

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет механіко-технологічний
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри ММР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
« ____ » _____ 2024 р.

**ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістрським) рівнем вищої освіти**

**на тему
«Удосконалення виготовлення прес-форм»**

Виконав здобувач II курсу групи ПМ-23Мз-
3
ОПП «Прикладна механіка»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Єдуард ЧОБОТАРЬ
« ____ » _____ 2024 р.

Керівник проекту
доцент, канд.техн.наук
_____ Олег СІСА
« ____ » _____ 2024 р.

Рецензент
_____ Юрій НЕВДАХА
« ____ » _____ 2024 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет: Механіко-технологічний

Кафедра: «Машинобудування, мехатроніка і робототехніка»

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ММР

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

30 серпня 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
Чоботарю Єдуарду Миколайовичу**

1. Тема роботи: «Удосконалення виготовлення прес-форм».

2. Керівник роботи: Сіса Олег Федорович, к. т. н., доцент.

3. Строк подання роботи до захисту: 27 грудня 2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи.

Мета: формування бічної (конічної) поверхні матриці прес-форми способом РОД з рівномірною шорсткістю та підвищеною точністю, за рахунок застосування запропонованої технологічної схеми формоутворення, при якій бічний міжелектродний зазор не утворюється.

Завдання: обґрунтувати технологічну схему формоутворення похилої бічної поверхні матриці прес-форми; розробити методику математичного моделювання технологічних характеристик процесу РОД матриці прес-форми; виконати експериментальне дослідження продуктивності процесу РОД матриці прес-форми; виконати експериментальні дослідження якості та точності процесу РОД матриці прес-форми; виконати розрахунки з економічної частини.

5. Консультант по роботі, із зазначенням розділу роботи:

| Розділ | Консультант | Підпис, дата | |
|--------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|
| | | Завдання видав | Завдання прийняв |
| № 5 «Економічна частина» | Савеленко Г. В., к. т. н., доц. | 2.09.2024 р. | 27.12.2024 р. |

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---|-------------------------------|----------|
| 1 | Опрацювання навчальної та наукової літератури | 16.09.2024 р. | |
| 2 | Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу | 2.10.2024 р. | |
| 3 | Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові | 25.11.2024 р. | |
| 4 | Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту | 16.12.2024 р. | |
| 5 | Перевірка роботи на плагіат | 27.12.2024 р. | |
| 6 | Зовнішнє рецензування роботи | 27.12.2024 р. | |
| 7 | Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії | 30.12.2024 р. | |

Дата видачі завдання
02 вересня 2024 р.

Підпис керівника

_____ О. Сіса

Завдання прийнято до виконання
02 вересня 2024 р.

Підпис здобувача

_____ Є. Чоботарь

Анотація

на випускню кваліфікаційну роботу студента групи ПМ-23Мз-3 Чоботоря Єдуарда Миколайовича зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» на тему: «Удосконалення виготовлення прес-форм».

Випускню кваліфікаційну роботу присвячено проблемі формування бічної (конічної) поверхні матриці прес-форми способом розмірної обробки електричною дугою (РОД) з рівномірною шорсткістю та підвищеною точністю. Ця проблема носить гострий характер так, як при отриманні бічних похилих та конічних поверхонь спостерігається зміна в радіальному напрямку між електродного зазору, внаслідок чого точність формування похилої поверхні знижується.

В роботі, на підставі експериментальних досліджень, отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД бічної конічної поверхні матриці прес-форми в умовах формоутворення без утворення бічного міжелектродного зазору. Удосконалено технологію виготовлення матриці прес-форми шляхом формування бічної поверхні способом РОД з рівномірною шорсткістю та підвищеною точністю, за рахунок застосування запропонованої технологічної схеми формоутворення, при якій бічний міжелектродний зазор не утворюється. Виявлено взаємозв'язок технологічних характеристик процесу РОД з електричним і гідродинамічним режимами обробки та кутом нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента. Отримані математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД матриці прес-форми, дозволяють прогнозувати та оптимізувати режим обробки.

Ключові слова: електрична дуга, електрод-інструмент, технологія, технологічні характеристики, обладнання.

Summary

for the final qualifying work of a student of the PM-23Mz-3 group Chobotorya Yeduarda Mykolayovycha in the specialty 131 "Applied Mechanics" on the topic: "Improvement of the manufacture of molds."

The final qualification work is devoted to the problem of forming the lateral (conical) surface of the mold matrix by the method of dimensional processing by electric arc (abbreviated as DMA) with uniform roughness and increased accuracy. This problem is acute in nature, as when obtaining lateral inclined and conical surfaces, a change in the radial direction between the electrode gap is observed, as a result of which the accuracy of forming the inclined surface decreases.

In the work, based on experimental studies, mathematical models of the technological characteristics of the DMA process of the lateral conical surface of the mold matrix under molding conditions without the formation of a lateral interelectrode gap were obtained. The technology for manufacturing a mold matrix has been improved by forming the side surface using the DMA method with uniform roughness and increased accuracy, due to the use of the proposed technological scheme of forming, in which the lateral interelectrode gap is not formed. The relationship between the technological characteristics of the DMA process with the electrical and hydrodynamic processing modes and the angle of inclination of the generating side surface of the electrode-tool has been revealed. The obtained mathematical models of the technological characteristics of the DMA process of the mold matrix allow predicting and optimizing the processing mode.

Keywords: electric arc, electrode-tool, technology, technological characteristics, equipment.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ВСТУП | 8 |
| РОЗДІЛ 1. ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ | 11 |
| 1.1. Прес-форма як об'єкт виготовлення | 11 |
| 1.2. Аналіз сучасних технологій виготовлення прес-форм | 13 |
| 1.3. Про технологічні можливості процесу РОД прес-форм | 21 |
| РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ | 28 |
| 2.1. Обґрунтування технологічної схеми формоутворення похилої бічної поверхні матриці прес-форми | 28 |
| 2.2. Методика математичного моделювання технологічних характеристик процесу РОД матриці прес-форми | 30 |
| 2.3. Експериментальне обладнання та оснащення | 35 |
| 2.4. Особливості безпечної експлуатації експериментального електроерозійного копіювально- прошивного верстата для розмірної обробки прес- форм електричною дугою | 39 |
| 2.5. Матеріали, зразки та вимірювальний інструмент | 40 |
| РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД МАТРИЦІ ПРЕС-ФОРМИ | 43 |
| 3.1. Продуктивність обробки | 43 |
| 3.2. Питома продуктивність обробки | 47 |

| | |
|---|----|
| 3.3. Питома витрата електроенергії | 51 |
| 3.4. Висновки | 56 |
| | |
| РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ТА ТОЧНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД МАТРИЦІ ПРЕС-ФОРМИ ... | 58 |
| 4.1. Шорсткість обробленої поверхні | 58 |
| 4.2. Кут нахилу бічної поверхні | 68 |
| 4.3. Відносний лінійний знос електрода-інструмента | 71 |
| 4.4. Висновки | 71 |
| | |
| РОЗДІЛ 5. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД ПРЕС-ФОРМ | 78 |
| | |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 81 |
| | |
| ЛІТЕРАТУРА | 84 |

ВСТУП

Актуальність теми

Матриці прес-форм для виготовлення виробів із скла характеризуються похилою бічною поверхнею, для полегшення умов його видалення із прес-форми після пресування. Бічна поверхня може мати конічну, пірамідальну та фасонну форму. Формоутворення бічної поверхні конічної форми сталевій матриці прес-форми як правило здійснюється шляхом механічної обробки (точіння, розточування, шліфування). Для формоутворення пірамідальної та фасонної форми бічної поверхні сталевій матриці прес-форми, а також будь-якої форми твердосплавної матриці, широко використовується спосіб електро-імпульсного прошивання, який забезпечує потрібну якість та точність обробки. Даний спосіб застосовує для руйнування матеріалу електричну енергію у вигляді нестационарних форм електричних розрядів, зокрема імпульсних розрядів. Тому процес обробки супроводжується паузами, які негативно впливають на продуктивність обробки.

За роботами Носуленка В. І., Бокова В. М. та Сіси О. Ф. [1, 2, 3], відомий спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), в якому енергія підводиться в зону обробки безперервно. Даний спосіб володіє високою продуктивністю обробки.

Спроба застосування способу РОД для обробки бічних похилих та конічних поверхонь порожнини кувального штампа на деталь «Шатун» відома із роботи [4], де показана принципова можливість її здійснення, а в роботах [5, 6, 7] відмічається значне (у 5-10 разів) підвищення продуктивності способу РОД, порівняно зі способом електроімпульсної обробки [13, 14, 15].

Однак, встановлено, що шорсткість похилої поверхні після РОД нерівномірна та, як правило, підвищується за напрямком від периферії до центра електрода-інструмента. Останнє пов'язано з тим, що похилу поверхню можна розглядати як частину або всю торцеву поверхню, де

збуджується електрична дуга в гідродинамічному потоці робочої рідини. Але оскільки швидкість потоку в радіальному напрямку торцевого між-електродного зазору змінюється, то змінюються енергетичні параметри дуги, які, власне, відповідають за розміри одиничної лунки, а отже за шорсткість обробленої поверхні. При цьому спостерігається зміна в радіальному напрямку і міжелектродного зазору, внаслідок чого точність формування похилої поверхні знижується.

Таким чином, удосконалення виготовлення прес-форм є актуальним науково-практичним завданням.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – формування бічної (конічної) поверхні матриці прес-форми способом РОД з рівномірною шорсткістю та підвищеною точністю, за рахунок застосування запропонованої технологічної схеми формоутворення, при якій бічний міжелектродний зазор не утворюється.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати технологічну схему формоутворення похилої бічної поверхні матриці прес-форми;
- розробити методику математичного моделювання технологічних характеристик процесу РОД матриці прес-форми;
- виконати експериментальне дослідження продуктивності процесу РОД матриці прес-форми;
- виконати експериментальні дослідження якості та точності процесу РОД матриці прес-форми.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є спосіб РОД. Предмет дослідження – матриці прес-форм, які обробляються розмірною обробкою електричною дугою з використанням зворотного прокачування органічного середовища.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД бічної конічної поверхні матриці прес-форм в умовах формоутворення без утворення бічного між електродного зазору, які встановлюють їх взаємозв'язок з електричним і гідродинамічним режимами обробки та з кутом нахилу формоутворюючої поверхні електрода-інструмента, та дозволяють прогнозувати їх оптимізувати режим обробки. Це створює умови для формування бічної конічної поверхні матриці з рівномірною шорсткістю та підвищеною точністю.

Практичне значення отриманих результатів

Вперше способом РОД отримано пірамідальну форму бічної поверхні матриці прес-форми з рівномірної шорсткістю, що дозволяє застосовувати цей спосіб для виготовлення прес-форм.

Апробація результатів роботи

Основні положення та результати магістерської роботи повідомлені і обговорені на LVIII науково-технічній конференції здобувачів вищої освіти приуроченій «Дню науки – 2024» в ЦНТУ.

Структура й обсяг роботи

Магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи 85 сторінки, в тому числі 30 рисунків і 9 таблиць, список використаних джерел з 17 найменувань.

Розділ 1

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Прес-форма як об'єкт виготовлення

Пресування – один із найбільш економічних способів виготовлення деталей машин та виробів широкого вжитку. За допомогою цього метода можна отримувати:

- готові вироби;
- готові деталі, що йдуть прямо на складання;
- заготовки для подальшої механічної обробки перед складанням;
- проміжні моделі, що призначені для отримання форми для заливання в неї розплавленого металу і т. ін.

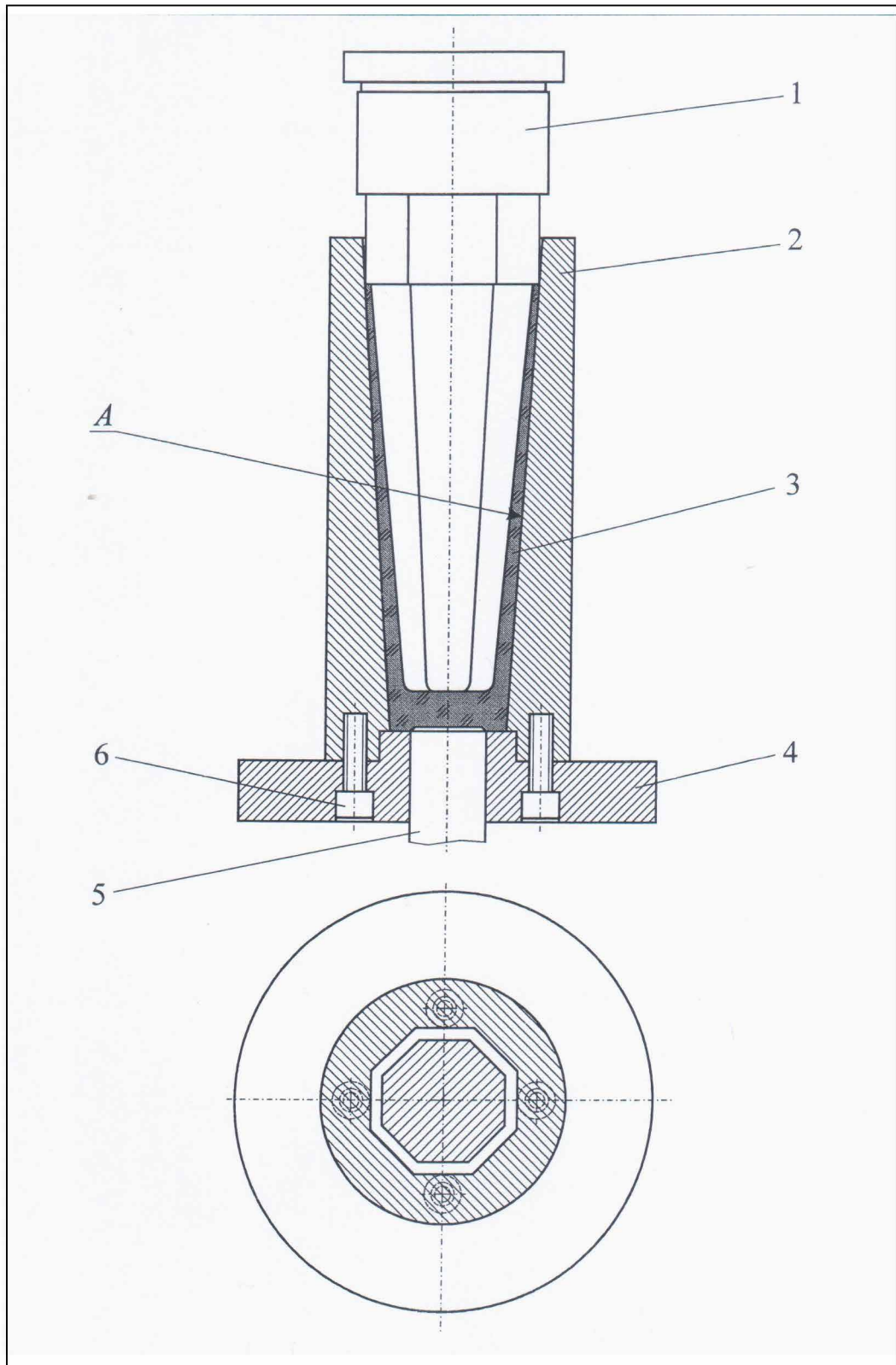
Матеріалом для пресування може бути пластмаса, гума, метал, воскова суміш, порошкоподібна фарфорова, металева або керамічна маса, скло тощо.

Інструментом для пресування є прес-форма. Прес-форми можна виготовляти із металу (чорного або кольорового), пластмаси, гіпсу, твердого сплаву тощо. В теперішній роботі об'єктом дослідження є технології виготовлення металевих та тврдосплавних прес-форм,

Прес-форма, зокрема для виготовлення виробів із скла, може складатися із багатьох деталей (на рисунку 1.1). Але проблемною для виготовлення робочою деталлю прес-форми є матриця 2. Матриця характеризується похилою бічною поверхнею A , яку вводять у виріб, з одного боку, для полегшення умов його видалення із прес-форми після пресування, а з другого боку, для надання певної художньої форми виробу. Бічна поверхня може мати конічну, пірамідальну та фасонну форму.

В сучасному машинобудуванні для виготовлення матриць з похилою бічною поверхнею використовуються наступні методи обробки:

- механічна обробка ріжучим інструментом;
- електроерозійна обробка.



1 – пуансон; 2 – матриця; 3 – виріб; 4 – плита нижня;
 5 – пуансон-виштовхувач; *A* – бічна поверхонь матриці

Рисунок 1.1 – Схема типової прес-форми для виготовлення
 восьмигранної скляної склянки

1.2. Аналіз сучасних технологій виготовлення прес-форм

Формоутворення бічної поверхні конічної форми сталеві матриці прес-форми як правило здійснюється шляхом *механічної обробки* (точіння, розточування, шліфування).

Існує декілька способів механічної обробки конічних поверхонь:

- широким різцем (на рисунку 1.2, а). Спосіб застосовується, коли довжина твірної не перевищує 100 мм. Даний спосіб дуже продуктивний, але точність та якість обробленої поверхні невисокі внаслідок вібрації при обробки;

- звичайним різцем, шляхом повороту вертикального супорту (на рисунку 1.2, б). Спосіб застосовується для обробки конічних поверхонь будь-якої довжини з кутами нахилу у межах $0 - 45^\circ$. Даний спосіб продуктивний;

- різцем з попереднім підбором змінних зубчастих коліс на верстатах, що мають гітару. Спосіб складний, потребує попереднього розрахунку та налагодження верстата;

- різцем за допомогою конусної лінійки або копіювальних пристроїв з відключенням полозка супорта від ходового гвинта. При використанні конусної лінійки, що закріплюється на поперечині верстата, обробку здійснюють вертикальним супортом з вертикальною подачею інструмента (на рисунку 1.2, в). Спосіб застосовують для обробки конічних поверхонь з кутами ухилу $0 - 12^\circ$. Даний спосіб зручний та продуктивний;

- за допомогою спеціальних супортів. Спосіб забезпечує обробку конічних поверхонь з будь-яким кутом ухилу при високій продуктивності та точності. На рисунку 1.2, г показано універсальний супорт, який жорстко закріплений нерухомою частиною 1 у різцетримачі вертикального супорта. Поворотну частину супорта встановлюють за шкалою на відповідний кут конуса α та закріплюють. Каретці з різцетримачем 2, що з'єднана з бічним супортом тягою 4, надають подачу від коробки подач бічного супорта. При переміщенні каретки різець обробляє конічну поверхню під кутом, що

відповідає куту установки поворотної частини. У випадку неможливості з'єднання каретки з бічним супортом передбачена ручна подача супорта за допомогою рукоятки 6 та гвинта 5. Ручну подачу вмикають та вимикають рукояткою 3, що пов'язана з гайкою гвинта. На рисунку 1.2, д показано гідрокопіювальний супорт, в якому керування переміщеннями різця за заданою траєкторією здійснюється слідкуючим пристроєм, щуп 1 якого ковзається за копіром 5. При цьому вертикальний супорт має горизонтальну подачу. Гідроциліндр 4 слідкуючого пристрою розташований позаду вертикального полозка вертикального супорта. На зв'язаню з цим ползком поперечині 6 розміщують напрямний розподільник 2 з маховиком 3, яким регулюють положення щупа 1. Копір 5 закріплюють в тримачі 7, що встановлений на траверсі верстата;

- за допомогою використання спеціального ріжучого інструмента, наприклад розгортки 1 (на рисунку 1.2, ж).

Однак механічна обробка похилої бічної поверхні суттєво обмежена формою поперечного перерізу матриці прес-форми та фізико-механічними властивостями матеріалу, що обробляється. Так, певні технічні труднощі викликає обробка матриць пірамідальної та фасонної форми бічної поверхні. Крім того, механічна обробка не дозволяє обробляти загартовані сталеві та твердосплавні матриці.

Для формоутворення пірамідальної та фасонної форми бічної поверхні сталеві матриці прес-форми, а також будь-якої форми твердосплавної матриці, широко використовується спосіб *електроімпульсного прошивання*, який використовує для руйнування матеріалу нестационарні форми електричних розрядів. Із трьох відомих способів електроерозійної обробки – електроіскрової, електроімпульсної та електроконтактної – для виготовлення застосовується лише електроімпульсна обробка.

Відкриття електроерозійного способу обробки належить Б. Р. Лазаренко та Н. І. Лазаренко та відомо з 1943 року за їх першими роботами.

Далі електроерозійний спосіб обробки інтенсивно розвивався в плані підвищення продуктивності за напрямком: електроіскрова обробка → електроімпульсна обробка → електродугова обробка (РОД).

