

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Механіко-технологічний факультет  
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки

«Допущено до захисту»  
Зав. кафедри ММР  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**  
**на тему:**  
**«Розмірна обробка електричною дугою деталей зі складною**  
**поверхнею»**  
**«Dimensionalelectricalarc machining of partswith complexsurfaces»**

Виконав здобувач вищої освіти  
II курсу, групи ПМ-23М-2  
спеціальності 131  
«Прикладна механіка»,  
\_\_\_\_\_ Біктіміров Є. О.

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

Рецензент  
\_\_\_\_\_

м. Кропивницький 2024

**Центральноукраїнський національний технічний університет**

Факультет: Механіко-технологічний

Кафедра: машинобудування, мехатроніки і робототехніки

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри ММР  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА  
30 серпня 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ  
Біктімірову Євгену Олександровичу**

1. Тема роботи: «Розмірна обробка електричною дугою деталей зі складною поверхнею».
2. Керівник роботи: Шмельов Віталій Миколайович, канд. техн. наук, доцент.
3. Строк подання роботи до захисту: 25 грудня 2024 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.  
Мета: дослідження технологічних характеристик процесу та розробка технології для розмірної обробки електричною дугою деталей зі складною поверхнею.  
Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методику експериментальних досліджень; виконати експериментальні дослідження та провести аналіз отриманих результатів; розробити технологію для розмірної обробки електричною дугою деталей зі складною поверхнею; виконати розрахунки з економічної частини.
5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
№ 5 «Економічна частина»	Савеленко Г. В., к. т. н., доц.	04.09.2024 р.	20.12.2024 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	15.09.2024 р.	
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу	02.10.2024 р.	
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові	25.11.2024 р.	
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту	12.12.2024 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	15.12.2024 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	22.12.2024 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	25.12.2024 р.	

Дата видачі завдання

30 серпня 2024 р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_ Шмельов В. М.

Завдання прийнято до виконання

30 серпня 2024 р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_ Біктіміров Є. О.

## АНОТАЦІЯ

Біктіміров Є. О. «Розмірна обробка електричною дугою деталей зі складною поверхнею», спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПІ - «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024 рік.

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

Розроблено технологію для розмірної обробки електричною дугою деталей зі складною поверхнею, що дозволити обробляти деталі зі складною поверхню організувавши оптимальні гідродинамічні умови обробки.

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

**розмірна обробка електричною дугою, електроерозійна обробка, складна поверхня, електрод-інструмент, технологічні характеристики процесу розмірної обробки електричною дугою**

## ANNOTATION

BIKTIMIROV YEVHENII. "Dimensional electric arc machining of parts with complex surfaces", specialty 131 "Applied Mechanics", EP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The aim of the work is to study the technological characteristics of the process and develop a technology for dimensional processing of parts with a complex surface by electric arc.

A technology for dimensional processing of parts with a complex surface by electric arc has been developed, which allows processing parts with a complex surface by organizing optimal hydrodynamic processing conditions.

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

**dimensional processing by electric arc, electrical discharge machining, complex surface, electrode-tool, technological characteristics of process of dimensional processing by electric arc.**

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ПЕРСПЕКТИВИ ТА ОБЛАСТІ РАЦІОНАЛЬНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ ДЕТАЛЕЙ .....	8
1.1. Штампування.....	8
1.2. Лазерне різання.....	11
1.3. Плазмове різання.....	14
1.4. Електроерозійна обробка.....	17
1.5. Розмірна обробка електричною дугою .....	20
РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень.....	26
2.2. Обладнання, пристрої, апаратура.....	28
2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів.....	29
2.4. Охорона праці при роботі на верстатах РОД.....	32
2.5. Висновки.....	33
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД .....	34
3.1. Визначення технологічних характеристик процесу.....	34
3.2. Висновки.....	41
РОЗДІЛ 4. РОД ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ .....	43
4.1. РОД деталей складного профілю .....	43
4.2. Висновки.....	47
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД .....	48
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67

## ВСТУП

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

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

Особливістю способу РОД є необхідність забезпечення в зоні обробки оптимальні гідродинамічні умови течії робочої рідини, що стискають електричну дугу для розмірної обробки.

Проте, при обробці складних поверхонь електрод інструментом традиційної форми в зоні обробки не можливо створити оптимальні умови течії робочої рідини, в наслідок чого у зоні обробки утворюється електрична дуга за своїми характеристиками наближена до звичайної зварювальної дуги, що не може виконувати розмірної обробки.

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

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

**Задачі дослідження:**

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД та визначення меж його раціонального застосування;
2. Дослідження особливостей формування оптимальних гідродинамічних умов обробки деталей зі складною поверхнею.
3. Розробка технології обробки деталей зі складною поверхнею;
4. Визначення впливу фізико-технологічних характеристик процесу РОД, на його кількісні та якісні показники.

**Практичне значення отриманих результатів**

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

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

**Особистий внесок здобувача**

Постановка мети і задач досліджень; дослідження особливостей формування оптимальних гідродинамічних умов обробки деталей зі складною поверхнею; експериментальні дослідження технологічних характеристик процесу РОД, та аналіз отриманих результатів.

**Апробація результатів та публікації.**

Брав участь у LVIII науково-технічна конференція здобувачів вищої освіти за результатами якої опубліковано 1 тези у збірнику тез доповідей здобувачів вищої освіти LVIII науково-технічної конференції «Наука виробництву, 2024» за підсумками проведення «Дня науки – 2024».

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

В усіх галузях машинобудування для отримання різноманітних деталей широко застосовують листовий прокат. Питома вага листових деталей в машинобудуванні становить 60...80% (і навіть 95...98% при виготовленні предметів народного споживання) [3]. Це пояснюється тим, що зварні і штамповані конструкції з листових деталей на 30...50% легші, ніж отримані із сортового прокату та литва. Значна частина деталей виготовляється із застосуванням тільки розділових операцій. Залежно від характеристик оброблюваного матеріалу, вимог до отримуваної деталі та конкретних умов виробництва застосовують різні способи виконання розділових операцій: штампування, механічну обробку, газове різання, лазерне різання, електророзрядну обробку (плазмова та електроерозійна) і т. і.

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

### **1.1. Штампування**

Листове штампування - це операція обробки металів тиском, в результаті якої відбувається повне або часткове відділення однієї частини заготовки від іншої. До розділових операцій належать відрізка (різання), вирубання, пробивання, надрізка, розрізання, обрізка, зачистка, проколка, висічка.

Діапазон розмірів штампованих листових деталей дуже великий – за габаритними розмірами від кількох міліметрів до 6...7 м; за товщиною від десятих долей міліметра до 100 мм і більше. Точність виготовлення деталей досягає при звичайному штампуванні 12-14-го квалітетів, а при зачищенні, чистовому вирубванні і калібруванні 9-11-го квалітетів точності.

