з тим, що в установці використовують настільний свердлувальний верста, то привод руху електрод-інструмента є ручним. Як наслідок, виникає потреба у застосуванні значних зусиль для переміщення штока верстата при обробці.

Для компенсації зусиль, які виникають на штоку верстата від дій тиску робочої рідини та, відповідно, покращення умов праці робітників необхідно на шток верстату встановити гідроциліндр, що створюватиме протитиск.

Живлення гідроциліндра пропонується від станції робочої рідини, що живить ЕЕГ. Гідравлічна схема такої установка показана на рисунку 4.3.

Така конструкція установки вимагає періодичного регулювання параметрів витрат робочої рідини та тиску в, що подають в гідроциліндр, при зміні параметрів обробки (тиску робочої рідини, геометрії електрод-інструмента). Для усунення цього недоліку в заміні вентилів, які регулюють тиск та витрати робочої рідини, що подається в гідроциліндр встановити регулятор тиску із зворотнім зв'язком. Такий регулятор тиску дозволить автоматично змінювати параметри робочої рідини, яка подається в гідроциліндр, в залежності від умов обробки.

4.5. Висновки

4.5.1. Удосконалено конструкцію станції робочої рідини до настільного свердлувального верстату для РОД з використанням ЕЕГ, що дозволяє забезпечити необхідні показники продуктивності шестеренного насоса, зокрема, і станції робочої рідини в цілому.

4.5.2. Запропоновано нову конструкцію станції робочої рідини у вигляді тумби, або підставки на яку встановлюють настільний свердлувальний верстат, що дозволяє зменшити габаритні розміри установки та покращити її комерційну привабливість.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНИХ ГОЛОВОК

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

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

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

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

- річний об'єм виробництва шліцьових з'єднань способами механічної обробки становить 17 450 шт/рік.

Вихідні дані для подальшого розрахунку наведені і табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Вихідні дані

№ п/п	Найменування показників	Умовні позначення	Одиниці виміру	Варіанти	
				базовий	проектний
1	Річна програма випуску	n	шт/рік	17450	17450
2	Середня трудомісткість обробки	t	хв/шт	13,8	3,7
	- стержень				
	- отвір	t	год/шт	0,230	0,062
	- отвір				
3	Вартість обробки одного шліцьового з'єднання	T	грн/шт	60	40
4	Дійсний фонд часу обладнання при однозмінній роботі	F	год	2008	2008
5	Вартість обладнання	K	грн	185550+800000	980 000
6	Виробнича площа, що займає одиниця обладнання	S	м ²	1,527+2,413	16
7	Коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу на одну одиницю обладнання	κ_o	-	1,1	1,1
8	Вартість 1 м ² виробничої площі	Π_n	грн/м ²	4500	4500
9	Сумарна потужність двигунів та джерел живлення	N	кВт	4+3,7=7,7	25+5=30
10	Коефіцієнт використання потужності обладнання	κ_n	-	0,9	0,7
11	Вартість однієї кВт/год електроенергії	Π_e	грн	1,81	1,81
12	Річна норма амортизаційних відрахувань	a_a	%	11,48	11,48
13	Річна норма відрахувань на утримання та поточний ремонт обладнання	a_y	%	3,64	3,64
14	Річна норма відрахувань на ремонт, амортизацію та утримання виробничої площі	a_n	%	2,4	2,4
15	Коефіцієнт, що ураховує додаткову заробітну плату	K_{oz}	-	1,089	1,089
16	Коефіцієнт завантаження обладнання	κ_{zo}	-	0,75	0,75
17	Сума витрат на НДР	$E_{НДР}$	грн	-	120 000

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

Таблиця 5.2

Розрахунок суми капітальних вкладень у виробництво

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

Для подальшого розрахунку собівартості одиниці продукції попередньо треба визначитися: з заробітною платою C_{zn} ; амортизацією, утриманням та ремонтом обладнання C_{am} ; вартістю електроенергії C_e ; ремонтом та утриманням виробничою площею $C_{пл}$. Дані показники є складовими частинами собівартості одиниці продукції, розрахунок якої наведено у табл. 5.3

Таблиця 5.3

Розрахунок собівартості одиниці продукції

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

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

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

При цьому коефіцієнт ефективності НДР:

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

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Показано, що спосіб РОД з ЕЕГ для виготовлення деталей складного профілю, з важкооброблюваних матеріалів, забезпечує необхідну якість і продуктивність обробки та можливість отримання готових деталей, з необхідними показниками якості і точність обробки і є високоефективною альтернативою традиційним технологіям.

2. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень РОД з ЕЕГ.