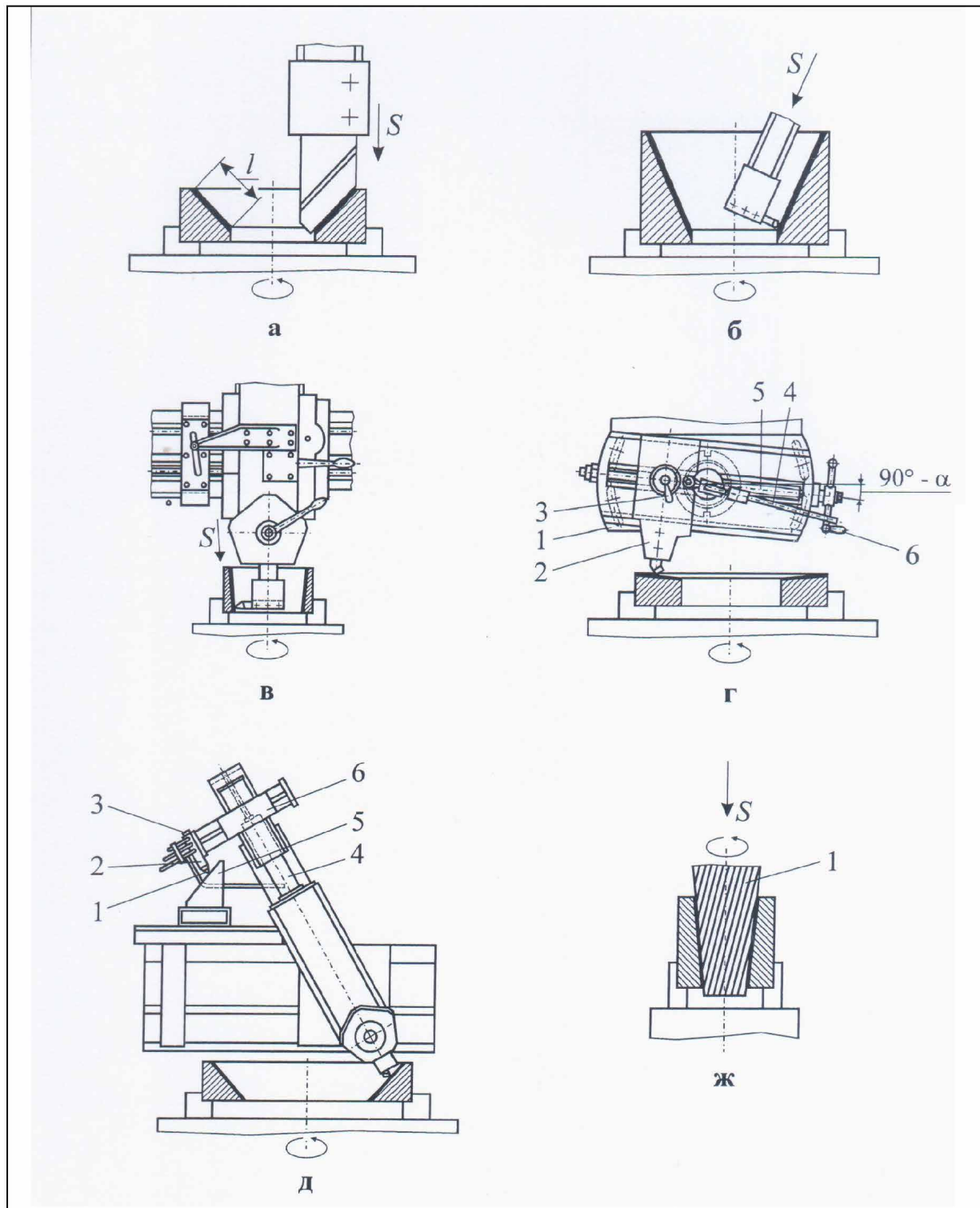
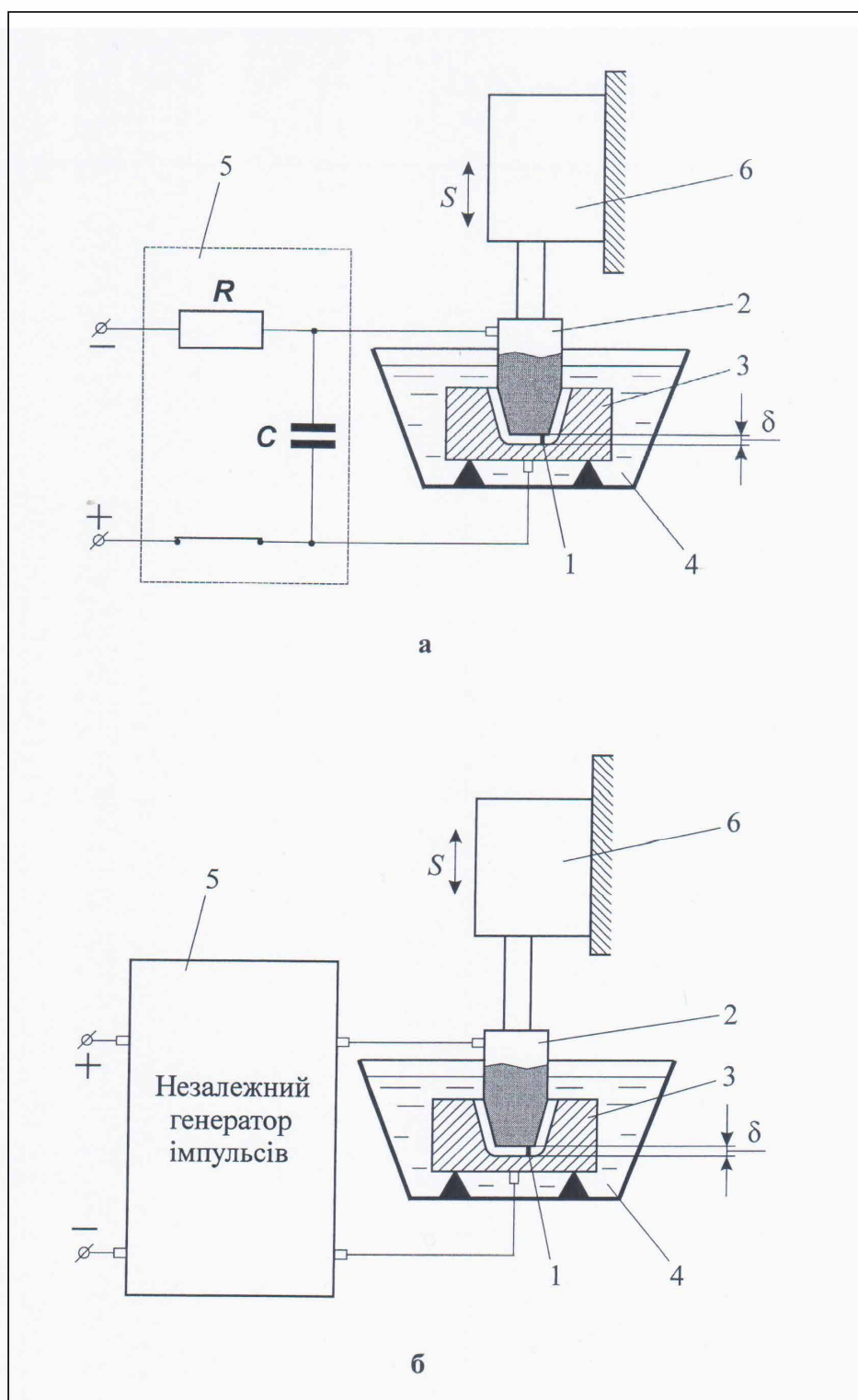


Рисунок 1.2 – Схеми механічної обробки конічних поверхонь

Суть електроіскрової обробки полягає в теплової дії іскрових електричних розрядів 1, що виникають між електродом-інструментом 2 та електродом-заготовкою (деталлю) 3, які поміщені у відповідне діелектричне середовище 4 (на рисунку 1.3, а). Іскрові розряди 1 формують залежний релаксаційний (конденсаторний) генератор імпульсів 5, що живиться постійним струмом при напрузі 220...250 В. При вмиканні електричної схеми верстата привод слідкуючої подачі 6 переміщує електрод-інструмент 2 до деталі 3. При досяганні відстані між ними, що дорівнює оптимальному міжелектродному зазору δ , виникає зона наскрізної провідності, по якій від катода до анода спрямовується лавиноподібний потік електронів. Температура в зоні сягає десятків тисяч градусів. Під впливом тепла руйнуються поверхні електродів – відбувається електрична ерозія. Процес здійснюється зі шпаруватістю $q > 10$. Суттєвими недоліками електроіскрової обробки є: низька продуктивність обробки, яка на грубих режимах не перевищує 600 мм³/хв.; значний знос електрода-інструмента, який для алюмінієвого ЕІ досягає 300...400 % від об'єму зруйнованого матеріалу деталі.

Електроімпульсна обробка відома за роботами А. Л. Лівшица, Г. М. Мещерякова [8, 9] та іншими вченими. Вона заснована на використанні електричних розрядів, що ідуть з малою шпаруватістю ($1 < q < 10$), при зменшеному відношенні амплітуди розрядного струму до тривалості імпульсів. Електрод-інструмент, як правило, включається на зворотну полярність (анод). Потужність – від сотень ват до декілька десятків кіловат (на рисунку 1.3, б). В якості джерела живлення технологічним струмом використовуються незалежні генератори імпульсів 5. Робочим середовищем електроімпульсної обробки є, як правило, органічне середовище: суміш масла та гасу у співвідношенні 1:1. Електроди-інструменти виготовляють із термостійких матеріалів, таких, що добре проводять тепло, наприклад, із вуглеграфіту, міді, латуні тощо.



а – електроіскрова обробка; б – електроімпульсна обробка

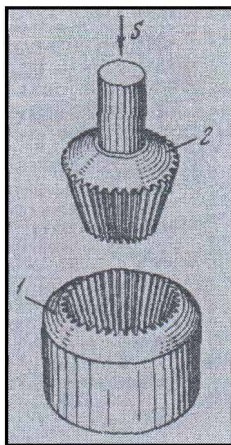
Рисунок 1.3 – Принципові схеми електроерозійної обробки

Відомо, що енергія імпульсу струму, яка розподіляється між анодом, катодом та столом розряду, виділяється протягом вельми короткого часу при високій густині, що визначає специфіку фізичних процесів. Як наслідок цього відбувається вилучення металу із заготовки, що обробляється, зміна структури та властивостей поверхневого шару, утворення внутрішніх напружень, знос електрода-інструмента, розкладання робочої рідини та інші фізичні явища. Протягом імпульсу метал аноду та катоду в основному вилучається в рідкому та пароподібному станах. При коротких імпульсах доля металу, що випарена, доходить до 90 %, і з ростом тривалості імпульсу t_i поступово зменшується до 5 % при $t_i = 1000$ мкс. Робоча рідина, що оточує канал розряду, випаровується, утворюючи газову порожнину. В початковий момент швидкість руху межі газової порожнини досягає 200 м/с, а тиск у порожнині – десятків МПа. Внаслідок цього метал, що оброблюється, випробовує значний механічний, але локальний, тиск. Після закінчення імпульсу струму газова порожнина продовжує за інерцією розширюватися, що разом з конденсацією парів металу приводить до швидкого падіння тиску в ній, аж до тиску, який нижче атмосферного. В момент, коли розміри газової порожнини наближаються до найбільших, а тиск у них – до найменшого, перегрітий метал, який знаходиться в лунці, що утворилася, закипає та викидається із неї. Реактивним струменем парів металу, що залишився в лунці, рідкий метал витискується із неї, застигає та утворює валик, що облямовує. Викид цієї додаткової порції металу відбувається через $(3...5)t_i$ після закінчення імпульсу струму, а далі охолоджена поверхонь лунки приймає остаточну форму.

Відомі дві обставини, які дозволяють в умовах обробки при малої напрузі отримати місцеві напруження електричного поля, що приводять до пробою. По-перше, цьому сприяє шорсткість поверхні електродів: випадковий розподіл місцевих мікронерівностей може зменшити найкоротшу відстань між електродами. До того ж, поблизу гострих виступів на поверхні

місцева напруженість електричного поля дуже велика. По-друге, пробивна напруга значно знижується, оскільки робоче середовище містить дрібні газові, тверді та рідкі частки. Наприклад, якщо в робочому середовищі є електропровідні частки стружки, то напруженість електричного поля у самому діелектрику робиться більшою, ніж при таких ж умовах в ідеально чистому середовищі. Слід відмітити і більш низьку електричну міцність на межі між газом та рідиною.

Формоутворення пірамідальної та фасонної форми бічної поверхні сталевій матриці прес-форми, а також будь-якої форми твердосплавної матриці, може здійснюватися способом електроімпульсного прямого копіювання (на рисунку 1.4).



1 – матриця; 2 – електрод-інструмент

Рисунок 1.4 – Схема формоутворення матриці прес-форми з похилою робочою поверхнею способом електроімпульсного прошивання

Даний спосіб реалізується при нерухомій заготовці та поступальному русі електрода-інструмента, який переміщується в слідкуючому режимі за торцевим міжелектродним зазором. При цьому доцільно досягати шорсткості обробленої поверхні Ra 4-8 мкм. Подальше зниження шорсткості поверхні, якщо в цьому є необхідність, більш продуктивніше отримувати шліфуванням.

Для обробки матриць способом електроімпульсного прошивання в якості матеріалу електрода інструмента використовується мідь та електроерозійностійкий графіт (на рисунку 1.5).



Рисунок 1.5 – Графітовий електрод-інструмент для електроімпульсного прошивання матриці прес-форми

За даними роботи [9] відомо, що при електроімпульсній обробки з підвищенням сили струму швидкості знімання та евакуації продуктів ерозії будуть зростати спочатку приблизно пропорційно. При деякому значенні сили струму (для заданих значінь площі та глибини) об'єм паро-газової фази суттєво зростає і в цьому об'ємі починає зростати кількість так званих «фіктивних» розрядів, що не виробляють корисного знімання металу. При цьому швидкість знімання, тобто продуктивність обробки, почне сповільнюватися (на рисунку 1.6).

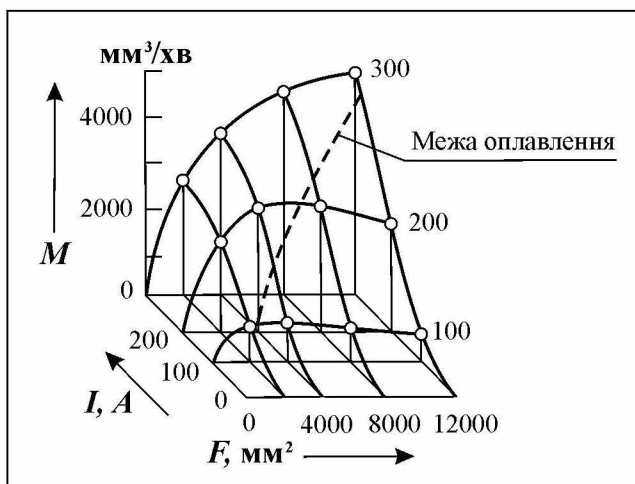


Рисунок 1.6 – Просторова діаграма «сила струму – площа обробки – продуктивність обробки процесу електроімпульсної обробки

При надвеликій (для даної площі) енергії паро-газова фаза може зовсім витиснути робочу рідину із міжелектродного зазору, а швидкість знімання буде прямувати до нуля. Одночасно припиниться і подальше зростання паро-газової фази, знову почнеться знімання, та показаний цикл повториться.

Отже, при надмірних енергіях (струмах) та малих площах збуджуються автоколивання, що характеризуються циклічною зміною швидкості знімання при різкому зниженні її середнього значення.

Саме тому, електроімпульсна обробка матриць з площею торцевої поверхні до 500 мм^2 за даними роботи [11, с. 10-11] здійснюється з використанням сили технологічного струму до 5 А. Даному струму відповідає продуктивність обробки до $5 \text{ мм}^3/\text{хв.}$ при задовільному значенню шорсткості обробленої поверхні.

Як бачимо, продуктивність електроімпульсної обробки матриць прес-форм дуже низька. Крім того, процес обробки на малій силі технологічного струму супроводжується підвищенням відносним лінійним зносом графітового електрода-інструмента, який, як відомо, для даних умов досягає 50 %, що негативно впливає на точність формоутворення матриць. Тому, для підвищення точності, обробку здійснюють послідовно декількома електродами-інструментами, що негативно впливає на собівартість електроімпульсної обробки матриць.

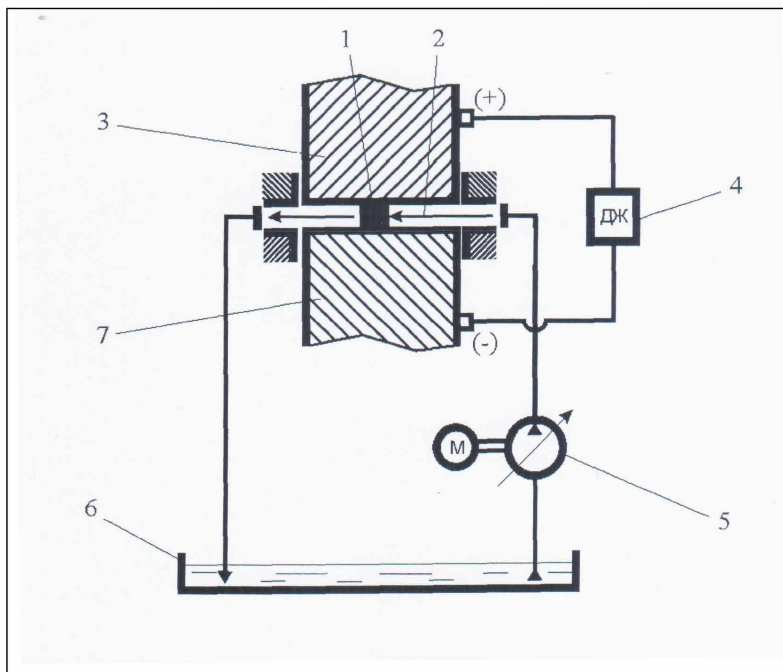
Спосіб електроімпульсної обробки матриць застосовує для руйнування матеріалу електричну енергію у вигляді нестационарних форм електричних розрядів, зокрема імпульсних розрядів. Тому процес обробки супроводжується паузами, які негативно впливають на продуктивність обробки.

За роботами Носуленка В. І., Бокова В. М. та Сіси О. Ф. [1, 2, 3], відомий спосіб розмірної обробки металів електричною дугою (РОД), в якому енергія підводиться в зону обробки безперервно. Завдяки цьому, а також тому, що спосіб дозволяє вводити в зону обробки великі потужності електричного струму, він володіє високою продуктивністю обробки.

Спосіб РОД є об'єктом подальшого дослідження в даній роботі на предмет обробки матриць прес-форм.

1.3. Про технологічні можливості процесу РОД прес-форм

Суть процесу РОД полягає в тому, що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою, яка горить поміж електродом-інструментом і електродом-заготовкою в потоці рідини при динамічному тиску потоку в зоні обробки не менше 1...2 кПа (що відповідає швидкості потоку приблизно 1,5...2 м/с) [1]. Звичайно РОД здійснюють дуговим розрядом, що горить у поперечному потоці робочої рідини (на рисунку 1.7).



- 1 – електрична дуга;
- 2 – поперечний потік робочої рідини;
- 3 - електрод-інструмент;
- 4 –джерело живлення постійним електричним струмом;
- 5 – насос робочої рідини;
- 6 – бак з робочою рідиною;
- 7 – електрод-заготовка

Рисунок 1.7 – Принципова схема способу РОД [1]

Дуговий розряд в умовах РОД має високі енергетичні характеристики, і переміщується по поверхні електродів. При цьому відбувається інтенсивне локальне руйнування металу за рахунок випаровування й крапельного викидання розплаву, а потік рідини видаляє із зони обробки отримані продукти ерозії. Усе це в сукупності забезпечує оптимальне протікання процесу розмірної обробки. Типова осцилограма струму й напруги дуги при РОД (на рисунку 1.8) принципово не відрізняється від типової осцилограми струму і напруги звичайної стаціонарної дуги типу зварювальної чи плазмової дуги для різання металу.