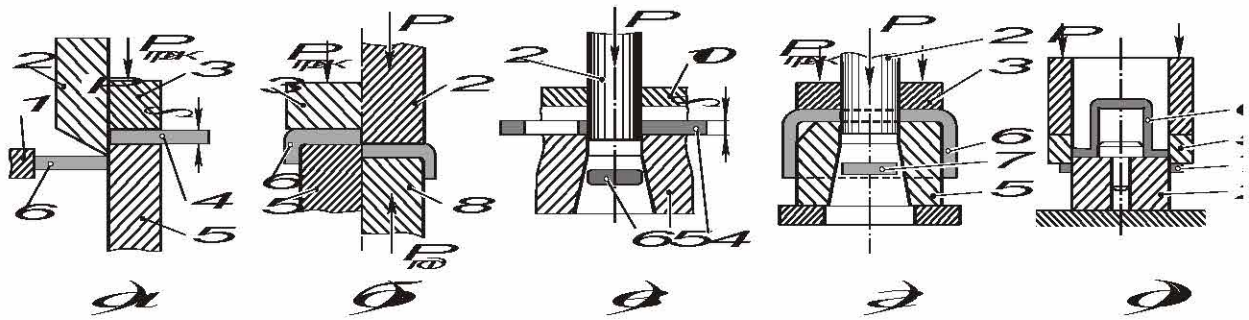


Рис. 1.1. Схеми основних розділових операцій листового штампування: а – відрізання; б – розрізання; в – вирубка; г – пробивання; д – обрізання; 1 – упор; 2 – пуансон; 3 – притискач; 4 – вихідна заготовка; 5 – матриця; 6 – заготовка; 7 – відхід; 8 – виштовхувач; 9 – підкладна плита; 10 – знімач.

Таблиця 1.1

Характеристика серійності холодного листоштампувального виробництва

Характер виробництва	Кількість деталей, тис. шт./рік		
	Особливо крупні і крупні деталі (630...2000 мм)	Середні деталі (250...630 мм)	Дрібні (90...250) і особливо дрібні деталі (до 90 мм)
Дрібносерійне	до 2	до 5	до 10
Серійне	від 2 до 20	від 5 до 50	від 10 до 100
Крупносерійне	від 20 до 300	від 50 до 1000	від 100 до 5000
Масове	від 300	від 1000	від 5000

В даний час отримання якісних отворів здійснюється найчастіше механічною обробкою (свердлінням в декілька переходів, зенкеруванням, розгортанням або протяжкою), а також процесом пробивання і тому трудомісткість обробки отворів досить висока. Однак процес пробивання, в свою чергу, володіє недоліками: не забезпечується необхідна якість отворів, або потрібно складне спеціальне штампове оснащення.

Вирубка та пробивання, будучи розділовими операціями, завершуються руйнуванням металу в осередку деформації. Процес пластичної деформації заготовки, що відбувається в початкових стадіях деформування, є супутнім, зазвичай не бажаним, але неминучим для пластичних матеріалів. Поділ заготовки в операціях вирубки здійснюється шляхом відносного зміщення суміжних частин заготовки в напрямку товщини заготовки. Щоб локалізувати пластичну деформацію поблизу поверхні розділу, кромки пуансона і матриці роблять гострими, а зазор між пуансоном і матрицею невеликим (значно меншою товщини заготовки).

При штампуванні має місце геометрична недосконалість поверхні відокремлення (рис. 1.2), що оцінюється наступними коефіцієнтами: утяжки  $k_y = h_y/s$ ; блискучого пояска  $k_n = h_n/s$ ; сколу  $k_c = h_c/s$ ; непрямолінійності  $k_x = x/s$  і величиною  $k_a = \alpha/h_2$ , а також висотою  $h_3$  задирки. Геометрична недосконалість поверхні тим більша, чим більша товщина матеріалу. Чим більший зазор при збільшенні товщини матеріалу, тим більша зона сколу. При зношуванні робочих елементів і затупленні ріжучих кромek мають місце задирки і т. і. [4, с. 27].

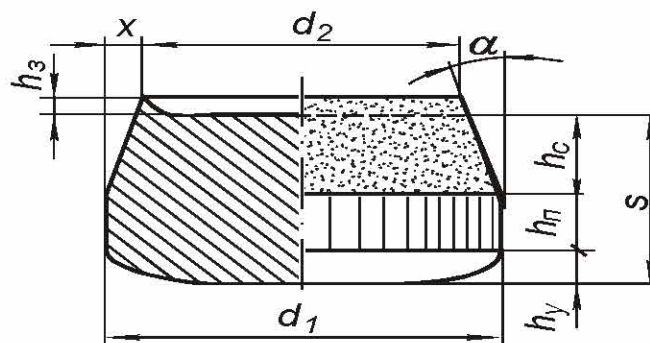


Рис. 1.2. Дефекти бічної поверхні штампованої деталі

Шорсткість поверхні приймають для блискучого пояска відповідною  $R_a$  2,5 ÷ 0,63 (6-7 класи), а для зони сколу –  $R_z$  80 ÷ 20 (3-5 класи) по ГОСТ 2789-73.

При відхиленні від оптимальних зазорів при вирубванні-пробиванні, на поверхні зрізу додатково з'являються завали, вириви та значні задирки. Такі нерівності та дефекти неприпустимі при виготовленні

точних деталей, які повинні мати перпендикулярну, чисту та гладеньку поверхню зрізу по висоті деталі (отвору).

#### **Недоліками штампування є:**

1. Значний час підготовки виробництва, так як при наявності штампувального обладнання необхідно виготовити складний інструмент – штамп;
2. Недоцільність технології у виробництві меншому за середньо-серійне;
3. Необхідність в додаткових енергоносіях (пара, підігрівання заготовок та ін.).
4. Недоліком чистової вирубки є підвищений відхід металу на бічні і крокові перемички.

#### **1.2. Лазерне різання**

Області застосування лазерів і лазерної техніки ще більш численна, чим розмаїтість їхніх конструкцій. Усього нараховується кілька сотень областей використання лазерів на практиці. Найбільш масовою областю використання лазерної техніки є в даний час лазерна обробка матеріалів, в основі якої лежить у більшості випадків тепловий вплив лазерного випромінювання.

Створення в 70-х рр. газових лазерів безперервної дії підвищеної потужності (понад 1 кВт) відкрило нові перспективи в застосуванні лазерної техніки. З їхньою появою область використання лазерного променя для обробки матеріалів розширилася від мікроелектроніки і приладобудування до багатьох енерго- і матеріалоемких галузей промисловості, таких як машинобудування, електротехнічна промисловість, металургія і т.д. Цьому сприяли унікальні властивості лазерного випромінювання як інструмента при обробці матеріалів. Високі щільності потужності лазерного випромінювання, істотно переважаючи інші джерела енергії (до  $10^8$ - $10^9$  Вт/см<sup>2</sup> у безперервному режимі і до  $10^{16}$ - $10^{17}$  Вт/см<sup>2</sup> в імпульсному режимі), дозволяють не тільки

значно збільшити продуктивність обробки, але й одержувати якісно нові результати по властивостях оброблених матеріалів. У цьому зв'язку лазерний промінь як джерело нагрівання при термічній обробці матеріалів має як загальні особливості, властиві всім іншим висококонцентрованим джерелам, так і свої специфічні переваги, серед яких можна виділити дві великі групи.