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

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

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s , третім – величина робочого пояса ЕІ h . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при збільшені (зменшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h продуктивність процесу РОД M збільшується (зменшується). В рамках експерименту продуктивність M процесу РОД пуансона змінюється в межах від 2000 до 8000 мм³/хв.

5. Отримано математичну модель шорсткості поверхні Ra . Показано, що найбільш впливовим фактором на шорсткості поверхні Ra є величина робочого пояса ЕІ h .

Другим по степеню впливу є сила технологічного струму I , третім – статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h шорсткості поверхні Ra збільшується (зменшується). В рамках експерименту шорсткості поверхні Ra змінюється в межах від 5 до 15,5 мкм.

6. Отримано математичну модель відносного лінійного зносу ЕІ γ_n . Показано, що найбільш впливовим фактором на відносний лінійний знос ЕІ γ_n є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s , відносний лінійний знос ЕІ γ_n збільшується (зменшується). В рамках експерименту відносний лінійний знос ЕІ γ_n змінюється в межах від 0,3 до 1,5 %.

7. Отримано математичну модель МЕЗ δ . Показано, що найбільш впливовим фактором на величину МЕЗ δ є сила технологічного струму I .

Другим по степеню впливу є висота робочого пояса графітового ЕІ h , третім – статичний тиск робочої рідини P_s . При збільшені (зменшені) сили технологічного струму I і при зменшені (збільшені) статичного тиску робочої рідини P_s , а також збільшені (зменшені) величині робочого пояса h міжелектродного зазору δ збільшується (зменшується). В рамках експерименту величина МЕЗ δ змінюється в межах від 0,25 до 0,9 мм.

8. Удосконалено конструкцію станції робочої рідини до настільного свердлувального верстату для РОД з використанням ЕЕГ, що дозволяє забезпечити необхідні показники продуктивності шестеренного насоса, зокрема, і станції робочої рідини в цілому.

9. Запропоновано нову конструкцію станції робочої рідини у вигляді тумби, або підставки на яку встановлюють настільний свердлувальний верстат, що дозволяє зменшити габаритні розміри установки та покращити її комерційну привабливість.

10. Основні результати роботи доповідались на науково-практичній конференції студентів ЦНТУ у 2022 році.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Носуленко В.І., Шмельов В.М. Розмірна обробка металів електричною дугою // Навчальний посібник ПП „Експлозив-Систем”, Кропивницький, 2017.
2. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Авториф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТТУ „КІП”. – Київ, 1999. – 36 с
3. Ресурси Інтернету: <https://danube.pto.org.ua/index.php/component/k2/item/112-tema-2-2-zvaryvalna-duga>
4. Ресурси Інтернету: <https://studfile.net/preview/9394102/page:18/#53>
5. Фотеев Н. К. «Высокоустойчивые штампы» М. Машиностроение 1965
6. Альберт М. Высокопроизводительная электроэрозионная обработка // В мире производства: передовая зарубежная технология. – 1991. – №1 – С. 48...52.
7. Александров А. Г., Заруба И.И., Пиньковский И. В. Источники питания для дуговой и электрошлаковой сварки: Справочное пособие. – Днепропетровск: Промінь. 1976. – 151с.
8. Боровиков В. П., Боровиков И. П. STATISTICA – статистический анализ и обработка данных в среде Windows – М.: Информационно-издательский дом „Филинь”, 1998. – 608 с.
9. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение: София: Техника, 1980. – 304 с.
10. Солонин Н. С. Математическая статистика в технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 1972.
11. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер. М. – 1987. – 610 с.
12. Плата L-264. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Москва, L-CARD 1997, – 45 с.

13. Охрана труда в машиностроении : Т.1.,2 : Сб. норм.-техн. документов / Сост. А.И.Шуминов. - М: Машиностроение, 1990. - 383 с. , 349с
14. Охрана труда и техника безопасности на предприятии: Информационный обзор. - Дн-ск: Укрметаллургинформ, 2005. - 175 с.
15. Башта Т.Н. Машиностроительная гидравлика. – М. Машиностроение. 1971.
16. Ресурсы Интернета: http://www.agrovodcom.ru/pump_obyem/nmsh4.php

ДОДАТКИ



Довідка *взята від 07.11.2022р*

Видана студенту групи ПМ(ОТ)-21М1,4 В. Суріну про те, що він брав участь у LVI науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти приуроченій Дню науки – 2022 з доповіддю на тему «Особливості гідравлічної схеми для електроерозійних головок РОД» (секція обробки металів тиском та спецтехнологій). За цією темою опубліковані тези доповідей у збірнику «Наука виробництву, 2022», С. 48-49.

Керівник МОВ

Олексій СМІРНОВ