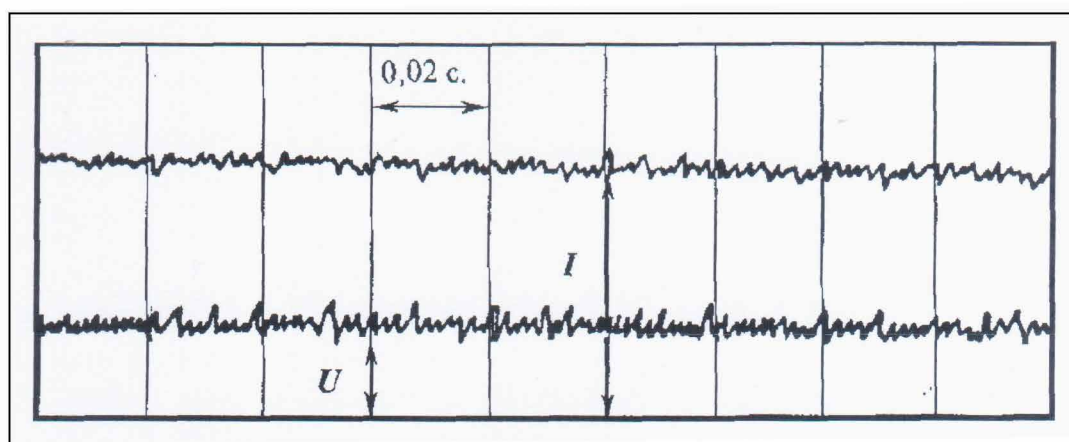


Рисунок 1.8 – Типова осцилограма сили струму I та напруги U при РОД

Енергетичні характеристики розряду (густина струму, напруженість електричного поля) в умовах РОД регулюються легко, плавно й у широких межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку й при збільшенні (зменшенні) останнього збільшуються (зменшуються), що треба розглядати як результат саморегулювання енергетичних характеристик розряду у функції динамічного тиску потоку.

Як наслідок, в умовах такого процесу можна легко керувати якістю процесу обробки незалежно від струму за рахунок зміни динамічного тиску потоку, здійснюючи обробку в широкому діапазоні режимів, починаючи від грубого розмірного плавлення й аж до переважаючого тонкого розмірного випаровування. Таким чином, динамічний тиск потоку робочої рідини в

умовах РОД є основним параметром процесу, що визначає, у кінцевому підсумку, можливість та якісну сторону процесу обробки.

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

Електроди-інструменти можуть бути плавкими, наприклад, сталевими, і неплавкими, наприклад, вольфрамовими, профільованими, і не профільованими. Вони виготовляються з тих же матеріалів і мають приблизно таку ж ерозійну стійкість, як і при відомих способах електроерозійної обробки. Так, високу стійкість забезпечують електроди-інструменти із графіту при застосуванні робочої рідини з нафтопродуктів.

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

Якщо змінювати типорозміри електродів, і надавати їм відповідні рухи подачі, можна при використанні відповідних технологічних прийомів

здійснити 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 й, менше, сили робочого струму, покращується при збільшенні динамічного тиску потоку та зменшенні сили струму й, у цілому, не поступається досягнутій при відомих способах електроерозійної обробки. Глибина, структура й твердість зони термічного впливу легко регулюється за рахунок зміни динамічного тиску потоку, і при збільшенні останнього до відповідних значень незалежно від сили струму ця зона може бути практично відсутньою.

Оптимальна величина міжелектродних зазорів коливається в межах 0,1...0,2 мм. Точність обробки, яка визначається перш за все зносом електрода-інструмента та коливанням величини міжелектродного зазору, у цілому не поступається досягнутій при відомих способах електроерозійної обробки.

Порівняльна оброблюваність матеріалів в умовах РОД оцінюється аналогічно, як і при відомих способах електроерозійної обробки. Продуктивність обробки прямо пропорційна силі струму, яка може сягати декількох тисяч ампер, і в багато разів перевищує продуктивність електроіскрової обробки. Наприклад, при силі струму 1000 А продуктивність при обробці сталей досягає 30 000 мм³/хв при *Ra* 6,3 мкм та глибині зони термічного впливу в межах декількох сотих часток міліметра. Типові витрати електроенергії в залежності від режимів обробки складають для сталей 3...10 кВт·год/кг.

Спроба застосування способу РОД для обробки бічної конічної поверхні порожнини кувального штамп на деталь «Шатун» відома із роботи [4], де показана принципова можливість її здійснення шляхом копіювання форми електрода-інструмента (на рисунку 1.9), а в роботах [5, 6, 7]

відмічається значне (у 5-10 разів) підвищення продуктивності способу РОД, порівняно зі способом електроімпульсної обробки.

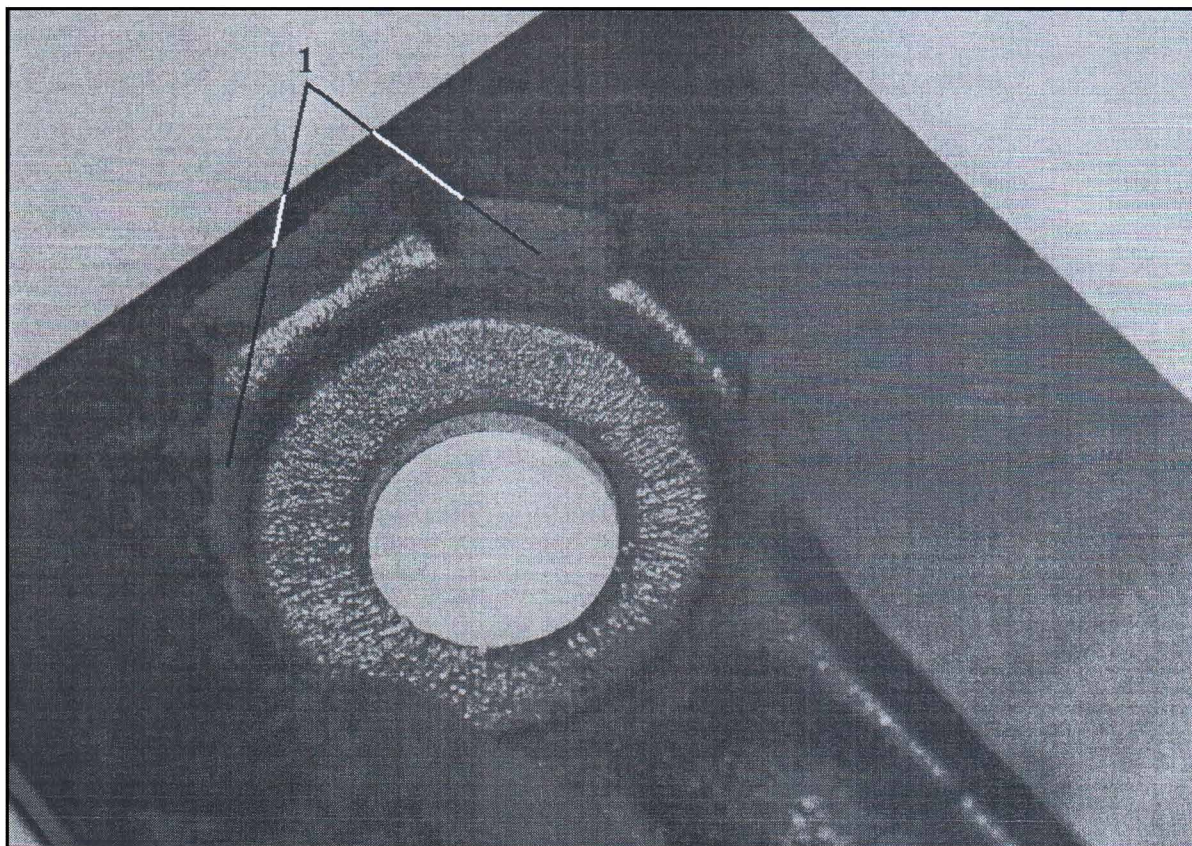
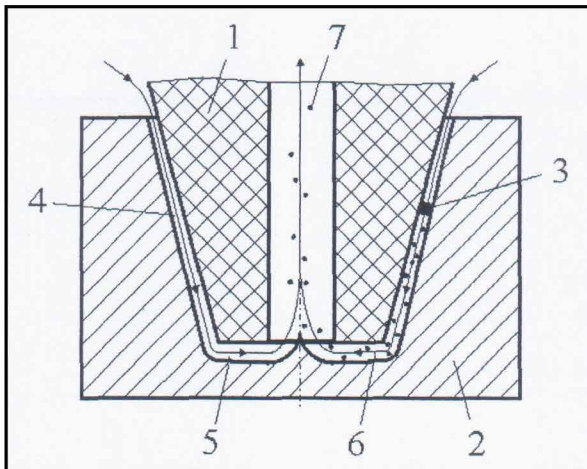


Рисунок 1.9 – Фрагмент порожнини кувального штампа на деталь «Шатун» з обробленою способом РОД бічною кінчною поверхнею 1

Однак, встановлено, що шорсткість похилої бічної поверхні після РОД нерівномірна та, як правило, підвищується за напрямком від периферії до центра електрода-інструмента. Останнє пов'язано з тим, що похилу поверхню можна розглядати як частину або всю торцеву поверхню, де збуджується електрична дуга в гідродинамічному потоці робочої рідини. Але оскільки швидкість потоку в радіальному напрямку торцевого між-електродного зазору змінюється, то змінюються енергетичні параметри дуги, які, власне, відповідають за розміри одичної лунки, а отже за шорсткість обробленої поверхні. При цьому спостерігається зміна в радіальному напрямку і міжелектродного зазору (на рисунку 1.10), внаслідок чого

точність формування похилої поверхні знижується. Крім того, встановлено [10], що рівномірність шорсткості похилої поверхні після РОД залежить від технологічної схеми формоутворення.



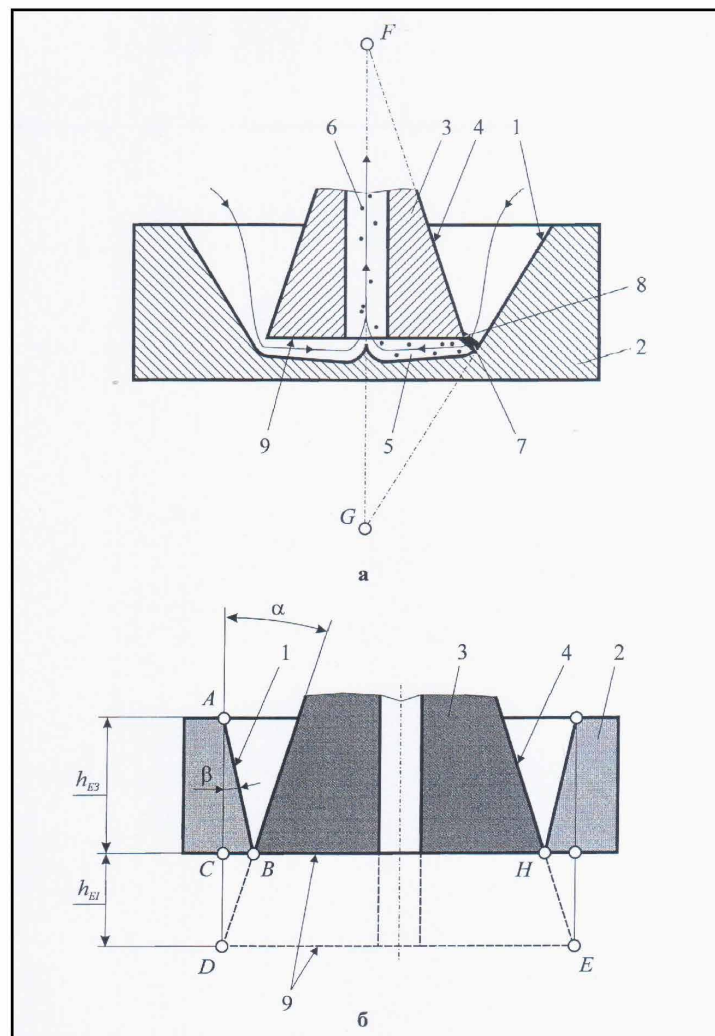
1 – ЕІ; 2 – ЕЗ; 3 – електрична дуга; 4 – бічний МЕЗ; 5 – торцевий МЕЗ; 6 – гідродинамічний потік; 7 – продукти ерозії

Рисунок 1.10 – Технологічна схема формоутворення конічної поверхні способом РОД за принципом копіювання форми електрода-інструмента

МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Обґрунтування технологічної схеми формоутворення похилої бічної поверхні матриці прес-форми

Для РОД похилої бічної поверхні матриці прес-форми пропонується оригінальна схема формоутворення, при якій бічний міжелектродний зазор не утворюється (рис. 2.1).



а – схема формоутворення; б – розрахункова схема

Рисунок 2.1 – Технологічна схема формоутворення конічної бічної поверхні матриці-прес-форми, при якій бічний МЕЗ не утворюється

Нижче наводиться пояснення роботи даної схеми на прикладі утворення способом РОД конічної бічної поверхні матриці.

Для формоутворення конічної поверхні 1 в заготовці 2 виготовляють електрод-інструмент 3 у вигляді конуса з кутом відхилення твірної конічної поверхні 4 α від напрямку подачі, та закріплюють на шпинделі верстата з орієнтацією вершини конуса F у бік протилежний вершині конуса G поверхні 1, що обробляється. Робочу рідину (органічне середовище) нагнітають у торцевий міжелектродний зазор 5 під технологічним тиском від 0,2 до 5 МПа за напрямком від периферії до центра електрода-інструмента 3, а вилучають із торцевого міжелектродного зазору 5 із продуктами ерозії крізь технологічний отвір 6 в електроді-інструменті 3. Електрична дуга 7, що саме утворює конічну поверхню 1, горить між заготовкою 2 та гострим краєм 8 (гострою кромкою) електрода-інструмента 3 в гідродинамічному потоці робочої рідини. При цьому продукти ерозії, що утворюються в торцевому міжелектродному зазорі 5, не впливають на точність та якість формування обробленої поверхні 1.

Отримання конічної поверхні 1 з використанням даної технологічної схеми формоутворення є можливим внаслідок того, що в процесі обробки торцева поверхня 9 електрода-інструмента 3 піддається електроерозійному зносу, який приводе до зменшення висоти електрода-інструмента 3, а отже і його зовнішнього робочого діаметра. Так, при початковому діаметрі електрода-інструмента 3, що дорівнює DE , діаметр електрода-інструмента 3 в кінці формоутворення конічної поверхні 1 дорівнює BH при величині торцевого (абсолютного) лінійного зносу електрода-інструмента 3, що дорівнює h_{EI} .

Для встановлення залежності $\alpha = f(\beta, \gamma_n)$, де γ_n (%) – лінійний знос електрода-інструмента 3, запишемо основні співвідношення (див. рис. 2.1, б):

$$\gamma_n = \frac{100 \cdot h_{EI}}{h_{E3}}; \quad (2.1)$$

$$BC = h_{EI} \cdot \operatorname{tg} \alpha ; \quad (2.2)$$

$$BC = h_{E3} \cdot \operatorname{tg} \alpha , \quad (2.3)$$

де h_{E3} - глибина обробки конічної поверхні (конічного отвору).

Після прирівнювання співвідношень (2.2), (2.3) та подальшого перетворення з урахуванням співвідношення (2.1), маємо вираз (2.4) для розрахунку кута α при заданому кресленням куту β та лінійному зносу електрода-інструмента γ_a :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{100 \cdot \operatorname{tg} \beta}{\gamma_a} . \quad (2.4)$$

Саме тому, для дослідження технологічних характеристик процесу РОД матриці прес-форми використовували технологічну схему формоутворення, що показана на рис. 2.1, яка дозволяє отримати потрібний кут нахилу бічної поверхні β шляхом керування кутом α та відносним лінійним зносом електрода-інструмента за рахунок варіювання матеріалом для його виготовлення.

2.2. Методика математичного моделювання технологічних характеристик процесу РОД матриці прес-форми

2.2.1. Прийняття рішень перед плануванням експерименту [10]. На підставі апріорної інформації було вибрано три фактора, які повинні впливати на технологічні характеристики процесу РОД матриці прес-форми (табл. 2.1):

- сила технологічного струму $I(X_1)$, А;

- статичний тиск робочої рідини на вході в зазор $P_{cm}(X_2)$, МПа;
- кут α відхилення твірної конічної поверхні електрода-інструмента від напрямку подачі (X_3), град.

Усі вибрані фактори задовольняють умовам керованості, операціональності та однозначності.

Інші параметри процесу РОД висадочних матриць були зафіксовані на таких постійних рівнях:

- напруга на електродах $U = 25$ В;
- склад робочої рідини:
 - масло «Індустріальне І-20А» ГОСТ 20790-75 – 50 %;
 - гас освітлювальний ГОСТ 4953-68 – 50 %;
- полярність обробки – зворотна (зразок – «минус»).

Після експерименту розраховувалися або вимірялися такі технологічні характеристики процесу РОД фасонних порожнин, як:

- продуктивність обробки M , мм³/хв.;
- питома продуктивність обробки M_a , мм³/А·хв.;
- питома витрата електроенергії a , кВт·год/кг;
- шорсткість бічної поверхні R_a , мкм;
- кут відхилення твірної конічної поверхні електрода-заготовки (зразка)

в напрямку подачі після РОД β , град;

- лінійний відносний знос електрода-інструмента γ , %.

2.2.2. Побудова матриці планування експерименту. Значення факторів на основному, верхньому та нижньому рівнях, а також інтервали варіювання наведено в таблиці 2.1.

У даному разі значення факторів у кодовому (x_i) і натуральному (X_i) масштабах зв'язані співвідношеннями:

$$x_1 = \frac{X_1 - 100}{50}; \quad (2.5)$$

$$x_2 = \frac{X_2 - 0,8}{0,2}; \quad (2.6)$$

$$x_3 = \frac{X_3 - 30}{30}. \quad (2.7)$$

Таблиця 2.1 – Матриця планування експерименту (план 2^3)

| Фактори | | I_i А | $P_{ср}$ МПа | α , град. | M , мм ³ /хв. | M_a , мм ³ /А·хв. | a , кВт·год кг | Ra , мкм | β , град | γ , % | | |
|--------------------------------------|---|--------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------|-------------------|-----------------|------|-----|
| Основний рівень (X_{i0}) | | 100 | 0,8 | 30 | | | | | | | | |
| Інтервал варіювання (ΔX_i) | | 50 | 0,2 | 30 | | | | | | | | |
| Верхній рівень ($X_i = +1$) | | 150 | 1,0 | 60 | | | | | | | | |
| Нижній рівень ($X_i = -1$) | | 50 | 0,6 | 0 | | | | | | | | |
| Код | | x_1 | x_2 | x_3 | y_1 | y_2 | y_3 | y_4 | y_5 | y_6 | | |
| Номер досліду | 1 | Порядок реалізації | 6 | + | + | + | 590 | 3,93 | 13,45 | 9,5 | 63,5 | 116 |
| | 2 | | 2 | - | + | + | 295 | 5,90 | 8,99 | 4,8 | 64,3 | 120 |
| | 3 | | 5 | + | - | + | 611 | 4,07 | 13,00 | 10,2 | 69,1 | 151 |
| | 4 | | 1 | - | - | + | 305 | 6,10 | 8,70 | 7,6 | 69,0 | 150 |
| | 5 | | 7 | + | + | - | 719 | 4,79 | 11,00 | 11,0 | 0,0 | 90 |
| | 6 | | 8 | - | + | - | 329 | 6,58 | 8,10 | 6,0 | 0,0 | 82 |
| | 7 | | 3 | + | - | - | 740 | 4,93 | 10,70 | 12,5 | 0,0 | 89 |
| | 8 | | 4 | - | - | - | 350 | 7,00 | 7,60 | 7,0 | 0,0 | 89 |
| Досліди у центрі плану | | 1 | 0 | 0 | 0 | 480 | 4,80 | 11,04 | 8,6 | 34,5 | 119 | |
| | | 2 | 0 | 0 | 0 | 510 | 5,70 | 10,41 | 8,7 | 32,1 | 108 | |
| | | 3 | 0 | 0 | 0 | 490 | 4,90 | 10,83 | 8,5 | 33,0 | 112 | |
| | | 4 | 0 | 0 | 0 | 500 | 5,00 | 10,62 | 8,7 | 32,8 | 112 | |

Повний факторний експеримент для трьох факторів (k) і двох рівнів (P) повинен включати в себе таку кількість дослідів:

$$N = P^k = 2^3 = 8. \quad (2.8)$$

Задача зводиться до будівництва лінійної математичної моделі вигляду

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i x_i, \quad (2.9)$$

де b_0, b_i - коефіцієнти регресії моделі.

Відповідно до вибраного плану (2^3) було проведено 8 дослідів, причому кожний дослід виконувався тільки один раз. Крім того, для оцінки дисперсії провели чотири дослідів в центрі плану.

2.2.3. Послідовність побудови математичної моделі технологічної характеристики процесу РОД матриці:

- розраховуємо дисперсію дослідів за формулою

$$S_y^2 = \frac{\sum \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)^2}{f_1}, \quad (2.10)$$

де y_{0q} - результат q -го дубля (повтору) дослідів у центрі плану;

\bar{y}_0 - середнє арифметичне значення усіх n_0 дублів центрального дослідів;

f_1 - число ступенів свободи

$$f_1 = n_0 - 1 = 4 - 1 = 3. \quad (2.11)$$

- розраховуємо коефіцієнти регресії моделі за формулою

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} Y_u}{N}, \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (2.12)$$

де N – число дослідів. $N = 8$;

- перевіряємо статистичну значимість коефіцієнтів регресії.