Висока концентрація підводимої енергії і локальність. Це дозволяє зробити обробку тільки локальної ділянки матеріалу без нагрівання іншого обсягу і порушення його структури і властивостей, що приводить до мінімального короблення деталей. У результаті досягаються економічні і технологічні переваги. Крім того, висока концентрація підводимої енергії дозволяє провести нагрівання й охолодження обробленого обсягу матеріалу з великими швидкостями при дуже малому часі впливу. У результаті відкривається можливість одержання унікальної структури і властивостей обробленої поверхні.

Висока технологічність лазерного променя, що має на увазі можливість регулювання параметрів обробки в дуже широкому інтервалі режимів, легкість автоматизації процесу, можливість обробки на повітрі, виключення механічного впливу на оброблений матеріал, відсутність шкідливих відходів, можливість транспортування випромінювання й ін.

Лазерна (світлопроменева) обробка ґрунтується на миттєвому локальному нагріванні поверхні обробленої заготовки світловим променем високої енергії до температури 6 000. .. 8 000 °С, внаслідок чого нагрітий метал розплавляється й випаровується, утворюючи потужний струмінь пари, який викидається у вигляді факела, а на його місці залишається заглибина або порожнина. Джерелом такого випромінювання є оптичний квантовий генератор, що називається лазером.

Найпоширенішими є газові, твердотілі й напівпровідникові лазери. Твердотілий лазер складається з робочої речовини, системи збудження, фокусування й охолодження. Твердотілі лазери працюють переважно в

імпульсному режимі. Їх робочою речовиною є тверді прозорі тіла, виготовлені з ітрієво-алюмінієвого гранату, синтетичного рубіну, неодимового скла та ін. В матриці робочої речовини рівномірно розподілені оптично активні атоми хрому, неодиму тощо.

Лазерними променями обробляють матеріали будь-якої твердості, в тому числі й алмази, прошиваючи отвори, вирізуючи заготовки часто складного профілю з листового матеріалу, обробляючи мікровпадини в деталях мікроелектроніки, усуваючи дисбаланс в обертальних деталях, безконтактно й дуже швидко наносячи клейма на вироби, виконуючи рисунки, гравіювальні роботи тощо.

Лазерним променем обробляють отвори, починаючи від діаметра в декілька мікрометрів у матеріалах з різними властивостями: каменях для годинників і приладів, в алмазах і твердих сплавах для фільтер, у металевих листах для сит тощо. Форма і шорсткість поверхні отворів залежить від параметрів режиму обробки — густини енергії, кількості імпульсів, частоти й тривалості імпульсів. Від густини енергії залежить температура матеріалу в зоні обробки. Зі збільшенням кількості імпульсів отвір поглиблюється, а з ростом тривалості імпульсу — набуває конічної форми. Надто тривалі імпульси спричинюють лише розплавлення металу без утворення отвору.

#### **Недоліки лазерної різки металу є:**

1. Для товстостінного металу (більше 20 мм) і навпаки - лазерне різання тонкостінного не підходить;
2. Метал підколюється поруч із зоною різання. Можливі ускладнення при наступних сверлінням, нарізці різьби і згинанні;
3. Різання отворів з діаметром менше товщини листа, а також малих і тонких деталей, в тому числі перемичок рахунок нагріву;
4. Часто великий час врізання в контур порівняно зі штампуванням;
5. Неможливість проведення витяжних робіт, жалюзівки і пуклевки.

### 1.3. Плазмове різання

Внаслідок високої продуктивності плазмового різання, а також застосування дешевих плазм утворюючих середовищ (повітря, вода), плазмове різання знаходить все більш широке застосування [5]. На сьогоднішній день воно займає ведуче місце серед інших видів плазмової обробки матеріалів як за об'ємом застосування в промисловості, так і за різноманітністю обладнання, що випускається.

Серед способів термічного різання, що отримали найбільш широке застосування, слід відзначити поряд із повітряно-плазмовим (ППР) також газокисневе (ГКР) і електродугове напівавтоматичне різання порошковим дротом (ЕДР).

ППР має найкращі показники за густиною енергії і температурою ріжучого струменю (табл. 1.3) [6].

**Таблиця 1.3**

#### Енергетичні параметри джерел тепла термічних способів різання

Параметри ріжучого струменю (дуги)	ГКР	ЕДР	ППР
Густина теплового потоку, Вт/см <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup> – 10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> – 10 <sup>7</sup>
Температура, 10° К	3 – 4	6 – 7	14 – 16

Більш високі початкові витрати на обладнання для ППР швидко себе виправдовують за рахунок низьких експлуатаційних витрат на матеріали та енергію. Якщо ж в експлуатаційні витрати включається вартість робочої сили (а вона більш вагома в складових витрат), то, враховуючи значні переваги ППР за продуктивністю (швидкісними показниками), окупність витрат на обладнання при ППР, як показує виробничий досвід, становлять не більше трьох місяців.

До важливих переваг ППР слід віднести також універсальність цього процесу відносно виду металу (леговані сталі і кольорові метали не підлягають ГКР, або вимагають застосування спеціальних присадочних порошків, що ускладнює процес).

**Таблиця 1.4****Швидкість різання маловуглецевої сталі, мм/хв**

Спосіб	Товщина розрізуваної сталі, мм						
	5	10	20	40	60	80	100
ГКР	0,5	0,45	0,35	0,28	0,25	0,16	0,1
ЕДР	0,3	0,16	0,07	0,02	0,02	0,01	–
ППР При застосуванні установки							
Київ-5	4,0	1,7	0,7	0,25	0,1	–	–
Київ-9	5,5	2,2	1,1	0,4	0,2	–	–

Для різання металів застосовують плазмову дугу прямої дії, яка відрізняється від зварювальної більш високим ступенем обтиснення стовпа і, відповідно, більшою концентрацією теплового потоку і швидкістю течії плазмового струменя. Завдяки термічній і механічній дії стовп дуги занурюється в метал і передає йому тепло. При цьому виплавляється і видувається метал із порожнини різку. На відміну від кисневого факела, для врізання якого необхідно втратити деякий час на місцеве прогрівання металу, плазмова дуга завдяки високій температурі врізається майже миттєво [7].

Велика концентрація енергії в плазмовому струмені і висока швидкість різання дозволяють виконувати операції при величині ЗТВ до 0,85 мм, що обумовлює відсутність деформацій, викликаних розігріванням розрізуваних матеріалів при різанні товстолистового прокату. Проте така ЗТВ ускладнює подальшу обробку. Цей спосіб використовують для різання всіх металів і їх сплавів, а для легованих сталей і кольорових металів він є практично основним видом термічного різання. Якість різання, отримувана при використанні сучасних плазмових установок, порівнюється з якістю лазерного різання, але пов'язана з меншими витратами.

ППР застосовують і для завершальної розмірної обробки деталей, що обумовило створення нової високоефективної технології виготовлення і ремонту способом гарячого плазмового різання листових деталей, що мають

ріжучу кромку (лезо) – лап культиваторів, дисків важких борон, леміхів та інш. [8].