Перевірка містить розрахунок дисперсії оцінок, який виконуємо з використанням формули

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N}, \quad (2.13)$$

відповідно середньо квадратична помилка $S_{b_i} = \sqrt{S_{b_i}^2}$.

За рівнем значимості $\alpha = 0,05$ та числом ступенів свободи $f_1 = 3$, табличне значення t -критерія Стьюдента $t_{0,05;3} = 3,18$.

Довірчий інтервал коефіцієнтів регресії буде

$$\Delta b_i = t_{\alpha, f} S_{b_i}. \quad (2.14)$$

Ті коефіцієнти регресії, для яких виконується вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$, слід признати статистично значимими;

- *будуємо рівняння регресії (математичну модель), яке набуває вигляду:*

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3; \quad (2.15)$$

- *перевіряємо гіпотезу про адекватність моделі за t -критерієм Стьюдента*

$$t^{розр} = \frac{|b_0 - \bar{y}_0| \sqrt{N}}{S_y}. \quad (2.16)$$

Якщо $t^{розр} \leq t_{\alpha, f}^{табл} = 3,18$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

2.3. Експериментальне обладнання та оснащення

2.3.1. Експериментальний верстат. Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД матриці прес-форми використовувався експериментальний електроерозійний копіювально-прошивний верстат моделі «Дуга-8Г» [11] (на рисунку 2.2).

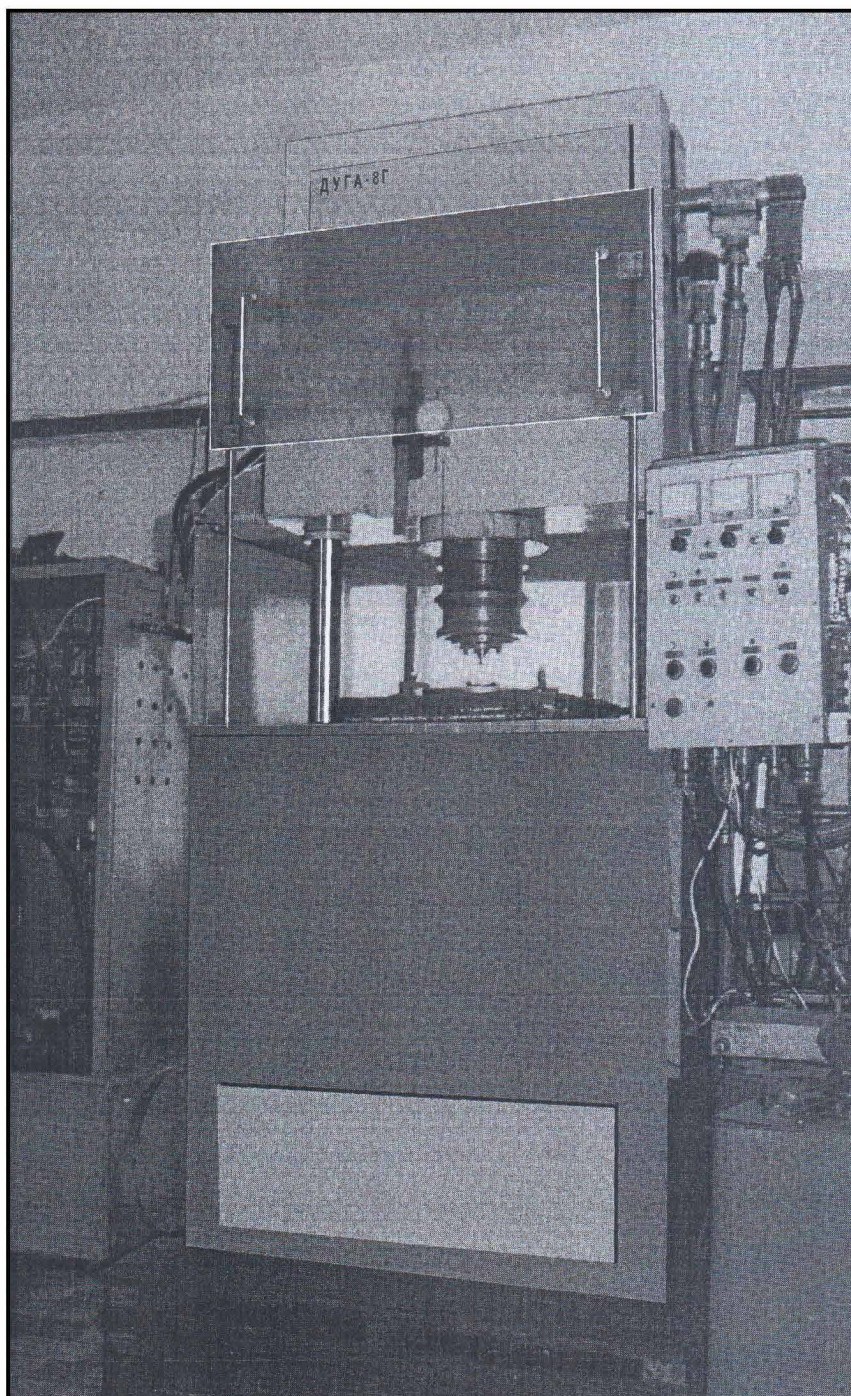


Рисунок 2.2 – Експериментальний електроерозійний верстат моделі «Дуга-8Г»

Універсальний двостояковий електроерозійний верстат «Дуга-8Г» призначено для РОД отворів, стержнів та порівняно дрібних фасонних порожнин, габаритні розміри яких у плані вписуються в коло діаметром 150 мм. Типовими представниками обробки є деталі, які виготовляються з важкооброблюваних матеріалів, зокрема, із загартованої сталі.

Верстат «Дуга-8Г» являє собою установку, що включає в себе:

- власне, верстат, інструментальну головку якого виконано у вигляді жорсткої замкнутої рами із силовим замиканням за допомогою гідроциліндра;
- станцію робочої рідини, що забезпечує пряме, зворотне та бічне прокачування органічного середовища під технологічним тиском крізь міжелектродний зазор;
- станцію гідроприводу для живлення гідроциліндрів електрогідравлічного приводу подачі електрода-інструмента та переміщення інструментальної головки;
- джерело живлення технологічним струмом: два зварювальних випрямляча ВДУ-504;
- пульт електрокерування.

Основні дані верстата «Дуга-8Г»

| | |
|---|-----------|
| Розміри стола (довжина x ширина), мм | 400 x 300 |
| Найбільша маса ЕІ, кг | 35 |
| Найбільша маса заготовки, кг | 100 |
| Найбільший розмір оброблюваної порожнини в плані, мм | 150 |
| Найбільша відстань від торцевої поверхні електродотримача до робочої поверхні стола, мм | 325 |
| Робочий хід шпинделя, мм | 200 |
| Установочне переміщення інструментальної головки, мм | 300 |
| Робоча рідина, %: | |

| | |
|---|---------------------|
| - масло індустріальне І-20А ГОСТ 20790-75 | 70 |
| - гас освітлювальний ГОСТ 4953-68 | 30 |
| Об'єм робочої рідини, що заливається в бак, л | 800 |
| Привод слідкуючої подачі шпинделя | електрогідравлічний |
| Межі регулювання струму, А | 50-1000 |
| Межі регулювання напруги, В | 24 – 45 |
| Найбільша продуктивність при використанні вуглеграфітового електрода-інструмента, мм ³ /хв: | |
| - по сталі 45 | 22 000 |
| - по титановому сплаву ВТ3-1 | 30 000 |
| Найменша шорсткість поверхні після РОД по ГОСТ 2789-73, Ra, мкм | 3,2 |
| Габарит верстата (довжина x ширина x висота), мм | 1000 x 1000 x 2740 |
| Маса верстата, кг | 2100 |

2.3.2. Експериментальний пристрій. Для дослідження технологічних характеристик процесу РОД матриць прес-форми спроектовано та виготовлено оригінальний експериментальний пристрій до електроерозійного верстата «Дуга-8Г» (на рисунку 2.3).

Пристрій включає в себе наступні основні деталі:

- тримач 1, який виконано у вигляді круглої плити та призначено для кріплення рухомої частини пристрою до шпинделя верстата;
- електродотримач 2 з проміжною втулкою 6 для кріплення електродів-інструментів;
- комплект електродів-інструментів 3...5 для формоутворення внутрішніх конічних поверхонь матриць з кутом нахилу твірної відповідно 0°, 30°, 60°;
- шайба притискна 7 для кріплення заготовок;
- комплект електродів-заготовок 8;
- тримач 9 для кріплення електрода-заготовки;

- плиту нижню 10 для закріплення нерухомої частини пристрою відносно стола верстата.

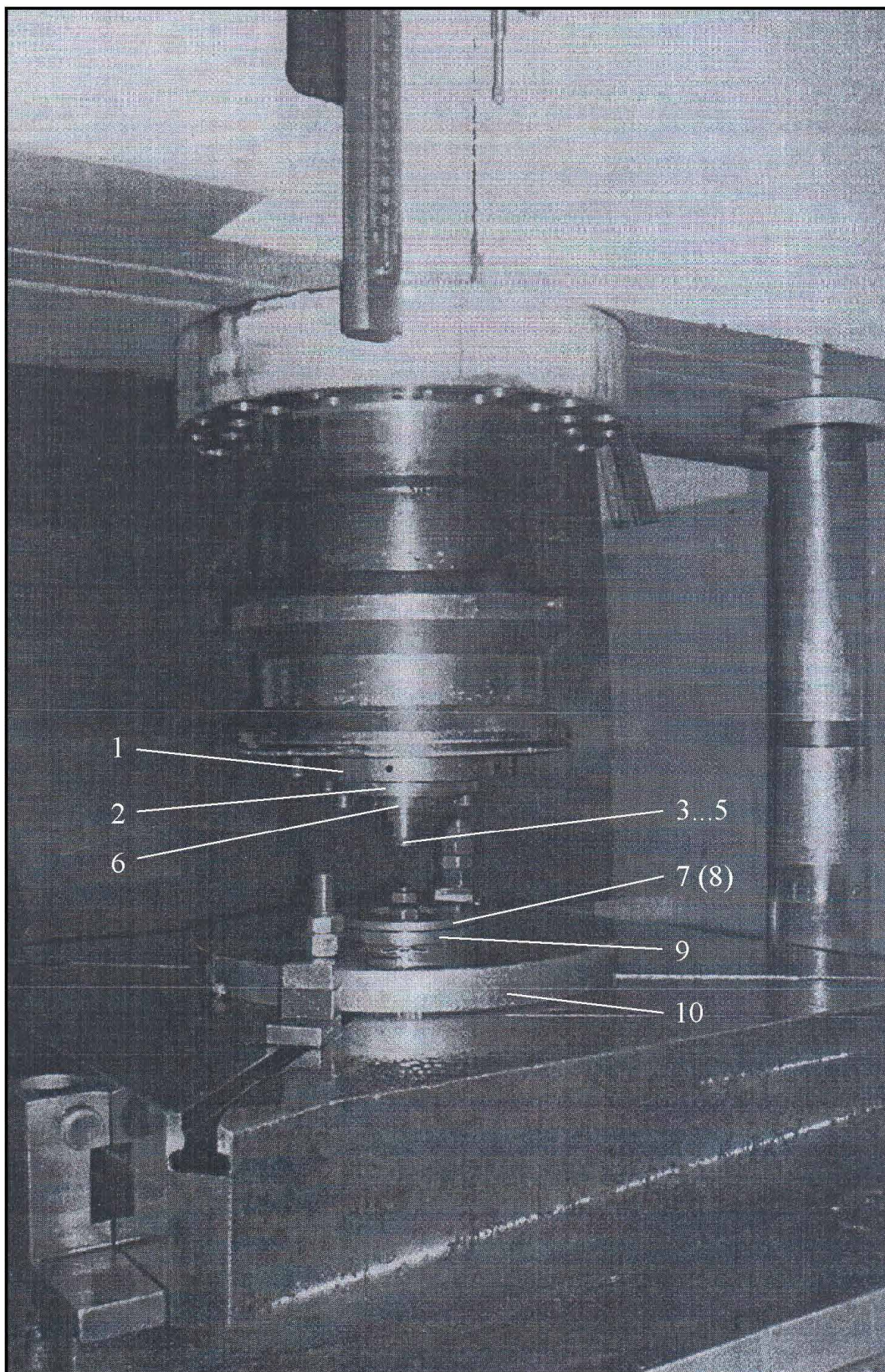


Рисунок 2.3 – Експериментальний пристрій

Пристрій працює таким чином. Перед початком роботи один із електродів-інструментів 3...5 вкручують у втулку 6 до упору, а електрод-заготовку 8 нерухомо закріплюють болтами відносно плити 10 за допомогою притискної шайби 7. Позиціонування електрода-заготовки відносно електрода-інструмента здійснюється за рахунок переміщення плити 10. Далі закривають герметичну камеру, вмикають електродвигун насосу робочої рідини, зварювальний випрямляч і ведуть процес РОД конічної порожнини в електроді-заготовці, яка моделює матрицю прес-форми. Процес здійснюють з використанням показаної на рисунку 2.1 технологічної схеми формоутворення. При цьому електрична дуга горить у міжелектродному зазорі в потужному гідродинамічному потоці робочої рідини, який відповідальний за стиснення дуги та за вилучення продуктів ерозії з робочої зони пристрою та верстата.

2.4. Особливості безпечної експлуатації експериментального електроерозійного копіювально-прошивного верстата для розмірної обробки прес-форм електричною дугою

З метою забезпечення безпечної праці на верстаті «Дуга-8Г» необхідно дотримуватися наступних правил безпеки:

- до обслуговування та роботи на верстаті допускаються особи, що пройшли технічний мінімум, інструктаж по техніці безпеки і пожежної безпеки на верстаті та вивчили його конструкцію;

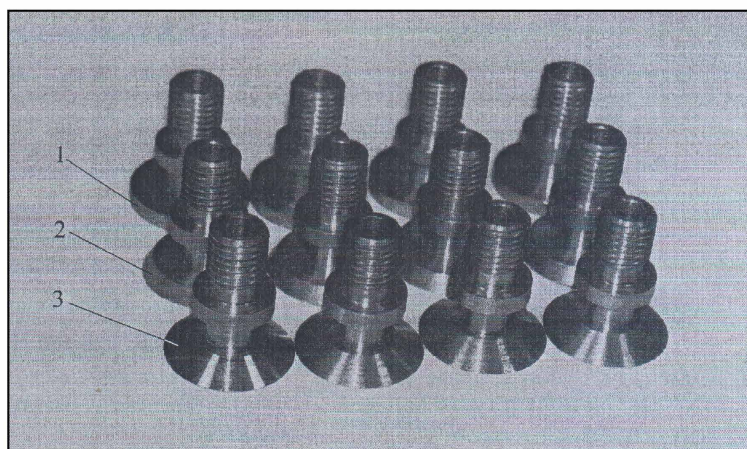
- робоча рідина подається в герметичну камеру верстата під технологічним тиском від 0,2 до 4 МПа. У зв'язку з цим забороняється відкривати (розгерметизовувати) камеру до моменту, поки в ній тиск не зменшиться до нуля. При цьому тиск робочої рідини в камері контролюється за манометром;

- верстат повинен бути заземлений. Стан заземлення перевіряється у відповідності з правилами технічної експлуатації електричних пристроїв;

- верстат повинен бути підключений до системи витяжної вентиляції з витратою не менш $100 \text{ м}^3/\text{год}$;
- на підлозі біля верстата повинен бути гумовий килимок;
- поблизу верстата необхідно мати вогнегасник, працездатність якого повинна періодично перевірятися;
- обтиральний матеріал, що просочений маслом, повинен зберігатися в металевому закритому ящику і після кінця роботи виноситися із приміщення;
- перед установленням електрода-інструмента та електрода-заготовки необхідно переконатися, що верстат вимкнено;
- після кінця роботи та при тривалій відсутності необхідно вимкнути верстат від мережі вхідним вимикачем;
- при виявленні напруги на корпусі верстата слід негайно вимкнути його та повідомити відповідальну особу;
- категорично забороняється відкривати двері розподільних щитків, шафи захисно-пускових апаратів та огороження під час роботи верстата.

2.5. Матеріали, зразки та вимірювальний інструмент

В якості матеріалу електрода-інструмента (на рисунку 2.4) використовувалася сталь 45.



1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 30^\circ$; 3 – $\alpha = 60^\circ$

Рисунок 2.4 – Комплект електродів-інструментів

Зразки (електрод-заготовки), які виконані у вигляді товстої шайби циліндричної форми, виготовлялися із сталі 45 (на рисунку 2.5).

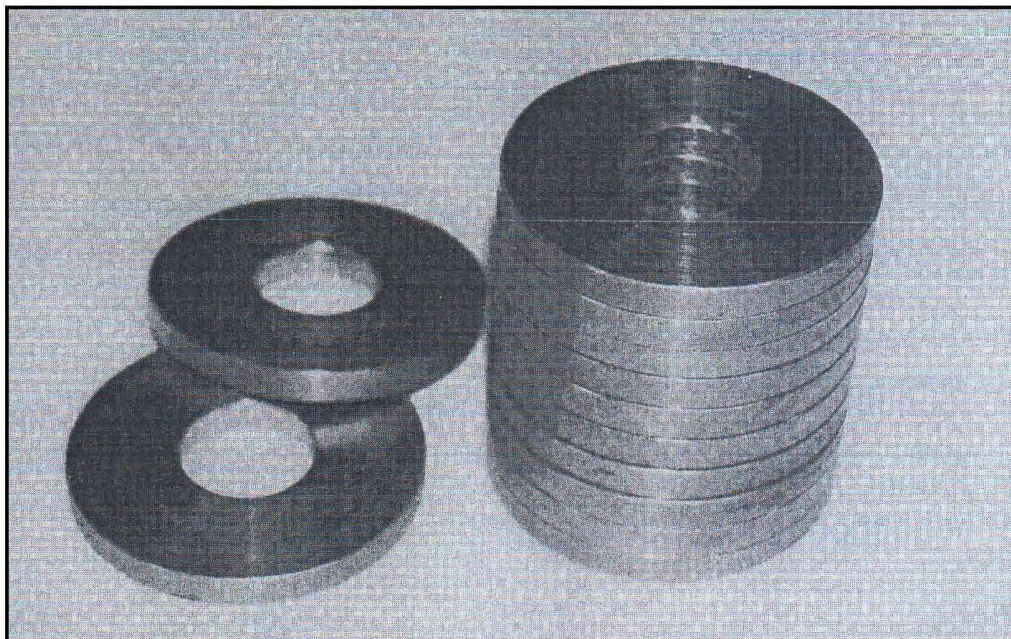
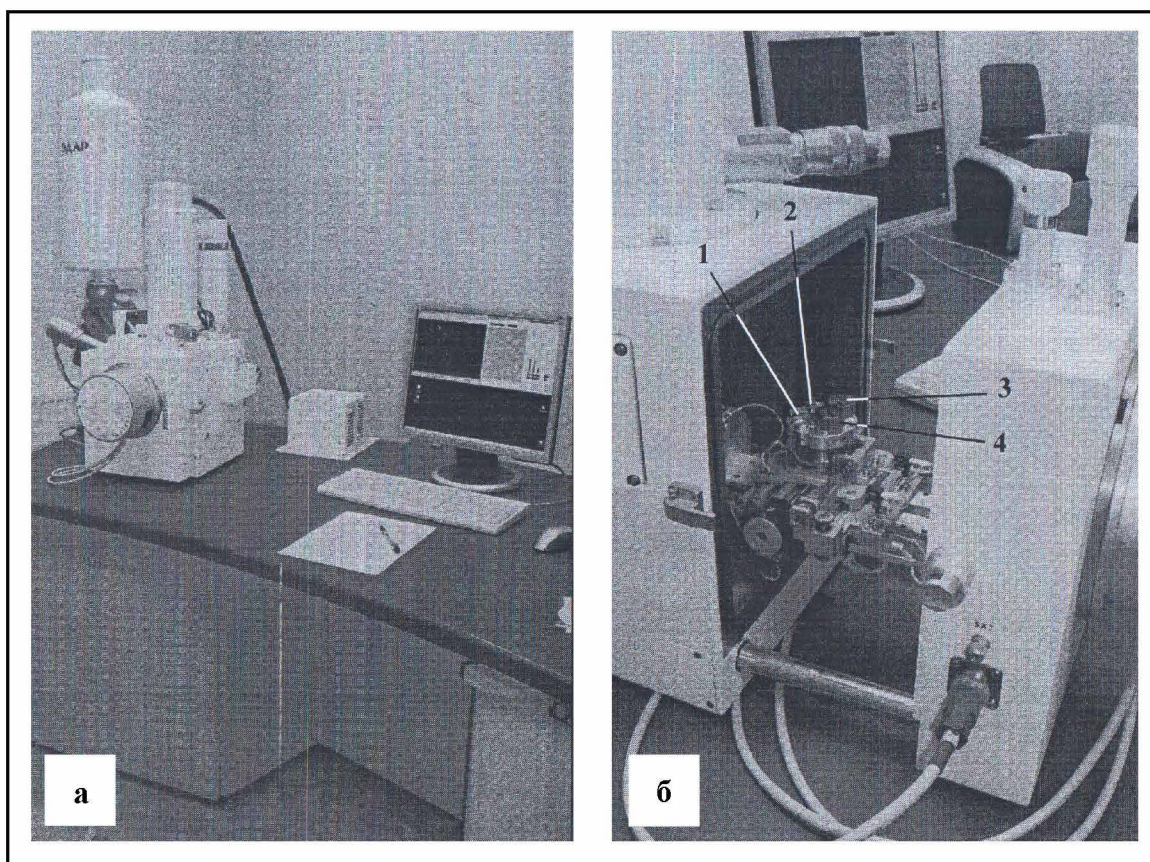


Рисунок 2.5 – Комплект електродів-заготовок

В якості контрольно-вимірювальних приборів та інструмента застосовувалися:

- для керування силою струму: кілоамперметр типу М367;
- для контролю напруги: вольтметр типу М4200; осцилограф, що запам'ятовує типу С8-12;
- для керування статичним тиском робочої рідини на вході в міжелектродний зазор: манометр типу М1-2-2;
- для вимірювання часу обробки: секундомір із ціною поділки 0,05 с;
- для вимірювання геометричних параметрів електрода-інструмента та електрода-заготовки: мікрометр типу МК ДСТУ 6407-05 із ціною поділки 0,01 мм; штангенциркуль типу ШЦ-11 ДСТУ 166-05 із ціною поділки 0,05 мм;
- для вимірювання лінійного переміщення шпинделя подачі електрода-інструмента: індикатор годинникового типу ИЧ-25;

- для вимірювання шорсткості поверхні після РОД: еталони електроерозійної шорсткості;
- для точного зважування електродів-інструментів та електродів-заготовок до та після РОД: ваги типу ВЛКТ-500г-М ГОСТ 19491-74 із ціною поділки 0,01 г;
- для вивчення кінчної поверхні після РОД використовували растровий електронний мікроскоп моделі РЕМ-106И виробництва Сумського ВАТ «SELMІ» (рис. 2.6) та біологічний мікроскоп типу МБУ-6.



а – загальний вид;

б – вид на предметний столик зі зразками 1 – 4

Рисунок 2.6 – Растровий електронний мікроскоп моделі РЕМ-106И

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД МАТРИЦІ ПРЕС-ФОРМИ

3.1. Продуктивність обробки

3.1.1. Розрахунок дисперсії

Розрахунок дисперсії дослідів здійснюємо за формулою (2.10). Дані для розрахунку вносимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані для розрахунку дисперсії дослідів

| Номер дубля | y_{0q} | $\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$ | Δy^2 |
|-------------|-------------------|--|-------------------------|
| 1 | 480 | 15 | 225 |
| 2 | 510 | 15 | 225 |
| 3 | 490 | 5 | 25 |
| 4 | 500 | 5 | 25 |
| | $\bar{y}_0 = 495$ | | $\sum \Delta y^2 = 500$ |

Тоді

$$S_y^2 = \frac{500}{3} = 166,7$$

і відповідно

$$S_y = 12,9.$$

3.1.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.12):

$$b_0 = \frac{1}{8}(590 + 295 + 611 + 305 + 719 + 329 + 740 + 350) = 492;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(590 - 295 + 611 - 305 + 719 - 329 + 740 - 350) = 173;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(590 + 295 - 611 - 305 + 719 + 329 - 740 - 350) = -9,1;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(590 + 295 + 611 + 305 - 719 - 329 - 740 - 350) = -42.$$

3.1.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.13):

$$S_{b_i}^2 = \frac{166,7}{8} = 20,84,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 4,56.$$

3.1.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.14):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 4,56 = 14,5.$$

У даному випадку для коефіцієнта регресії b_2 не виконується вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

3.1.5. Будування математичної моделі продуктивності обробки

Рівняння регресії, або математична модель продуктивності обробки матриці прес-форми набуде вигляду:

$$y_1 = 492 + 173x_1 - 42x_3. \quad (3.1)$$

3.1.6. Перевірка гіпотези про адекватність моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.16):

$$t^{розр} = \frac{(492 - 495)\sqrt{8}}{12,9} = 0,658.$$

Оскільки $0,658 < 3,18$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.1.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів на продуктивність процесу РОД матриці прес-форми M показано на рисунку 3.1.

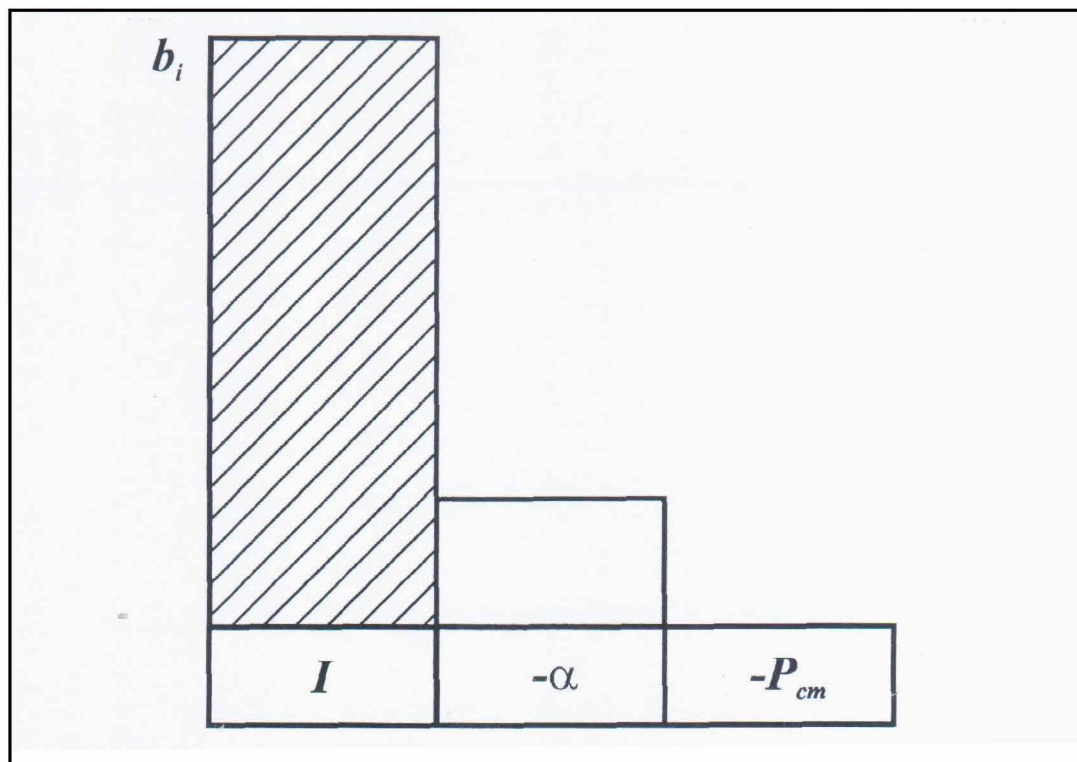


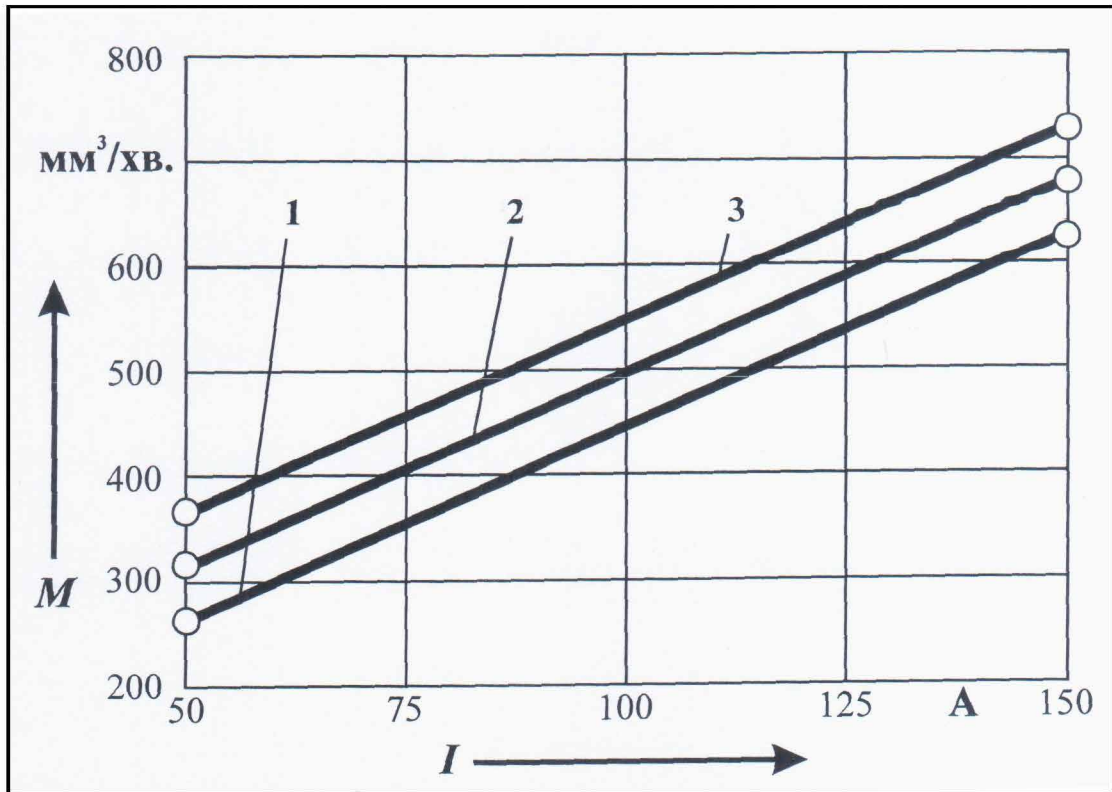
Рисунок 3.1 – Ступінь впливу факторів на продуктивність обробки M

Як бачимо, найбільший вплив на M виявляє сила технологічного струму I , із підвищенням якої продуктивність обробки збільшується. Останнє підтверджує теплову природу РОД. Таким чином, силу технологічного струму треба розглядати як основний керуючий фактор.

Вплив кута нахилу твірної електрода-інструмента α на M значно менший, але має суттєве значення. З його підвищенням продуктивність зменшується.

Виявлено, що в діапазоні варіювання факторів статичний тиск робочої рідини на вході потоку в МЕП P_{cm} на продуктивність обробки не впливає.

На рисунку 3.2 представлена залежність $M = f(I, \alpha)$, яка демонструє вплив факторів на продуктивність процесу РОД у вибраному факторному просторі.



1 – $\alpha = 60^\circ$; 2 – $\alpha = 30^\circ$; 3 – $\alpha = 0^\circ$

Рисунок 3.2 – Залежність продуктивності обробки M від I та α

В рамках експерименту продуктивність процесу РОД матриць прес-форми змінювалася у межах від 295 до 740 мм³/хв., що приблизно в 4-5 разів перевищує продуктивність електроімпульсної обробки для електродної пари «сталь 45 (ЕІ – «плюс») – сталь 45 (ЕЗ – «мінус»).

3.2. Питома продуктивність обробки

3.2.1. Розрахунок дисперсії дослідів

Розрахунок дисперсії дослідів здійснювали за формулою (2.10). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Дані для розрахунку дисперсії дослідів

| Номер дубля | y_{0q} | $\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$ | Δy^2 |
|-------------|--------------------|--|--------------------------|
| 1 | 4,80 | 0,30 | 0,09 |
| 2 | 5,70 | 0,60 | 0,36 |
| 3 | 4,90 | 0,20 | 0,04 |
| 4 | 5,00 | 0,10 | 0,01 |
| | $\bar{y}_0 = 5,10$ | | $\sum \Delta y^2 = 0,50$ |

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,50}{3} = 0,167,$$

відповідно

$$S_y = 0,408.$$

3.2.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.12):

$$b_0 = \frac{1}{8} (3,93 + 5,90 + 4,07 + 6,10 + 4,79 + 6,58 + 4,93 + 7,00) = 5,41;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (3,93 - 5,90 + 4,07 - 6,10 + 4,79 - 6,58 + 4,93 - 7,00) = -0,982;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(3,93 + 5,90 - 4,07 - 6,10 + 4,79 + 6,58 - 4,93 - 7,00) = -0,112;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(3,93 + 5,90 + 4,07 + 6,10 - 4,79 - 6,58 - 4,67 - 2) = -0,412.$$

3.2.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.13):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,167}{8} = 0,0209,$$

відповідно середньо квадратична помилка

$$S_{b_i} = 0,144.$$

3.2.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.14):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,144 = 0,458.$$

В даному випадку вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ не виконується для коефіцієнтів регресії b_2 , b_3 . Тому їх слід визнати статистично не значимими.

3.2.5. Будівництво математичної моделі питомої продуктивності обробки

Рівняння регресії, або математична модель питомої продуктивності обробки матриці прес-форми набуде вигляду:

$$y_2 = 5,41 - 0,982x_1. \quad (3.2)$$

3.2.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.16):

$$t^{розр} = \frac{|5,41 - 5,10|\sqrt{8}}{0,408} = 2,15.$$

Оскільки $2,15 < 3,18$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

3.2.7. Аналіз моделі

Із математичної моделі питомої продуктивності обробки матриці прес-форми (3.2) витікає, що M_a залежить тільки від сили технологічного струму I , із підвищенням якого M_a зменшується (на рисунку 3.3). Таким чином, сила струму є головний керуючий фактор.

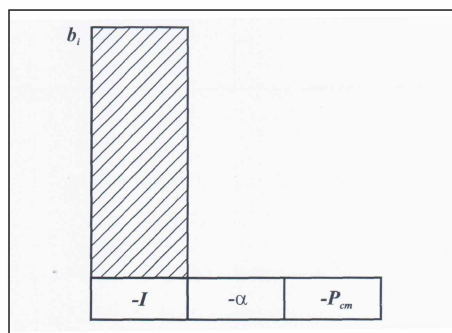


Рисунок 3.3 – Ступінь впливу факторів на питому продуктивність обробки M_a

Графік залежності $M_a = f(I)$ демонструється на рисунку 3.4.

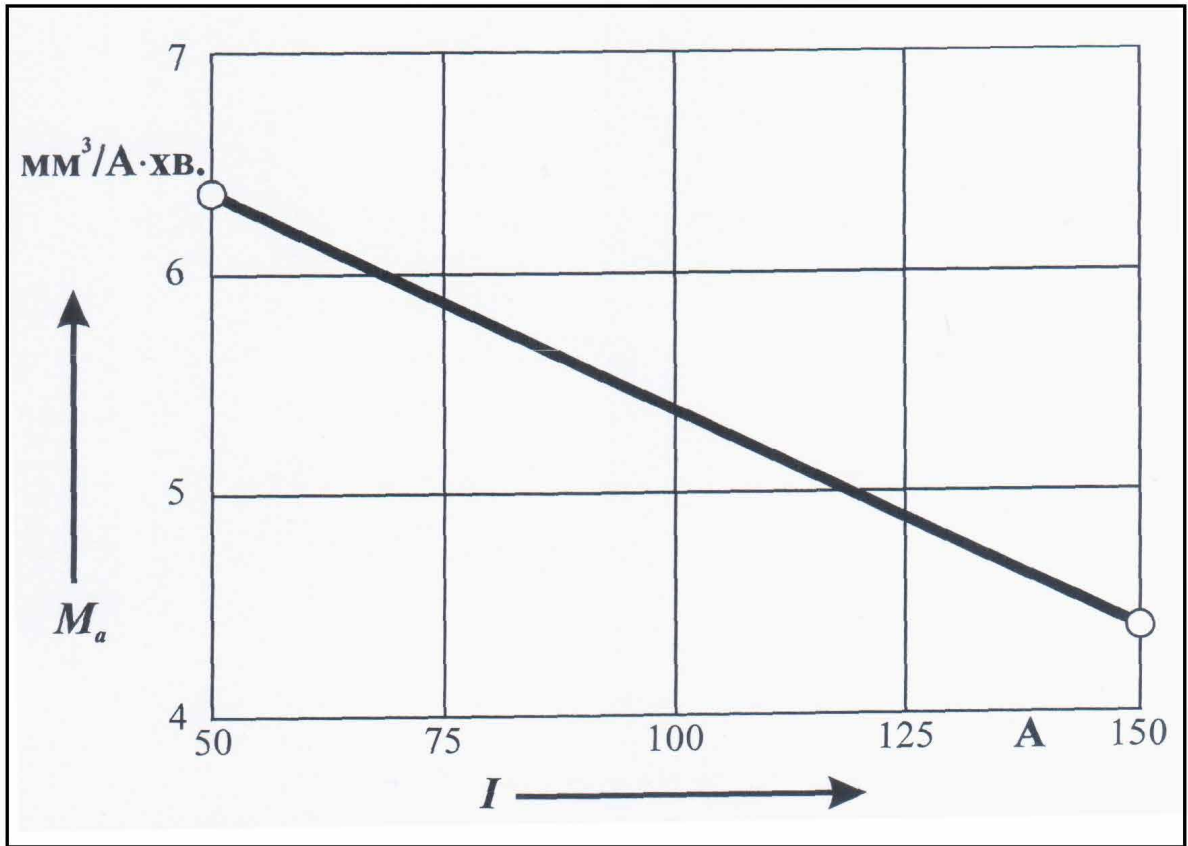


Рисунок 3.4 – Залежність питомої продуктивності обробки M_a від I

В умовах експерименту питома продуктивність процесу РОД змінювалася у межах від 4,1 до 7,00 $\text{мм}^3/\text{А}\cdot\text{хв}$.

3.3. Питома витрата електроенергії

3.3.1. Розрахунок дисперсії дослідів

Розрахунок дисперсії дослідів здійснювали за формулою (2.10). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Дані для розрахунку дисперсії досліду

| Номер дубля | y_{0q} | $\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$ | Δy^2 |
|-------------|---------------------|--|----------------------------|
| 1 | 11,04 | 0,32 | 0,1024 |
| 2 | 10,41 | 0,31 | 0,0961 |
| 3 | 10,83 | 0,11 | 0,0121 |
| 4 | 10,62 | 0,10 | 0,0100 |
| | $\bar{y}_0 = 10,72$ | | $\sum \Delta y^2 = 0,2206$ |

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,2206}{3} = 0,0735,$$

відповідно

$$S_y = 0,271.$$

3.3.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.12):

$$b_0 = \frac{1}{8} (13,45 + 8,99 + 13,00 + 8,70 + 11,00 + 8,10 + 10,70 + 7,60) = 10,19;$$

$$b_1 = \frac{1}{8} (13,45 - 8,99 + 13,00 - 8,70 + 11,00 - 8,10 + 10,70 - 7,60) = 1,845;$$

$$b_2 = \frac{1}{8} (13,45 + 8,99 - 13,00 - 8,70 + 11,00 + 8,10 - 10,70 - 7,60) = 0,192;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(13,45 + 8,99 + 13,00 + 8,70 - 11,00 - 8,10 - 10,70 - 7,60) = 0,842.$$

3.3.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.13):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,735}{8} = 0,00919,$$

відповідно

$$S_{b_i} = 0,0959.$$

3.3.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.16):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,0959 = 0,30.$$

У даному випадку для коефіцієнта регресії b_2 не виконується вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ тому його слід визнати статистично не значимим.

3.3.5. Будування математичної моделі питомої витрати електроенергії

Рівняння регресії, або математична модель питомої витрати електроенергії процесу РОД матриці прес-форми набуде вигляду:

$$y_3 = 10,19 + 1,845x_1 + 0,842x_3. \quad (3.3)$$

3.3.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стюдента за формулою (2.16):

$$t^{розр} = \frac{|10,19 - 10,72|\sqrt{8}}{0,271} = 5,53.$$

Табличне значення критерію Стюдента при $\alpha = 0,01$, $f = 3$ дорівнює 5,84. Оскільки $5,53 < 5,84$, гіпотеза про адекватність лінійної моделі не відхиляється.

3.3.7. Аналіз моделі

Ступінь впливу факторів на питому витрату електроенергії a при РОД матриці прес-форми показано на рисунку 3.5.