Заміна механічної обробки – вирубки, фрезерування, точіння та ін. на ППР (нахиленим під потрібним кутом плазмотроном), дозволяє замінити від трьох до п'яти операцій традиційної технології на одну короткочасну (40...60 сек) операцію, що обумовило надзвичайно високу продуктивність і, відповідно, суттєве зниження вартості виготовлення зазначеного типу деталей, до того ж значне підвищення міцності та зносостійкості (в 1,5...2 рази).

Проте ППР не дозволяє отримати деталі зовнішнього і внутрішнього фасонних контурів, перш за все габаритами приблизно до 100 мм з дрібними елементами при підвищених вимогах по якості і точності обробки. Товстолістові деталі, отримані ППР, мають дещо оплавлену і не перпендикулярну площині деталі поверхню різь.

Плазмове різання (при струмі 100...400 А і напрузі 380 В) дозволяє вести розкрій при габаритах більше 50 мм із будь-яким контуром при товщині матеріалу 8...30 мм із продуктивністю, відповідно 62...25 мм/с на максимальному струмі і точністю  $\pm 0,5$  мм. Ширина різь становить 3...5 мм. Якщо допуск на розміри деталей, виготовлених цим способом обумовлюється, наприклад, Н 14, то потрібна додатково механічна обробка. Деталь звичайно потребує очистки від бризок металу (трату). При зменшенні габаритів продуктивність знижується, підвищується знос електродів, які розраховані на 100 вмикань.

Останнього часу відокремилось мікроплазмове різання, яке є різновидом плазмового (струм до 100 А і напруга 180 В). Цей процес дозволяє проводити відокремлення металів товщиною до 6...8 мм при ширині різь не більше 0,8...1,0 мм. Обладнання для мікроплазмового різання має менші габарити і масу. Мікроплазмове різання тонколистового металу в заготівельному циклі значно ефективніше механічного..

### **Недоліками плазмового різання є:**

1. Відносно скромна максимально допустима товщина різу, яка навіть у потужних апаратів рідко перевищує 80-100 мм. У випадку ж з кисневої різкій максимально допустима товщина різу для сталі та чавуну може досягати 500 мм;
2. Досить жорсткі вимоги до відхилення від перпендикулярності різу. В залежності від товщини деталі кут відхилення не повинен перевищувати 10-50°. При виході за ці межі спостерігається значне розширення різу і, як один з наслідків, швидкий знос витратних матеріалів;
3. Складність робочого обладнання робить практично неможливим одночасне використання двох різаків, підключених до одного апарату, що з успіхом застосовується при різанні штучним електродом;
4. Порівняно велика, до 1 мм, зона термічного впливу при обробці вуглецевих сталей, що ускладнює подальшу механічну обробку;
5. складність отримання отворів діаметром до 50 мм.

### **1.4. Електроерозійна обробка.**

Електроерозійні методи полягають у руйнуванні електропровідних матеріалів — електродів — під час пропускання між ними імпульсів електричного струму. Коли різниця потенціалів між електродами (заготовкою та інструментом) набуває певного значення, газове або рідинне середовище між ними іонізується й утворюється канал провідності, по якому проходить електричний струм у вигляді імпульсного іскрового або дугового розряду. Завдяки високій густині струму температура на локальованій поверхні заготовки сягає 10 000 °С і більше. При такій температурі миттєво розплавляється і навіть випаровується елементарний об'єм металу, який викидається в діелектричну рідину і там застигає у вигляді гранул. На місці відокремленого металу з'являється заглибина. Подальші електричні імпульси іонізують міжелектродне середовище там, де відстань між електродами

найменша. Якщо електроди не рухати, то зазор між ними поступово зростає і настає момент, коли електричні розряди припиняються. Щоб продовжити обробку, необхідно зблизити електроди до пробивної відстані (0,01...0,05 мм). Внаслідок неперервного заглиблення інструмента оброблена поверхня заготовки набуває його профілю. Частота імпульсів електричного струму під час електроерозійної обробки змінюється від 100 до 2 000 000 Гц.

Серйозною проблемою електроерозійної обробки є руйнування інструмента, внаслідок чого знижується точність й погіршується якість обробленої поверхні. Ерозійна стійкість інструмента зумовлена значною мірою параметрами імпульсу струму та матеріалу інструмента у такій послідовності в напрямі збільшення стійкості: сплави алюмінію —> сірий чавун —> латунь —> мідь —> вольфрам —> графітизована суміш. Різновидами електроерозійної обробки є електроіскрова, електроімпульсна, електроконтактна та ін.

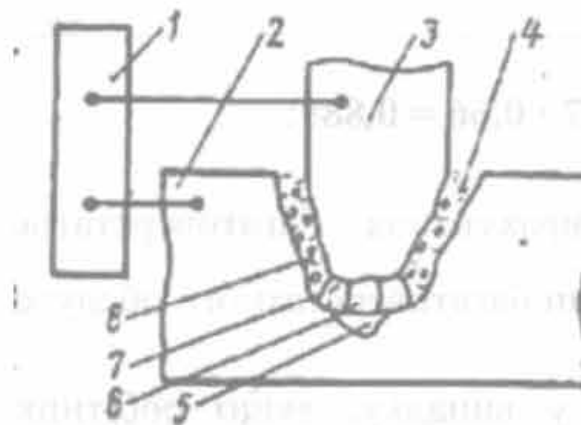


Рис 1.3. Електроерозійний різак.

1 - генератор імпульсів; 2 - заготовка; 3 - електрод-інструмент; 4 - зона плавлення металу; 5 - електроерозійна лунка; 6 - плазмовий розрядний канал; 7 - газовий пузир; 8 - робоча рідина.

Інтенсивність процесу ерозії визначається в основному тепло фізичними параметрами матеріалів електродів (температурою, тепловою плавлення і випару, теплоємністю і теплопровідністю), електричними параметрами імпульсів струму (енергією, тривалістю, амплітудою, частотою проходження) і властивостями міжелектродного середовища

(електропровідністю, плинністю, насиченістю газами і парами, в'язкістю).

Процес ерозії значно інтенсифікується в рідкому середовищі і має, як правило, яскраво відображений полярний ефект, внаслідок якого один електрод (інструмент) зношується менше іншого (деталі). Метал, що викидається з ерозійної лунки, застигає в рідкому середовищі у виді дрібнодисперсних гранул.

Електроерозійні методи обробки засновані на законах ерозії (руйнування) електродів зі струмопровідних матеріалів при пропусненні між ними імпульсного або постійного електричного струму.

Електроерозійна обробка може здійснюватися профільним або непрофільованим електродом-інструментом (EI). У першому випадку його розміри і форма робочих поверхонь визначаються у відповідності з заданою повторюваністю деталлю, що виготовляється. В другому електрод-інструмент має найпростішу конструкцію (дріт, диск або стрижень), а його розміри лише частково зв'язані з розмірами електрода-деталі.