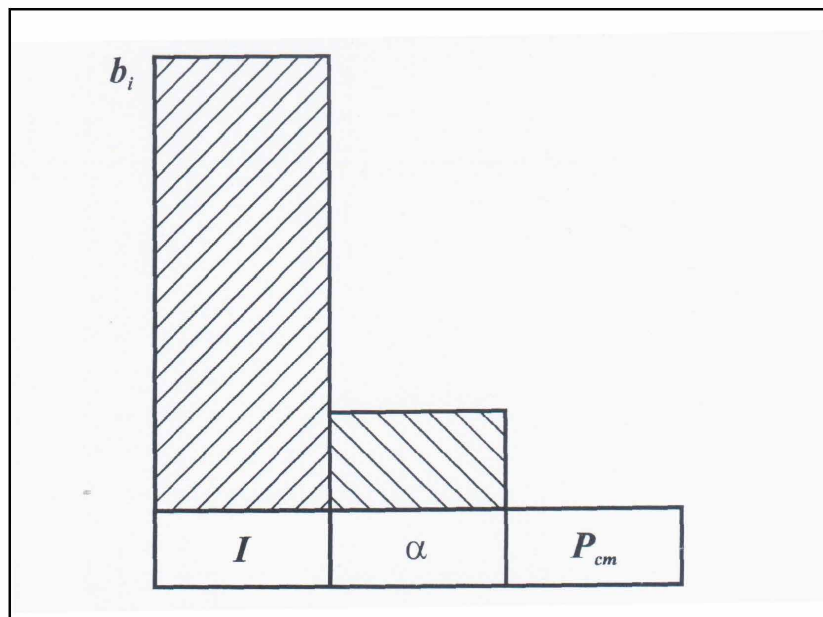
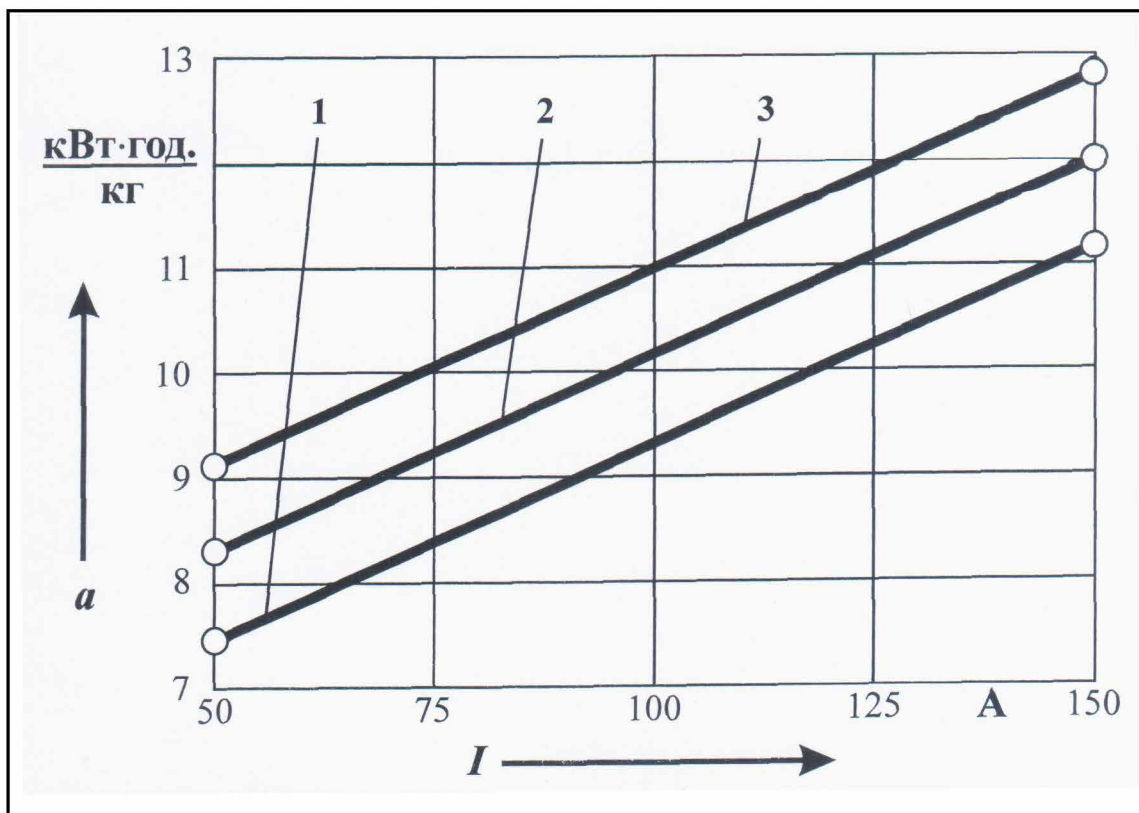


Рисунок 3.5 – Ступінь впливу факторів на питому витрату електроенергії a

Як бачимо, найбільш впливає на питому витрату електроенергії a фактор сила технологічного струму I , із підвищенням якого a збільшується. Саме тому I слід розглядати як головний керуючий фактор. Більш ніж у два рази з меншою силою на питому продуктивність впливає кут нахилу твірної поверхні електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α питома витрата електроенергії збільшується. Тиск робочої рідини на вході потоку в МЕР P_{cm} не впливає на питому витрату електроенергії.

Залежність $a = f(I, \alpha)$ демонструється на рисунку 3.6.



1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 30^\circ$; 3 – $\alpha = 60^\circ$

Рисунок 3.6 – Залежність питомої витрати електроенергії a від I та α

В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД змінювалася у межах від 7,60 до 13,45 $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$.

3.4. Висновки

1. Отримано математичну модель продуктивності процесу РОД матриці прес-форми. Показано, найбільший вплив на M виявляє сила технологічного струму I , із підвищенням якої продуктивність обробки збільшується. Останнє підтверджує теплову природу РОД. Таким чином, силу технологічного струму треба розглядати як основний керуючий фактор. Вплив кута нахилу твірної електрода-інструмента α на M значно менший, але має суттєве значення. З його підвищенням продуктивність зменшується. Виявлено, що в діапазоні варіювання факторів, статичний тиск робочої рідини на вході потоку в МЕР P_{cm} на продуктивність обробки не впливає. В рамках експерименту продуктивність процесу РОД матриці прес-форми змінювалася у межах від 295 до 740 мм³/хв., що приблизно в 4-5 разів перевищує продуктивність електроімпульсної обробки для електродної пари «сталь 45 (ЕІ – «плюс») – сталь 45 (ЕЗ – «мінус»)».

2. Отримано математичну модель питомої продуктивності процесу РОД матриці прес-форми M_a . Показано, що M_a залежить тільки від сили технологічного струму I , із підвищенням якого M_a зменшується. Таким чином, сила струму є головний керуючий фактор. В умовах експерименту питома продуктивність процесу РОД змінювалася у межах від 4,1 до 7,0 мм³/А·хв.

3. Отримано математичну модель питомої витрати електроенергії a . Виявлено, що найбільш впливає на питому витрату електроенергії a фактор сила технологічного струму I , із підвищенням якого a збільшується. Саме тому I слід розглядати як головний керуючий фактор. Більш ніж у два рази з меншою силою на питому продуктивність впливає кут нахилу твірної поверхні електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α питома витрата електроенергії збільшується. Тиск робочої рідини на вході потоку в МЕР P_{cm} не впливає на питому витрату електроенергії. В умовах

експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД змінювалася у
межах від 7,60 до 13,45 $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$.

Розділ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ТА ТОЧНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД МАТРИЦІ ПРЕС-ФОРМИ

4.1. Шорсткість обробленої поверхні

4.1.1. Розрахунок дисперсії досліду

Розрахунок дисперсії досліду здійснювали за формулою (2.10). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Дані для розрахунку дисперсії досліду

| Номер дубля | y_{0q} | $\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$ | Δy^2 |
|-------------|---------------------|--|----------------------------|
| 1 | 8,6 | 0,025 | 0,000625 |
| 2 | 8,7 | 0,075 | 0,005625 |
| 3 | 8,5 | 0,125 | 0,015625 |
| 4 | 8,7 | 0,075 | 0,005625 |
| | $\bar{y}_0 = 8,625$ | | $\sum \Delta y^2 = 0,0275$ |

Тоді

$$S_y^2 = \frac{0,0275}{3} = 0,00917,$$

відповідно

$$S_y = 0,0957.$$

4.1.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.12):

$$b_0 = \frac{1}{8}(9,5 + 4,8 + 10,2 + 7,6 + 11,0 + 6,0 + 12,5 + 7,0) = 8,575;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(9,5 - 4,8 + 10,2 - 7,6 + 11,0 - 6,0 + 12,5 - 7,0) = 2,225;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(9,5 + 4,8 - 10,2 - 7,6 + 11,0 + 6,0 - 12,5 - 7,0) = -0,75;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(9,5 + 4,8 + 10,2 + 7,6 - 11,0 - 6,0 - 12,5 - 7,0) = -4,4.$$

4.1.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.13):

$$S_{b_i}^2 = \frac{0,00917}{8} = 0,00115,$$

відповідно

$$S_{b_i} = 0,0338.$$

4.1.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.14):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,0338 = 0,107.$$

В даному випадку вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ виконується для усіх коефіцієнтів. Тому їх слід визнати статистично значимими.

4.1.5. Будування математичної моделі шорсткості бічної поверхні після РОД матриці прес-форми

Рівняння регресії, або математична модель шорсткості бічної поверхні після РОД матриці прес-форми Ra набуде вигляду:

$$y_4 = 8,575 + 2,225x_1 - 0,75x_2 - 4,4x_3. \quad (4.1)$$

4.1.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі (4.1) здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.16):

$$t^{розр} = \frac{|8,575 - 8,625| \sqrt{8}}{0,0957} = 1,48.$$

Оскільки $1,48 < 3,18$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

4.1.7. Аналіз моделі

Із математичної моделі шорсткості бічної поверхні матриці після РОД виходить, що остання залежить, головним чином, від кута нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента α (рис. 4.1), причому, із підвищенням

α шорсткість зменшується. Таким чином, фактор α треба розглядати як головний, керуючий.

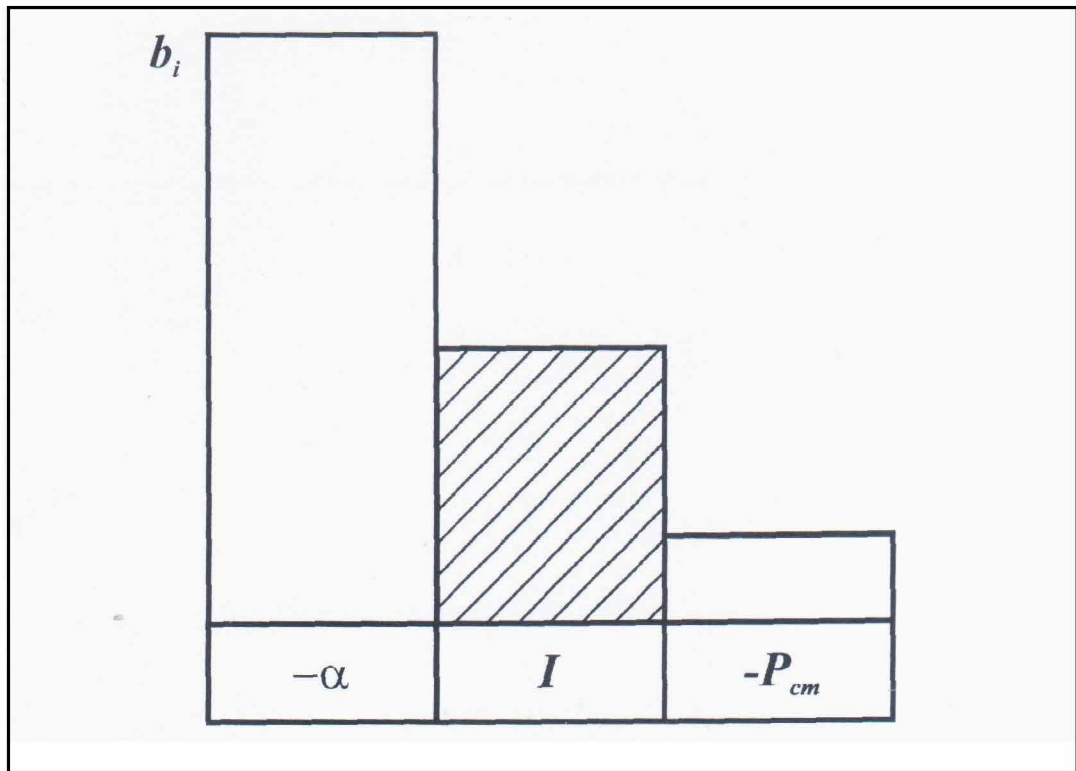
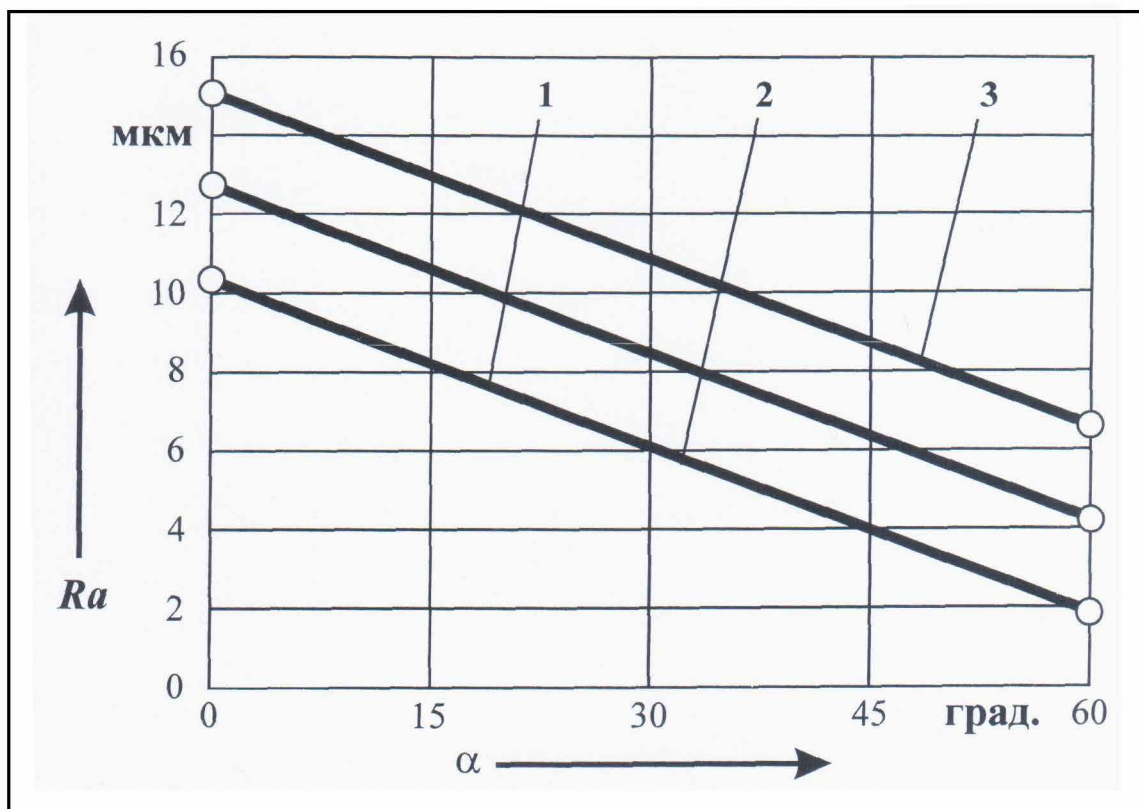


Рисунок 4.1 – Ступінь впливу факторів на шорсткість обробленої бічної поверхні Ra

Вплив сили струму I на Ra приблизно в 2 рази менший. Шорсткість поверхні – результат накладання одиночних лунок або «доріжок» від горіння розрядів. Відомо, що більшій силі струму відповідає більший діаметр лунки. Отже, більшій силі струму відповідає більша шорсткість поверхні після РОД.

Ще менший вплив на шорсткість поверхні виявляє статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор P_{cm} , із підвищенням якого Ra зменшується. Даний керуючий фактор є особливістю процесу РОД, порівняно з електроімпульсною обробкою, що розширює її технологічні можливості.

Залежність $Ra = f(\alpha, I)$ представлена на рисунку 4.2.



1 – $I = 50$ А; 2 – $I = 100$ А; 3 – $I = 150$ А

Рисунок 4.2 – Залежність шорсткості обробленої бічної поверхні Ra від α та I

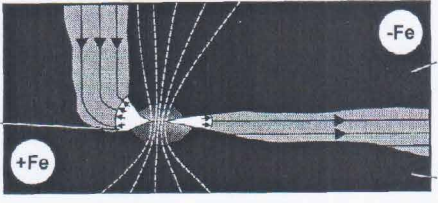
Для пояснення фізичного механізму залежності шорсткості бічної поверхні матриці прес-форми після РОД від кута нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента α звернемо увагу на послідовність формоутворення бічної поверхні при кутах $\alpha = 0^\circ$ та $\alpha = 60^\circ$, що були об'єктом дослідження даної роботи.

При куті $\alpha = 0^\circ$ (таблиця 4.2, а) збудженню електричної дуги на периферії електрода-інструмента в діелектричному середовищі передує контакт останнього із заготовкою. Внаслідок цього спостерігається інтенсивне нерівномірне контактне нагрівання поверхонь. Навколо місця контакту утворюється та зростає газова порожнина як продукт термічного руйнування робочої рідини. Аналогічне фізичне явище щодо утворення газової порожнини спостерігається при електрозварюванні під водою. Г. І.

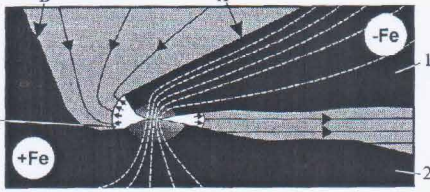
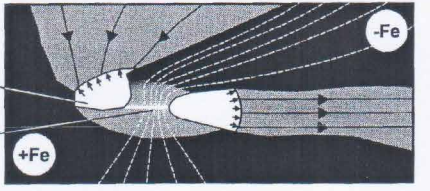
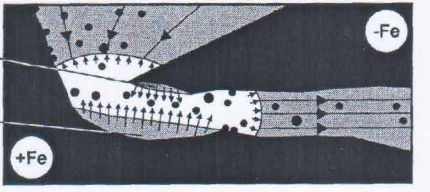
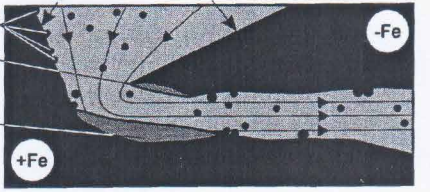
Лесков вказує на термічний механізм збудження зварювальної дуги після короткого замикання електродів, коли їх зіткнення в початковій фазі здійснюють під невеликим тиском. Крім того, Г. М. Мещеряковим в роботі [12], яка стосується електроерозійної обробки в умовах змінного струму, методом швидкісної кінозйомки (4000 кадрів/с) виявлено, що «... існує значна нерівномірність в нагріванні на самих перших стадіях, причому тепло виділяється головним чином на аноді. Це спостерігалось в експериментах з усіма комбінаціями металів Fe, Al, Cu, Pb, Sn, навіть коли контакти були з одного і того ж металу, за винятком Pb-Pb та Cu-Cu. Таким чином, матеріали електродів при РОД, також як і при електроімпульсній обробки, відповідають за уніполярність ерозії. Далі, після деякої експозиції електричного поля, відбувається суттєве підвищення температури в зоні контакту електродів, збудження електричної дуги та початок викиду розплаву із лунки (таблиця 4.2, б). Після розриву електричного контакту дуга гасне, але газова порожнина за інерцією продовжує розширяться, що приводить до зниження тиску в ній. Під впливом цього залишок розплаву у лунках закипає та вибухоподібно викидається за їх межі (таблиця 4.2, в). Частина розплаву, що викидається за потоком, або приварюються до поверхні протилежного електрода, або конденсується в металеві кульки та вилучається потоком із зони обробки. Друга частина розплаву, що викидається проти потоку, або теж приварюється до поверхні протилежного електрода, або під дією потоку конденсується та з часом повертається в бічному міжелектродному зазорі, щоб рухатися за потоком. Наявність в обмеженому двома паралельними стінками бічному зазорі продуктів ерозії, що рухаються за потоком (перша дуга) та проти потоку (друга дуга), сприяє утворенню електропровідних містків (таблиця 4.2, г), які є каталізатором збудження електричних дуг в ньому (таблиця 4.2, д). Наслідком горіння таких дуг є утворення на бічних поверхнях електродів відносно глибоких лунок (таблиця 4.2, ж), що збільшують шореткість бічної поверхні. Утворення дуг в бічному

міжелектродному зазорі підтверджується експериментально наявністю лунок на бічній поверхні електрода-інструмента при куті нахилу твірної $\alpha = 0^\circ$.