Методи електроерозійної обробки. При електроіскровій обробці використовують імпульсні іскрові розряди між електродами, один із яких оброблювана заготовля (анод), а іншої - інструмент (катод). Напряга джерела електричної енергії 100-200 В. Тривалість імпульсу складає 20 - 200 мкс. У залежності від кількості енергії, що витрачається в імпульсі, режим обробки поділяють на твердої або середній - для попередньої обробки і м'який або особливо м'який - для оздоблювальної обробки. М'який режим обробки дозволяє одержувати розміри з точністю до 0,002 мм при шаршавості поверхні 0,63-0,16 мкм. Продуктивність обробки складає від 7,5 до 1900 мм<sup>3</sup>/хв.

Електроіскровим методом обробляють практично всі токопровідячі матеріали, але ефект ерозії при тих самих параметрах електричних імпульсів різний. Залежність інтенсивності ерозії від властивостей металу називають електроерозійною оброблюваністю. За одиницю прийнята електроерозійна оброблюваність сталі (Сталь45), тоді для твердих сплавів вона буде - 0,5;

титан - 0,6; нікель - 0,8; мідь -1,1; латунь -1,6; алюміній - 4 і т.д.

Електроіскровим методом доцільно обробляти тверді сплави, важко оброблювані метали і сплави, тантал, молібден і ін. мати-ріали.

### **Недоліки електроерозійної обробки.**

1. Необхідність застосування робочої рідини з високими діелектричними властивостями, в середовищі якої проводиться обробка, ускладнюється конструкція верстата і може його обслуговування.
2. Точність обробки і чистота обробленої поверхні при ЕЕО залежать від багатьох факторів, облік яких не завжди можливий.
3. В процесі обробки електрод інструмент значно зношується, а аналітичних залежностей, що враховують все різноманіття факторів для розрахунку розмірів ЕІ поки неотримана.

### **1.5. Розмірна обробка електричною дугою**

В умовах серійного і дрібносерійного виробництва листових деталей високоефективну альтернативу традиційним процесам обробки металів різанням і тиском складає розмірна обробка електричною дугою (РОД). Пояснюється це тим, що використання штампів не завжди рентабельне внаслідок високої вартості, плазмове і лазерне різання не дозволяють отримати готову деталь, фрезерування фасонного контуру малопродуктивне та пов'язане зі значними складнощами, оскільки поверхня заготовки може бути загартована.

Перспективним для виготовлення листових деталей із зазначеними параметрами є спосіб РОД, який дозволяє здійснити як розділові операції при обробці складних внутрішніх і зовнішніх контурів, так і одержати фасонні профілі типу фасонних зубчатих поверхонь, квадратних отворів з фасками і т. і. [9].

РОД – це принципово новий процес обробки металів, заснований на використанні стаціонарної електричної дуги [2]. Він є різновидом ЕЕО, по

суті, об'єктивно наступним етапом її розвитку. Порівняно з відомими способами ЕЕО, заснованими на використанні нестационарного електричного розряду (електроіскрова та електроімпульсна обробка), РОД забезпечує наступні переваги.

1. Значно більш високу продуктивність (в 5...10 разів і більше), що наближується до продуктивності обробки металів різанням. Продуктивність РОД прямо пропорційна силі струму дуги. В умовах РОД струм дуги може досягати сотень і тисяч ампер. Відомих обмежень по силі струму обробки, характерних для електроіскрової обробки, тут нема.
2. Менші питомі витрати електроенергії (приблизно вдвічі), що помітно підвищує економічну ефективність процесу.
3. Джерела живлення технологічним струмом (звичайні джерела живлення зварювальної дуги) значно дешевші (в 3...5 разів), широко розповсюджені та загальнодоступні, є в достатній кількості.
4. Розроблені порівняно прості та дешеві електроерозійні верстати РОД та системний ряд компактних, простих і дешевих електроерозійних головок (ЕЕГ) реалізують концепцію локального підведення робочої рідини в зону обробки (тобто робочої ванни з рідиною, як це характерно для звичайних електроерозійних верстатів, нема). Це дозволяє високоефективно здійснити обробку як профільованим, так і непрофільованим електродом, як на універсальних і спеціальних верстатах РОД, так і на будь-яких металорізальних верстатах без втрати останніми своїх основних функцій, як в найбільш сучасному інструментальному цеху, так і в будь-якій ремонтній майстерні. Тому верстати РОД стають верстатами масового попиту.

Сутність РОД полягає в тому, що обробку здійснюють стаціонарною електричною дугою, яка горить поміж ЕІ та ЕЗ 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). Звичайно РОД

здійснюють дуговим розрядом, що горить в поперечному, по суті, потоці робочої рідини (рис. 1.4). Одержаний таким чином дуговий розряд має високі енергетичні характеристики і переміщується по поверхні електродів. При цьому відбувається інтенсивне локальне руйнування металу за рахунок випаровування і крапельного викидання розплаву, а потік рідини видаляє із зони обробки отримані продукти ерозії. Все це в сукупності забезпечує оптимальне протікання процесу розмірної обробки.

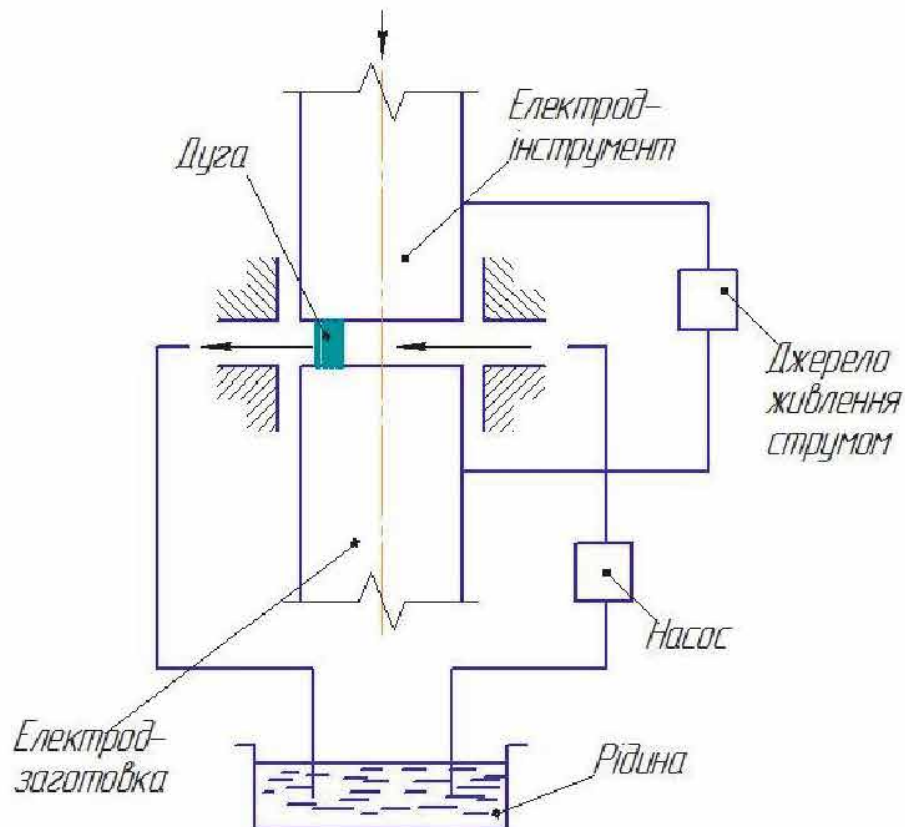


Рис. 1.4. Принципова схема РОД.

Типова осцилограма сили струму і напруги дуги при РОД (рис. 1.5) принципово не відрізняється від типової осцилограми струму і напруги звичайної стаціонарної дуги типу зварювальної чи плазмової дуги для різання металу. В умовах РОД енергетичні характеристики розряду (густина струму, напруженість електричного поля) регулюються легко, плавно і в широких межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку і при збільшенні (зменшенні) останнього збільшуються (зменшуються), що треба розглядати як результат саморегулювання енергетичних характеристик розряду в 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 і аж до превалюючого тонкого розмірного випаровування. Таким чином, динамічний тиск потоку робочої рідини в умовах РОД є основним параметром процесу, який визначає, в кінцевому підсумку, можливість та якісну сторону процесу обробки.

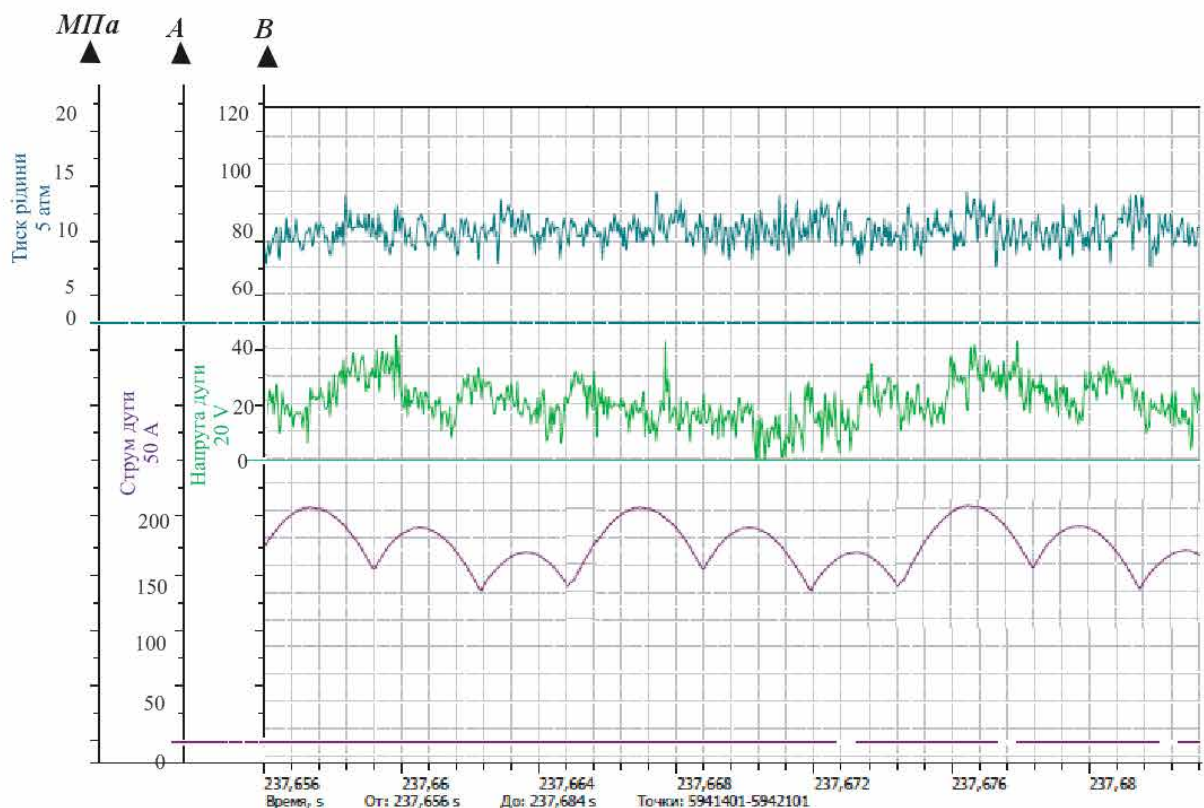


Рис.1.5. Типова осцилограма процесу РОД

плавно і в широких межах за рахунок зміни динамічного тиску потоку і при збільшенні (зменшенні) останнього збільшуються (зменшуються), що треба розглядати як результат саморегулювання енергетичних характеристик розряду в 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 і аж до превалюючого тонкого розмірного

випаровування. Таким чином, динамічний тиск потоку робочої рідини в умовах РОД є основним параметром процесу, який визначає, в кінцевому підсумку, можливість та якісну сторону процесу обробки.

Дуга при РОД може живитись як постійним, так і змінним струмом. При живленні дуги змінним струмом стабільність процесу гірша, а продуктивність помітно знижується. В цьому зв'язку, а також з метою використання ефекту полярності електричної ерозії, який дозволяє забезпечити максимальну продуктивність обробки ЕЗ і мінімальний знос ЕІ, дугу 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 і коливається в межах 20...50 В і більше. Напряга холостого ходу коливається в межах 50...100 В і більше.

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, зокрема характерні для ЕЕО [10].

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

коливаннями величини міжелектродного зазора, в цілому не поступається досягнутій при відомих способах ЕЕО.

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

В зв'язку з викладеними можливостями РОД, цей спосіб може бути використаний для виготовлення деталей, що мають складний контур.

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

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

**Задачі дослідження:**

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД та визначення меж його раціонального застосування;
2. Дослідження особливостей формування оптимальних гідродинамічних умов обробки деталей зі складною поверхнею.
3. Розробка технології обробки деталей зі складною поверхнею;
4. Визначення впливу фізико-технологічних характеристик процесу РОД, на його кількісні та якісні показники.

## РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень

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

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

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

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

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

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

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

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



Рис. 2.1. Настільний свердлильний верстат 2М112

## 2.2. Обладнання, пристрої, апаратура

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

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



Рис.2.2. Установа РОД з використанням ЕЕГ встановленої на настільному свердильному верстаті

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

### **2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів**

Експериментальні дані, отримані на основі планування та реалізації багатофакторного експерименту із елементами аналізу дисперсії та регресії являють помітний практичний інтерес. Побудовані за результатами експериментів моделі дозволяють визначити ступінь та характер впливу технологічних факторів на параметри, що досліджуються і, таким чином, створити передумови для керування процесом. В таких випадках важливо отримати максимально компактну адекватну модель, яка не містить зайвих членів та факторів.

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

При дослідженні технологічних характеристик процесу РОД основних технологічних схем формоутворення – продуктивності, якості, точності обробки, стійкості ЕІ та гідродинаміки було виконано математичне планування експериментів [13,14]. Крім точок, визначених планами, при отриманні експериментальних партій деталей перевірялась точність побудованих моделей роботою на інших режимах в рамках меж варіювання керуючих факторів. Це дозволило побудувати також емпіричні графіки, які добре апроксимуються моделями, отриманими в результаті реалізації планів.