Таблиця 4.2 – Послідовність формоутворення шорсткості бічної поверхні матриці прес-форми при куті нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента $\alpha = 0^\circ$

| Позначення | Схема процесу | Пояснення до схеми |
|------------|---|---|
| а |  | <p>Контакт електродів 1, 2. Нерівномірне нагрівання місця стику. Початок утворення газової порожнини 3.</p> |
| б |  | <p>Збудження дуги 4. Розширення газової порожнини 3. Початок викиду розплаву із лунок.</p> |
| в |  | <p>Загасання дуги 4. Розширення газової порожнини 3. Закипання та викидання розплаву із лунок 5, 6.</p> |
| г |  | <p>Конденсація та приварювання часток 7, 8 до бічних поверхонь електродів 1, 2. Утворення електропровідних містків 9 в бічному зазорі. Нерівномірне нагрівання місця стику. Початок утворення газової порожнини 10.</p> |
| д |  | <p>Збудження дуги 11. Розширення газової порожнини 10. Початок викиду розплаву із лунок.</p> |
| ж |  | <p>Загасання дуги 11. Розширення газової порожнини 10. Закипання та викидання розплаву та утворення лунок 12, 13 на бічних поверхнях електродів 1, 3. Приварювання часток 14, 15 до бічних поверхонь.</p> |

Таблиця 4.3 – Послідовність формоутворення шорсткості бічної поверхні матриці прес-форми при куті нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента $\alpha = 60^\circ$

| Позначення | Схема процесу | Пояснення до схеми |
|------------|---|---|
| а |  | Контакт електродів 1, 2. Нерівномірне нагрівання місця стику. Початок утворення газової порожнини 3. |
| б |  | Збудження дуги 4. Розширення газової порожнини 3. Початок викиду розплаву із лунки. |
| в |  | Загасання дуги 4. Розширення газової порожнини 3. Закипання та викидання розплаву. Утворення дунок 5, 6. |
| г |  | Конденсація та приварювання часток 7 до бічної поверхні Б. Винесення потоком продуктів ерозії із міжелектродного проміжка без збудження дуг між поверхнями А і Б. |

При куті $\alpha = 60^\circ$ перші три стадії горіння електричної дуги на периферії електрода-інструмента (таблиця 4.3, а, б, в) відбуваються аналогічно першим трьом стадіям при куті $\alpha = 0^\circ$ (таблиця 4.2, а, б, в). Але далі частка розплаву, що викидається із лунки проти потоку, попадає в широкий простір між бічними поверхнями А та Б електродів (таблиця 4.3, в), де швидкість потоку значно менша швидкості потоку в бічному зазорі з паралельними стінками (таблиця 4.2, г). Тому час знаходження частки розплаву у даній зоні значно більший. Розплав встигає повністю конденсуватися та після повороту рухається з прискоренням у щілину, що звужується (таблиця 4.3, г). Час проходження продуктами ерозії щілини настільки малий, що імовірність утворення в ній електропровідного містка, а

отже електричної дуги, практично дорівнює нулю. Останнє підтверджується тим, що на поверхні *A* електрода-інструмента слідів дуги не виявлено. Таким чином, при $\alpha = 60^\circ$ поверхня *B* утворюється тільки за рахунок горіння дуги на периферійній частині електрода-інструмента між торцевими поверхнями електродів, а при $\alpha = 0^\circ$ - за рахунок послідовного горіння двох дуг: між торцевими поверхнями електродів та між бічними поверхнями електродів. В останньому випадку створюються умови для приварювання крупних продуктів ерозії до обробленої поверхні, що також підвищує шорсткість і підтверджується фрактографіями цієї поверхні при збільшенні $\times 32$, $\times 100$, $\times 500$ та $\times 1000$ (на рисунку 4.3) та фрактографіями її мікроструктури (на рисунку 4.4).

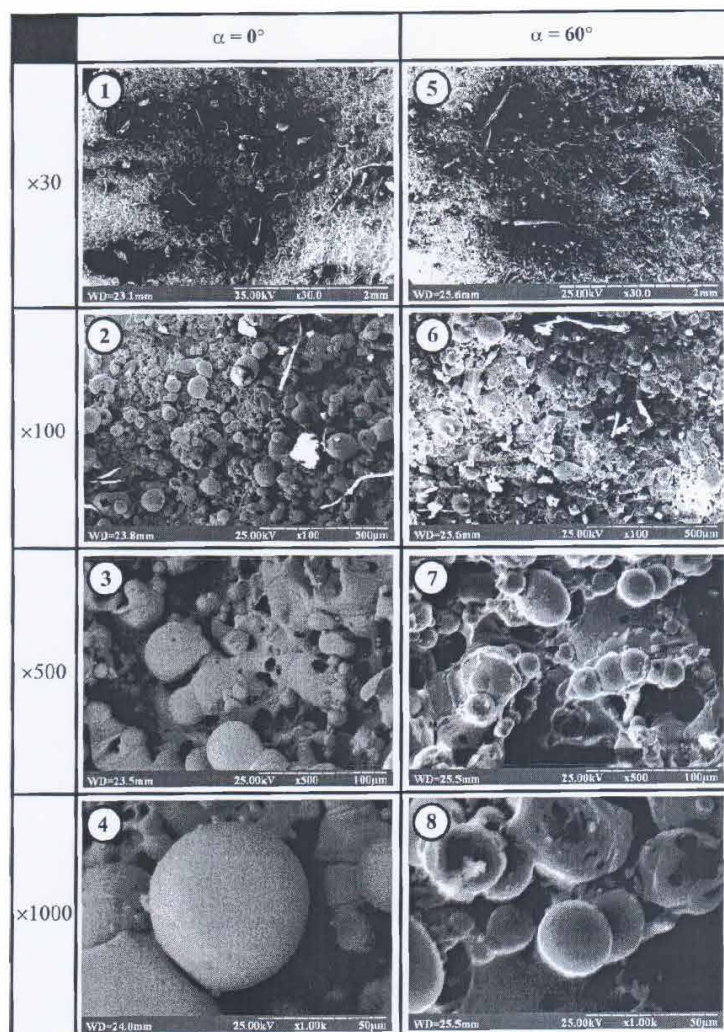
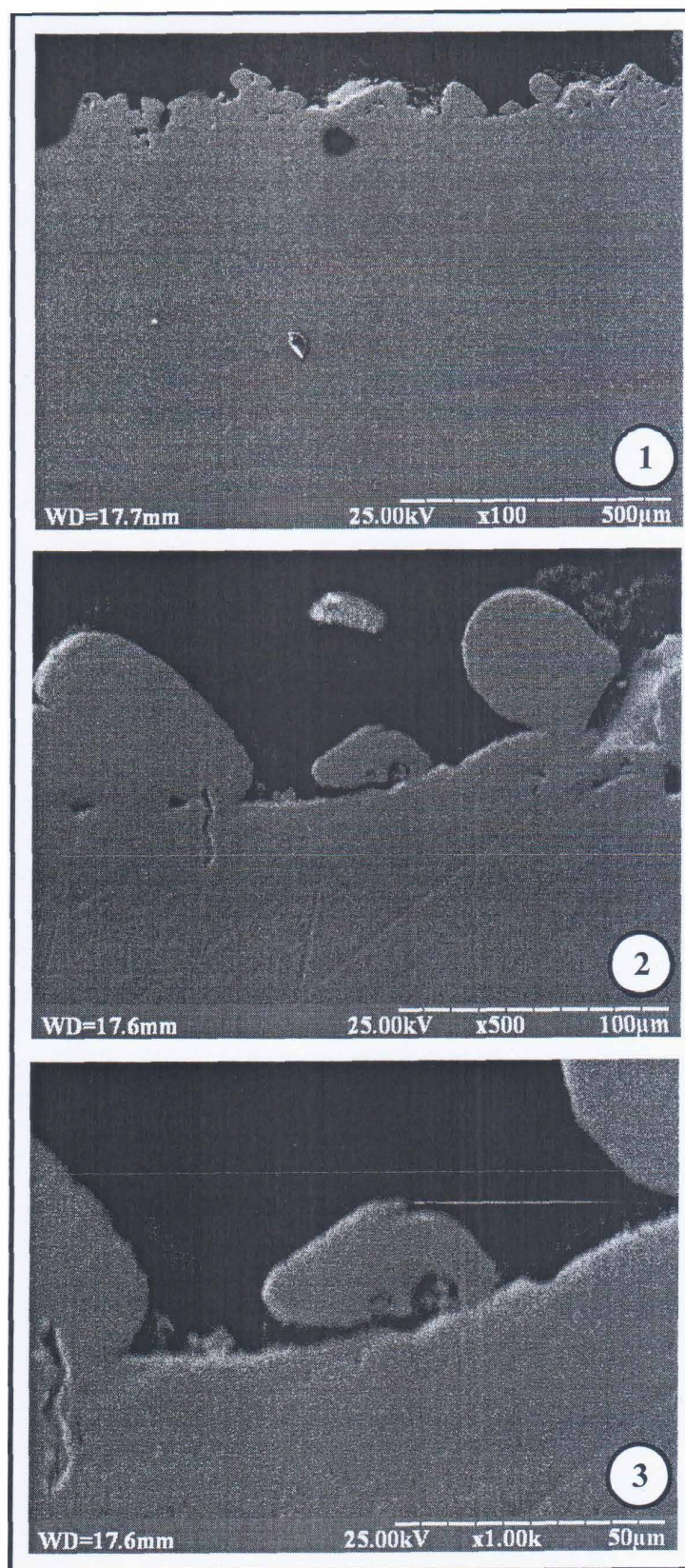


Рисунок 4.3 – Фрактографії бічних поверхонь після РОД при $\alpha = 0^\circ$ (1-4) та $\alpha = 60^\circ$ (5-8)



1 – $\times 100$; 1 – $\times 500$; 1 – $\times 1000$

Рисунок 4.4 – Фрактографії мікроструктури бічної поверхні матриці після РОД при $\alpha = 60^\circ$

За сукупністю цих умов формується шорсткість бічної поверхні матриці прес-форми після РОД при $\alpha = 60^\circ$ менша та більш рівномірна ніж шорсткість бічної поверхні при $\alpha = 0^\circ$.

В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні матриці змінювалася у межах від $Ra_{4,8}$ до $Ra_{12,5}$.

4.2. Кут нахилу бічної поверхні

4.2.1. Розрахунок дисперсії дослідів

Розрахунок дисперсії дослідів здійснювали за формулою (2.10). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Дані для розрахунку дисперсії дослідів

| Номер дубля | y_{0q} | $\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$ | Δy^2 |
|-------------|--------------------|--|-------------------------------|
| 1 | 34,5 | 2,4 | 5,76 |
| 2 | 32,1 | 1,0 | 1,00 |
| 3 | 33,0 | 0,1 | 0,01 |
| 4 | 33,1 | 0,3 | 0,09 |
| | $\bar{y}_0 = 33,1$ | | $\sum \Delta y^2 =$ = 6,86 |

Тоді

$$S_y^2 = \frac{6,86}{3} = 2,287,$$

відповідно

$$S_y = 1,512.$$

4.2.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.12):

$$b_0 = \frac{1}{8}(63,5 + 64,3 + 69,1 + 69,0 + 0 + 0 + 0 + 0) = 33,24;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(63,5 - 64,3 + 69,1 - 69,0 + 0 - 0 + 0 - 0) = -0,0875;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(63,5 + 64,3 - 69,1 - 69,0 + 0 + 0 - 0 - 0) = -1,2875;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(63,5 + 64,3 + 69,1 + 69,0 - 0 - 0 - 0 - 0) = 33,34;$$

4.2.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.13):

$$S_{b_i}^2 = \frac{2,287}{8} = 0,286,$$

ВІДПОВІДНО

$$S_{b_i} = 0,535.$$

4.2.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.14):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 0,535 = 1,701.$$

У даному випадку вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ не виконується для коефіцієнтів регресії b_1 та b_2 . Тому їх слід визнати статистично не значимими та вилучити із моделі.

4.2.5. Будування математичної моделі кута нахилу бічної поверхні

Рівняння регресії, або математична модель кута нахилу бічної поверхні β набуде вигляду

$$y_5 = 33,24 + 33,24x_3. \quad (4.2)$$

4.2.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

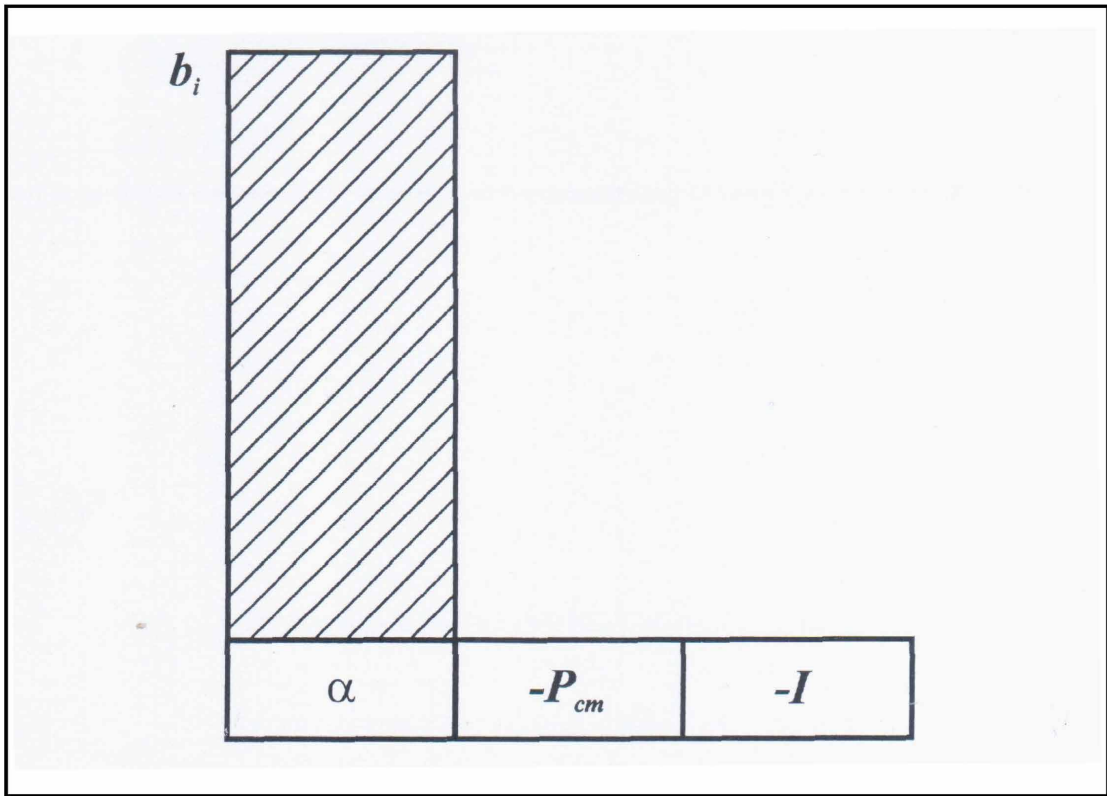
Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі (4.2) здійснювали за t -критерієм Стьюдента за формулою (2.16):

$$t^{розр} = \frac{|33,24 - 33,1|\sqrt{8}}{1,512} = 0,26.$$

Оскільки $0,26 < 3,18$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

4.2.7. Аналіз моделі

Із математичної моделі кута нахилу бічної поверхні β (4.2) виходить, що на нього лише впливає кут нахилу твірної поверхні електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α кут β підвищується (на рисунку 4.5). Отже, кут α – головний керуючий фактор.



Ри
су
но
к
4.5
–
Ст
уп
інь
вп
ли
ву

факторів на кут нахилу
бічної поверхні β

На рисунку 4.6 представлена залежність $\gamma_n = f(I, P_{cm})$, яка підтверджує вплив факторів на лінійний знос електрода-інструмента.

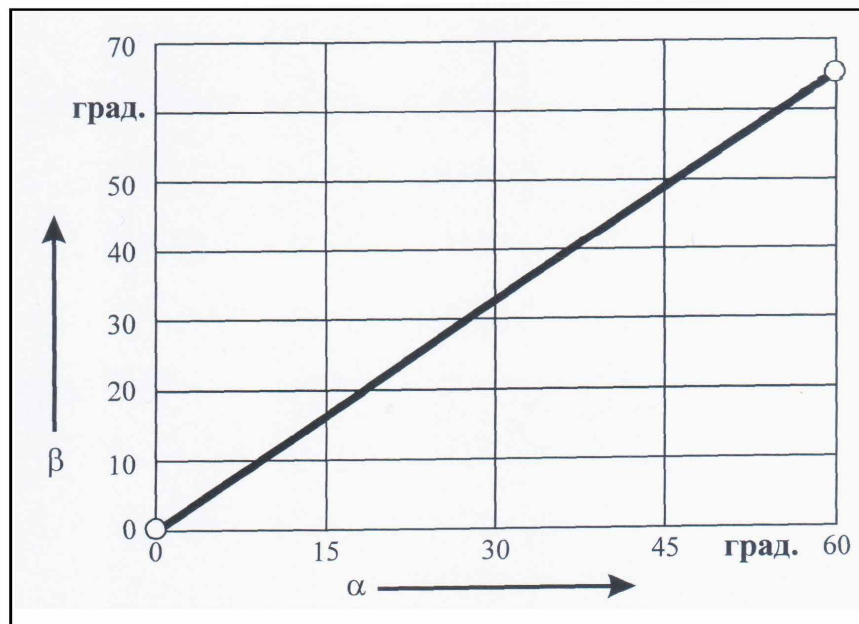


Рисунок 4.6 – Залежність кута нахилу бічної поверхні від α

В умовах експерименту кут нахилу бічної поверхні β змінювався у межах від $0,0^\circ$ до $69,1^\circ$.

4.3. Відносний лінійний знос електрода-інструмента

4.3.1. Розрахунок дисперсії дослідів

Розрахунок дисперсії дослідів здійснювали за формулою (2.10). Дані проміжного розрахунку наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Дані для розрахунку дисперсії дослідів

| Номер дубля | y_{0q} | $\Delta y = \left(y_{0q} - \bar{y}_0 \right)$ | Δy^2 |
|-------------|---------------------|--|---------------------------|
| 1 | 119 | 6,25 | 39,0625 |
| 2 | 108 | 4,75 | 22,5625 |
| 3 | 112 | 0,75 | 0,5625 |
| 4 | 112 | 0,75 | 0,5625 |
| | $\bar{y}_0 = 0,825$ | | $\sum \Delta y^2 = 62,75$ |

Тоді

$$S_y^2 = \frac{62,75}{3} = 20,917,$$

відповідно

$$S_y = 4,573.$$

4.3.2. Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі

Розрахунок коефіцієнтів регресії моделі здійснювали за формулою (2.12):

$$b_0 = \frac{1}{8}(116 + 120 + 151 + 150 + 90 + 82 + 89 + 89) = 110,9;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(116 - 120 + 151 - 150 + 90 - 82 + 89 - 89) = 0,625;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(116 + 120 - 151 - 150 + 90 + 82 - 89 - 89) = -8,875;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(116 + 120 + 151 + 150 - 90 - 82 - 89 - 89) = 23,375.$$

4.3.3. Розрахунок дисперсії оцінок

Розрахунок дисперсії оцінок здійснювали за формулою (2.13):

$$S_{b_i}^2 = \frac{20,917}{8} = 2,615,$$

відповідно

$$S_{b_i} = 1,617.$$

4.3.4. Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії

Розрахунок довірчого інтервалу коефіцієнтів регресії здійснювали за формулою (2.14):

$$\Delta b_i = 3,18 \cdot 1,617 = 5,142.$$

У даному випадку вимога $|b_i| \geq \Delta b_i$ не виконується для коефіцієнта регресії b_1 . Тому його слід визнати статистично не значимим та вилучити із моделі.

4.3.5. Будівання математичної моделі відносного лінійного зносу електрода-інструмента

Рівняння регресії, або математична модель відносного лінійного зносу сталевого електрода-інструмента γ_n при РОД матриці прес-форми набуде вигляду:

$$y_6 = 110,9 - 8,874x_2 + 23,375x_3. \quad (4.3)$$

4.3.6. Перевірка гіпотези про адекватність математичної моделі

Перевірку гіпотези про адекватність математичної моделі здійснювали за t -критерієм Стюдента за формулою (2.18):

$$t^{розр} = \frac{|110,9 - 112,75|\sqrt{8}}{4,573} = 1,14.$$

Оскільки $1,14 < 3,18$, гіпотеза про адекватність моделі не відхиляється.

4.3.7. Аналіз моделі

Як бачимо (на рисунку 4.7), найбільший вплив на відносний лінійний знос сталевого електрода-інструмента γ_n виявляє кут нахилу твірної поверхні електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α знос підвищується. Отже, кут α є головний керуючий фактор.

Вплив статичного тиску робочої рідини P_{cm} приблизно у три рази менший, але має істотне значення. З підвищенням P_{cm} лінійний знос зменшується.

На рисунку 4.7 представлена залежність $\gamma_n = f(\alpha, P_{cm})$, яка підтверджує вплив факторів на лінійний знос електрода-інструмента.

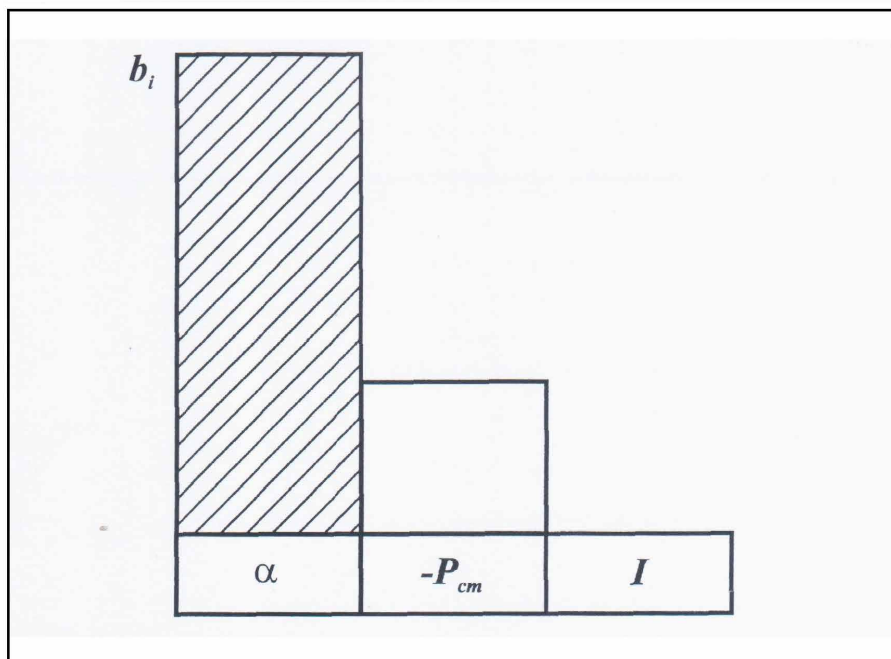
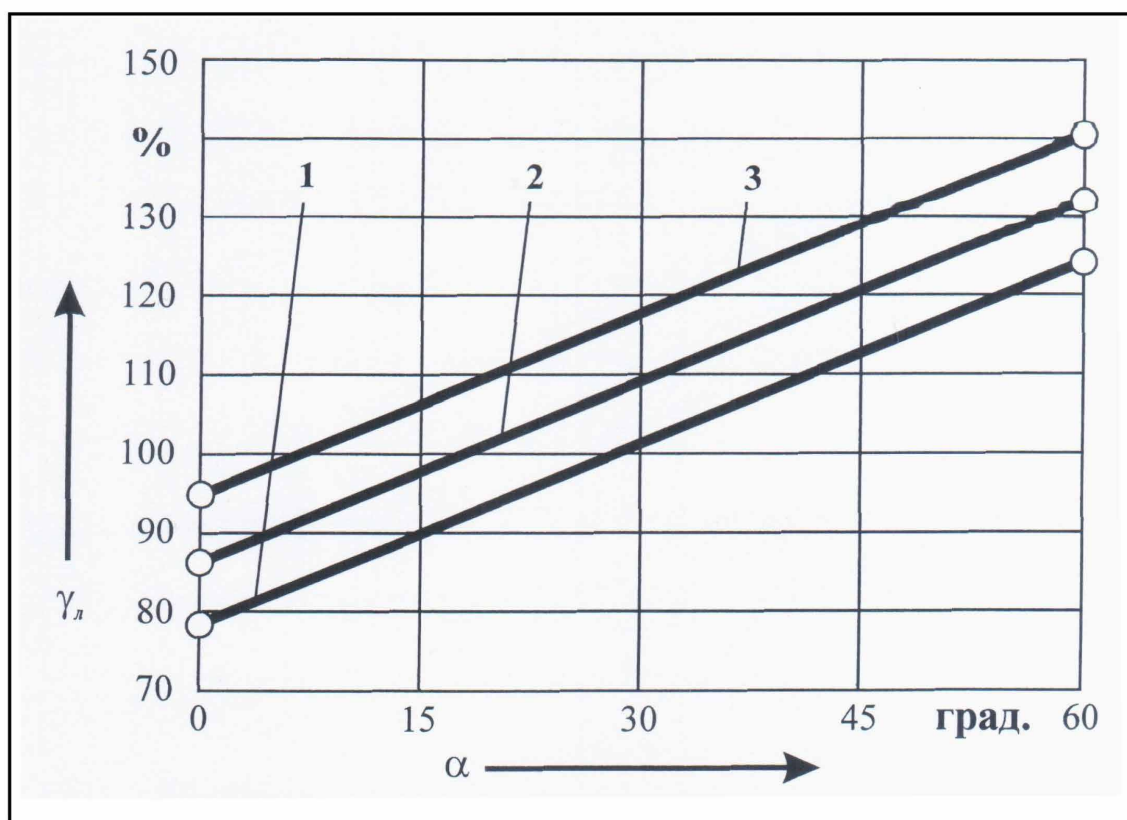


Рисунок 4.7 – Ступінь впливу факторів на відносний лінійний знос $EI \gamma_l$

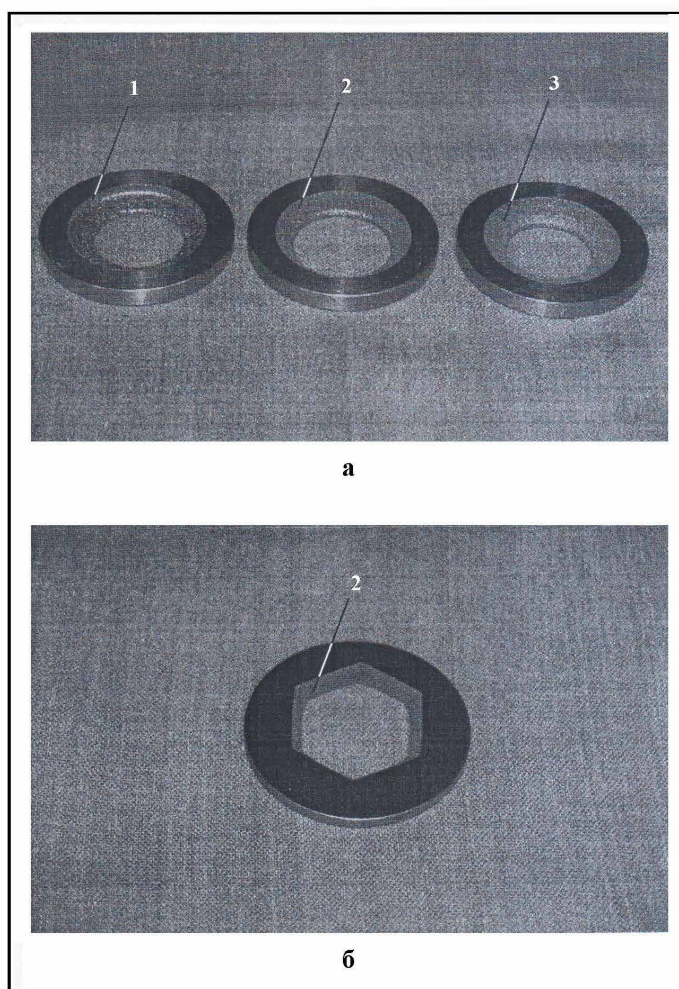


1 – $P_{cm} = 1,0$ МПа; 2 – $P_{cm} = 0,8$ МПа; 3 – $P_{cm} = 0,6$ МПа

Рисунок 4.8 – Залежність відносного лінійного зносу $EI \gamma_l$ від α та P_{cm}

В умовах експерименту відносний лінійний знос сталевого електрода-інструмента змінювався у межах від 82 до 151 %.

Таким чином, внаслідок експериментальних досліджень, отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД матриці прес-форми, які дозволяють прогнозувати їх та оптимізувати режим обробки не тільки циліндричних та конічних поверхонь (на рисунку 4.9, а), але й пірамідальних (на рисунку 4.9, б).



1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 30^\circ$; 3 – $\alpha = 60^\circ$

**Рисунок 4.9 – Форми бічної поверхні матриці прес-форми,
що отримані способом РОД**

4.4. Висновки

1. Отримано математичну модель шорсткості бічної поверхні після РОД матриці прес-форми. Показано, що шорсткість, головним чином, залежить від кута нахилу твірної електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α шорсткість зменшується. Таким чином, фактор α треба розглядати як головний, керуючий. Пояснено та описано фізичний механізм впливу кута α на Ra . Вплив сили струму I на Ra приблизно в 2 рази менший. Шорсткість бічної поверхні – результат накладання одиночних лунок або від горіння розрядів, що утворюються на периферії електрода-інструмента. Відомо, що більшій силі струму відповідає більший діаметр лунки. Отже, більшій силі струму відповідає більша шорсткість поверхні після РОД. Показано, що ще менший вплив на шорсткість поверхні виявляє статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор P_{cm} , із підвищенням якого Ra зменшується. Даний керуючий фактор є особливістю процесу РОД, порівняно з електроімпульсною обробкою, що розширює її технологічні можливості. В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні матриці змінювалася у межах від $Ra_{4,8}$ до $Ra_{12,5}$.

2. Отримано математичну модель кута нахилу бічної поверхні β . Показано, що на кут β впливає лише кут нахилу твірної поверхні електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α кут β підвищується. Отже, кут α – головний керуючий фактор. В умовах експерименту кут нахилу бічної поверхні β змінювався у межах від $0,0^\circ$ до $69,1^\circ$.

3. Отримано математичну модель відносного лінійного зносу сталевого електрода-інструмента γ_n . Показано, що найбільший вплив на знос γ_n виявляє кут нахилу твірної поверхні електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α знос підвищується. Отже, кут α є головний керуючий фактор. Вплив статичного тиску робочої рідини P_{cm} приблизно у три рази менший, але має істотне значення. З підвищенням P_{cm} лінійний знос зменшується. В

умовах експерименту відносний лінійний знос сталевого електрода-інструмента змінювався у межах від 82 до 151 %.

4. Вперше способом РОД отримано пірамідальну форму бічної поверхні матриці прес-форми з рівномірною шорсткістю обробленої поверхні.

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РОД ПРЕС-ФОРМ

Якісна оцінка економічної ефективності включає в себе бальне порівняння технологічних характеристик процесів РОД та електроімпульсної обробки прес-форм. Кращому показнику призначається бал «1», а гіршому – «0». Порівнювання здійснювалося за шести технологічними характеристиками.

Продуктивність обробки. В рамках експерименту продуктивність процесу РОД матриць прес-форми змінювалася у межах від 295 до 740 мм³/хв., що приблизно в 4-5 разів перевищує продуктивність електроімпульсної обробки (ЕІМО). Отже, РОД отримує 1 бал, ЕІМО – 0 балів.

Питома продуктивність обробки. В умовах експерименту питома продуктивність процесу РОД змінювалася у межах від 4,1 до 7, /0 мм³А·хв., а в умовах ЕІМО для даних умов шорсткості отриманої поверхні вона знаходиться приблизно на такому ж рівні. Тому за цим показником і РОД, і ЕІМО отримують по 1 балу.

Питома витрата електроенергії. В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД змінювалася у межах від 7,60 до 13,45 $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$, а в умовах ЕІМО для даних умов шорсткості отриманої поверхні вона знаходиться приблизно на такому ж рівні. Тому і за цим показником і РОД, і ЕІМО отримують по 1 балу.

Час обробки порожнини прес-форми. Процес РОД дозволяє прошивати порожнину в прес-формі одним електродом-інструментом зі швидкістю 1 мм/хв. В той же час, процес ЕІМО прошиває порожнину як найменш двома електродами-інструментами (для забезпечення потрібної точності формоутворення) зі швидкістю, що не перебільшує 0,25 мм/хв. За цим показником РОД отримує 1 бал, ЕІМО – 0 балів.

Вартість електродів-інструментів. В умовах експерименту електроди-інструменти для РОД порожнин з похилою бічною поверхнею виготовлялися із мало коштовної сталі 45 із розрахунку один електрод-інструмент на одну порожнину. При ЕІМО використовуються електроди-інструменти із коштовного електроерозійного графіту типу МПГ-7, та ще й з розрахунку два електрода-інструмента на одну порожнину. Саме тому, РОД отримує 1 бал, ЕІМО – 0 балів.

Результати порівнювального аналізу даних показників зведено до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Якісна оцінка економічної ефективності процесу РОД порожнин прес-форм з похилою бічною поверхнею

| Способи обробки | Бали показників | | | | | Сумарний бал |
|-----------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------|
| | Продуктивність обробки | Питома продуктивність обробки | Питома витрата електроенергії | Час обробки порожнини прес-форми | Вартість електродів-інструментів | |
| РОД | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 5 |
| ЕМО | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 |

Як бачимо, за бальною оцінкою процес РОД порожнин прес-форм є економічно більш ефективним (5 балів) порівняно з процесом ЕІМО (2 бали), а тому може бути рекомендований до промислового впровадження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Удосконалено технологію виготовлення матриці прес-форми шляхом формування бічної поверхні способом РОД з рівномірною шорсткістю та підвищеною точністю, за рахунок застосування запропонованої технологічної схеми формоутворення, при якій бічний міжелектродний зазор не утворюється. Виявлено взаємозв'язок технологічних характеристик процесу РОД з електричним і гідродинамічним режимами обробки та кутом нахилу твірної бічної поверхні електрода-інструмента. Отримано математичні моделі технологічних характеристик процесу РОД матриці прес-форми, які дозволяють прогнозувати їх та оптимізувати режим обробки.

2. Отримано математичну модель продуктивності процесу РОД матриці прес-форми. Показано, найбільший вплив на M виявляє сила технологічного струму I , із підвищенням якої продуктивність обробки збільшується. Останнє підтверджує теплову природу РОД. Таким чином, силу технологічного струму треба розглядати як основний керуючий фактор. Вплив кута нахилу твірної електрода-інструмента α на M значно менший, але має суттєве значення. З його підвищенням продуктивність зменшується. Виявлено, що в діапазоні варіювання факторів, статичний тиск робочої рідини на вході потоку в МЕП P_{cm} на продуктивність обробки не впливає. В рамках експерименту продуктивність процесу РОД матриці прес-форми змінювалася у межах від 295 до 740 мм³/хв., що приблизно в 4-5 разів перевищує продуктивність електроімпульсної обробки для електродної пари «сталь 45 (ЕІ – «плюс») – сталь 45 (ЕЗ – «мінус»)».

3. Отримано математичну модель питомої продуктивності процесу РОД матриці прес-форми M_a . Показано, що M_a залежить тільки від сили технологічного струму I , із підвищенням якого M_a зменшується. Таким чином, сила струму є головний керуючий фактор. В умовах експерименту питома продуктивність процесу РОД змінювалася у межах від 4,1 до 7,0 мм³/А·хв.

4. Отримано математичну модель питомої витрати електроенергії a . Виявлено, що найбільш впливає на питому витрату електроенергії a фактор сила технологічного струму I , із підвищенням якого a збільшується. Саме тому I слід розглядати як головний керуючий фактор. Більш ніж у два рази з меншою силою на питому продуктивність впливає кут нахилу твірної поверхні електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α питома витрата електроенергії збільшується. Тиск робочої рідини на вході потоку в МЕР P_{cm} не впливає на питому витрату електроенергії. В умовах експерименту питома витрата електроенергії процесу РОД змінювалася у межах від 7,60 до 13,45 $\frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}}$.

5. Отримано математичну модель шорсткості бічної поверхні після РОД матриці прес-форми. Показано, що шорсткість, головним чином, залежить від кута нахилу твірної електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α шорсткість зменшується. Таким чином, фактор α треба розглядати як головний, керуючий. Пояснено та описано фізичний механізм впливу кута α на Ra . Вплив сили струму I на Ra приблизно в 2 рази менший. Шорсткість бічної поверхні – результат накладання одиночних лунок або від горіння розрядів, що утворюються на периферії електрода-інструмента. Відомо, що більшої сили струму відповідає більший діаметр лунки. Отже, більшої сили струму відповідає більша шорсткість поверхні після РОД. Показано, що ще менший вплив на шорсткість поверхні виявляє статичний тиск робочої рідини на вході потоку в міжелектродний зазор P_{cm} , із підвищенням якого Ra зменшується. Даний керуючий фактор є особливістю процесу РОД, порівняно з електроімпульсною обробкою, що розширює її технологічні можливості. В умовах експерименту шорсткість бічної поверхні матриці змінювалася у межах від $Ra_{4,8}$ до $Ra_{12,5}$.

6. Отримано математичну модель кута нахилу бічної поверхні β . Показано, що на кут β впливає лише кут нахилу твірної поверхні електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α кут β підвищується. Отже, кут α -

головний керуючий фактор. В умовах експерименту кут нахилу бічної поверхні β змінювався у межах від $0,0^\circ$ до $69,1^\circ$.

7. Отримано математичну модель відносного лінійного зносу сталевого електрода-інструмента γ_n . Показано, що найбільший вплив на знос γ_n виявляє кут нахилу твірної поверхні електрода-інструмента α , причому, із підвищенням α знос підвищується. Отже, кут α є головний керуючий фактор. Вплив статичного тиску робочої рідини P_{cm} приблизно у три рази менший, але має істотне значення. З підвищенням P_{cm} лінійний знос зменшується. В умовах експерименту відносний лінійний знос сталевого електрода-інструмента змінювався у межах від 82 до 151 %.

8. Вперше способом РОД отримано пірамідальну форму бічної поверхні матриці прес-форми з рівномірною шорсткістю обробленої поверхні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Verfahren zur elektroerosiven Bearbeitung von Metallen: pat. 621279 Schweiz, B 23 P 1/06. / Nosulenko V. I., Mescheryakov G. N.; inhaber Kirovogradsky Institut Selskokhozyaistvtmogo Mashinostroenia. Anmeldungsdatum 12.07.1977; Patentschrift veröffentlicht 30.01.
2. Meshcheriakov G. Physical and Technological of Arc Dimensional Machining / Meshcheriakov G., Nosulenko V., Meshcheriakov N., Bokov V. // Process and Metal Transfer. Annals of the CIRP Vol. 37/1/1988, p. 209-212.
3. Боков В. М. Оброблюваність матеріалів електричною дугою. Монографія / В. М. Боков, О. Ф. Сіса. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2013. – 172 с.
4. Боков В. М. Розмірна обробка електричною дугою кувальних штампів. Монографія. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс – ЛТД», 2012. – 178 с.
5. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТУУ «КПІ». – Київ, 1999. – 38 с.
6. Боков В. М. Розмірне формоутворення поверхонь електричною дугою. – Кіровоград: Поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс-ЛТД», 2002. – 300 с.
7. Попова М. І. Прогнозування технологічних характеристик та інтенсифікація процесу розмірної обробки електричною дугою складно профільних отворів: дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 / Попова Маргарита Іванівна. – Кіровоград, 2001. – 182 с.
8. Мещеряков Г. Н. Электрообработка глубоких отверстий. Труды НИИТ. – М.: Машигиз, 1951. – 50 с.

9. Мещеряков Г. Н. Обработка металлов импульсами электрического тока: Дис... д-ра техн. наук. – Киев: Институт электросварки АН УССР, 1960. – 420 с.
10. Боков В. М. Фізичні процеси спецтехнологій. Експериментальні дослідження. Збірник статей: навчальний посібник / В. М. Боков. – Кропивницький: ПП «Ексклозив-Систем», 2022. – 625 с.
11. Боков В. М. Технологія розмірної обробки дугою. Історичний нарис, верстати: навчальний посібник / В. М. Боков. – Кропивницький: ПП «Ексклозив-Систем», 2020. – 316 с.
12. Electro-physical Processes in Electric Pulse Metal Cutting from the View of Efficiency and Electrode Wear / G. N. Meshcheriakov. – Process and Metal Transfer of the CIRP Vol 18, 1970, p. 491-499.
13. Kamenskikh, A.A., Muratov, K.R., Shlykov, E.S., Sidhu, S.S., Mahajan, A., Kuznetsova, Y.S., Ablyaz, T.R.: Recent trends and developments in the Electrical Discharge Machining Industry: A review. J. Manuf. Mater. Process. 7, 204 (2023), p. 204. <https://doi.org/10.3390/jmmp7060204>.
14. Nugroho, B., Yahya, A., Mat Sidek, A. R., Andromeda, T., Khamis, N. H., Current Pulse Generated by Spark of Electrical Discharge Machining (EDM). IOP Conference Series: Journal of Physics, 2020. IOP Publishing, 1529:042109. doi:10.1088/1742-6596/1529/4/042109.
15. Lu, B., Tang, K., Wu, M.X., Yang, Y., Yang, G.: Mechanism of electropulsing treatment technology for flow stress of metal material: A review. Alloys 2024, 3(1), pp. 96-125. <https://doi.org/10.3390/alloys3010006>.
16. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
17. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.