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

Регулювання сили струму  $I$  і тиску  $P_s$  в зазначених далі межах обумовлені можливостями техніки, що при цьому використовувалась, та технологічною доцільністю. Зокрема, в якості джерел живлення для РОД використовують стандартні зварювальні випрямлячі з зовнішньою падаючою характеристикою ВДУ-504, розраховані на максимальний струм  $I_{max}=500$  А, які при безперервній роботі працюють при  $I_{max}=400$  А. Робоча напруга  $U$  в межах 22...30 В, яку забезпечують зазначені джерела живлення, відповідає мінімальній необхідній величині МЕЗ.

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

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

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

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

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

Тепер задача зводиться до побудови лінійної моделі виду

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

де  $Y = \lg y$

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

$$b_1 = \beta_1$$

$$X_1 = \lg I$$

$$b_2 = \beta_2$$

$$X_2 = \lg P_s \text{ і т.д.}$$

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

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

Розрахунок моделі виконують згідно відомих методик [13,14] і застосуванням програмного пакету STATISTICA 6.0 [14]. В табл. 2.4 представлено приклад значення оцінок коефіцієнтів регресії (*BETA*) та значення коефіцієнтів регресії (*B*), значення критерію Стюдента (*t*) для коефіцієнтів регресії та рівні його значимості (*p*). Побудовано довірчі інтервали ( $\pm 95\%$ ).

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

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

Позначки в таблицях: *Dep. Var.* - Ім'я залежної змінної. В нашому випадку *lgM*; *Numberofcases* - кількість експериментів, за якими побудована регресія; *Multiple R* - коефіцієнт множинної кореляції; *R-square* - *RI* - квадрат коефіцієнта множинної кореляції, що зветься коефіцієнтом детермінації; *Adjusted R-square* - скоригований коефіцієнт детермінації; *Standard Error of Estimate* - стандартна похибка оцінки, що є мірою розпорошування результатів спостереження відносно кривої регресії; *Intercpt* - оцінка вільного

члена регресії; *Std.Error* - стандартна похибка оцінки вільного члена;  $t(df)$  and *p-value* - значення  $t$  - критерія і рівня  $p$ .  $t$ -критерій використовують для перевірки гіпотези про рівність 0 вільного члена регресії;  $F$  - значення  $F$ -критерія;  $df$  - число ступенів свободи  $F$ -критерія;  $p$  - рівень значимості; *Std.Error of estimate* - квадратичне відхилення середнього експерименту;  $b^*$  - оцінка коефіцієнта регресії;  $b$  – значення коефіцієнта регресії.

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

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

## **2.4. Охорона праці при роботі на верстатах РОД**

### **Безпека при експлуатації електроерозійних верстатів РОД**

Верстати РОД повинні експлуатуватися в строгій відповідності з вимогами техніки безпеки. При порушенні цих вимог створюється підвищена небезпека враження електричним струмом, одержання опіків унаслідок загоряння робочої рідини, отруєння газоподібними продуктами розкладання робочого середовища, а також травмування рухомими деталями і вузлами верстата. Крім того, у заходах щодо охорони праці повинні бути враховані збільшений шум, вплив робочого середовища й інші супутні явища при роботі, що становлять визначену небезпеку і погіршують умови праці [15,16].

До роботи на верстатах РОД допускаються особи, що пройшли медогляд, спеціальне навчання, інструктаж, атестовані за правилами проведення робіт на верстаті, по наданню першої допомоги при ураженні електрострумом і пожежної безпеки. Робота на верстаті чи його ремонт дозволяється за умови, що в приміщенні, де установлений верстат, знаходяться не менш двох чоловік, що можуть надати один одному необхідну допомогу. На кожному робочому місці обов'язково повинен бути електроізоляційний коврик під ноги. Під час роботи не слід торкатися струмонесучих частин (електрода, електродотримача, бобіни з дротом на вирізних верстатах і т.д.). Налагодження, установку виробу інструмента

варто робити, упевнившись у тому, що генератор технологічного струму виключений. По закінченню роботи, при проведенні налагоджувальних робіт, технічному обслуговуванні, а також при перервах у подачі електроенергії верстат повинен бути відключений від мережі живлення [15, 16].

### **Вимоги до технологічного обладнання**

Вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів.

Безпека праці на виробництві містить такі складові:

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

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

## **2.5. Висновки**

2.5.1. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень.

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

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

### РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД

Спосіб РОД, як і відомі способи ЕЕО дозволяє здійснити технологічні схеми формоутворення як вертикальних стінок стержнів та отворів, так і поверхонь, спряжених із вертикальними стінками, наприклад, фасок, при прямолінійному поступальному русі як профільованого, так і непрофільованого ЕІ. Формоутворення відбувається за принципом прошивання із об'ємним копіюванням форми ЕІ [2].

При цьому повинні забезпечуватись такі умови реалізації процесу: обробка здійснюється в герметизованій камері електричною дугою в поперечному потоці середовища-діелектрика (в даному випадку це суміш масла "Індустріальне-12" (50%) та освітлювального гасу (50%)) при його динамічному тиску не менше 1...2 кПа, густині струму не більше 2 А/мм<sup>2</sup>, ЕІ з матеріалу МПГ-7.

#### 3.1. Визначення технологічних характеристик процесу

##### Продуктивність

В зазначених умовах матеріалу і полярності електродів, складу робочої рідини продуктивність обробки є функцією геометрії ЕІ та деталі, міжелектродного зазору, напруги і струму обробки.

На рис. 3.1 показано вплив факторів на продуктивність  $M$  обробки деталей: сили технологічного струму  $I = 50...300$  А, статичного тиску робочої рідини  $P_s = 0,8...1,5$  МПа, робочої напруги  $U = 28...32$  В.

Рівняння регресії:

$$y(M) = 0,84 + 0,998 x_1 + 0,010 x_2 - 0,058 x_3 \quad (3.1)$$

Відповідно, математична модель продуктивності, мм<sup>3</sup>/хв:

$$M = 7,03I^{0,979}P_s^{-0,168}U^{0,145} \quad (3.2)$$

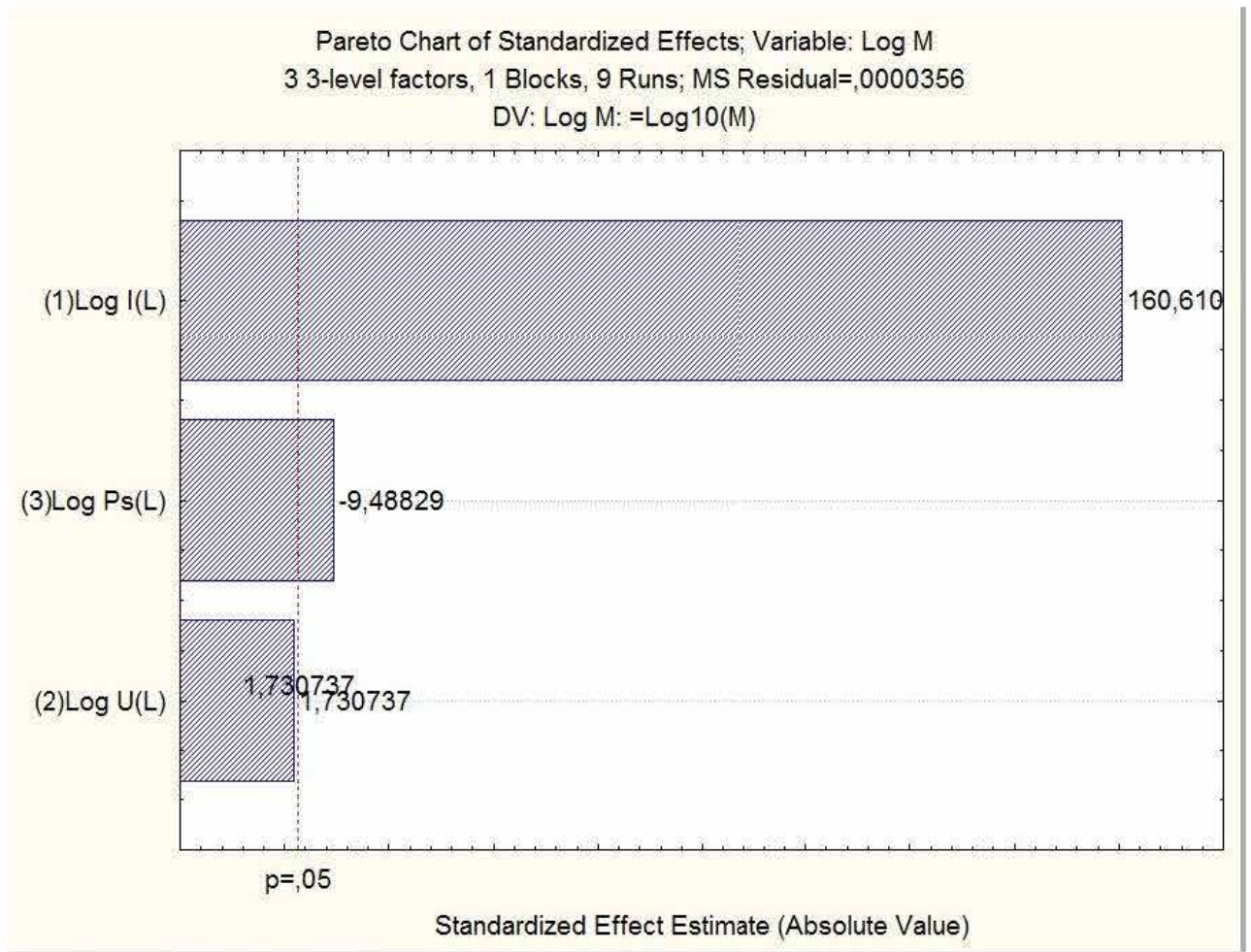


Рис. 3.1. Вплив факторів на продуктивність обробки  $M$  деталей

Основними факторами є сила технологічного струму та статичний тиск рідини на вході в міжелектродний зазор. З отриманої залежності можна зробити висновок про те, що продуктивність обробки визначається переважно силою струму (зростає приблизно прямо пропорційно збільшенню  $I$ ) і менше – статичним тиском (зменшується при збільшенні  $P_s$ ).

На рис. 3.2. показано залежність продуктивності  $M$  обробки деталей від  $I$  та  $P_s$ ,  $\text{мм}^3/\text{хв}$ :

$$M = 7,03I^{0,979}P_s^{-0,168} \quad (3.3)$$

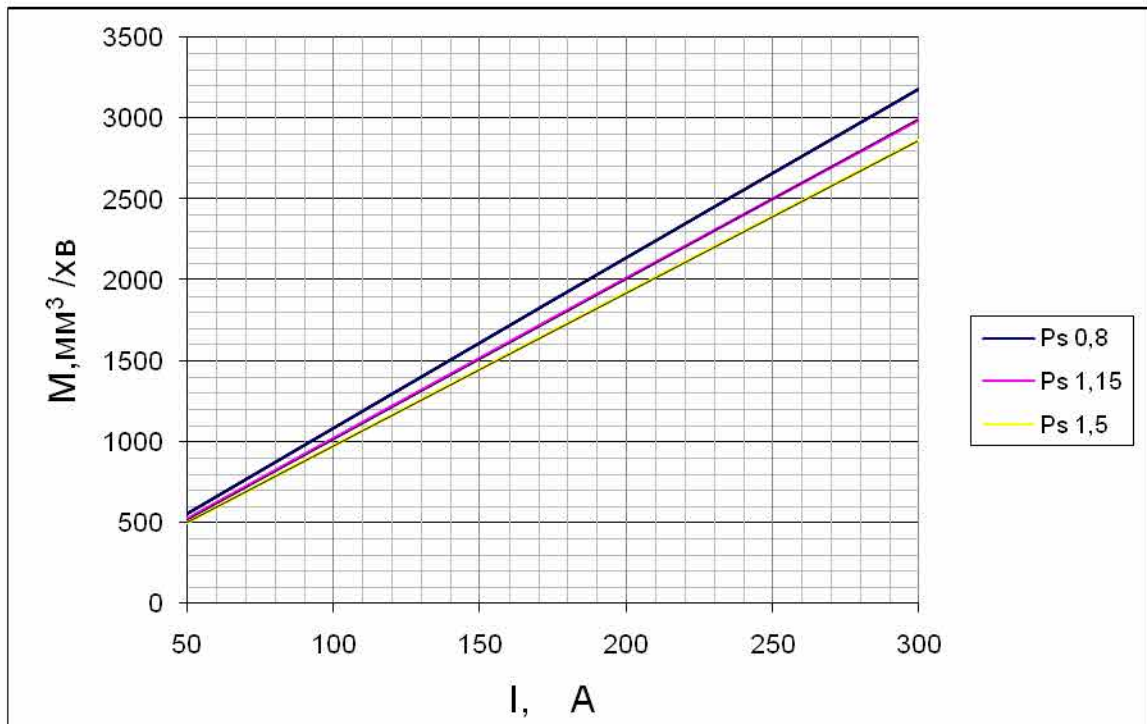


Рис. 3.2. Залежність продуктивності  $M$  від сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску  $P_s$

### Шорсткість обробленої поверхні

На рис. 3.3. показано вплив факторів на шорсткість  $Ra$  обробленої поверхні: сили технологічного струму  $I = 50 \dots 300$  А, статичного тиску робочої рідини  $P_s = 0,8 \dots 1,5$  МПа, робочої напруги  $U = 28 \dots 32$  В.

Рівняння регресії:

$$Y(Ra) = - 0,39 + 0,86 x_1 + 0,0875 x_2 - 0,414 x_3 \quad (3.4)$$

Відповідно, математична модель шорсткості, мкм:

$$Ra = 0,404 I^{0,338} U^{0,469} P_s^{-0,47} \quad (3.5)$$

Шорсткість обробленої поверхні залежить переважно від статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор (зменшується при збільшенні  $P_s$ ) і менше від величини сили технологічного струму: збільшується при збільшенні  $I$ .

На рис. 3.4 показано залежність шорсткості  $Ra$  обробленої поверхні від  $I$  та  $P_s$  при, мкм:

$$Ra = 0,404 I^{0,338} P_s^{-0,47} \quad (3.6)$$

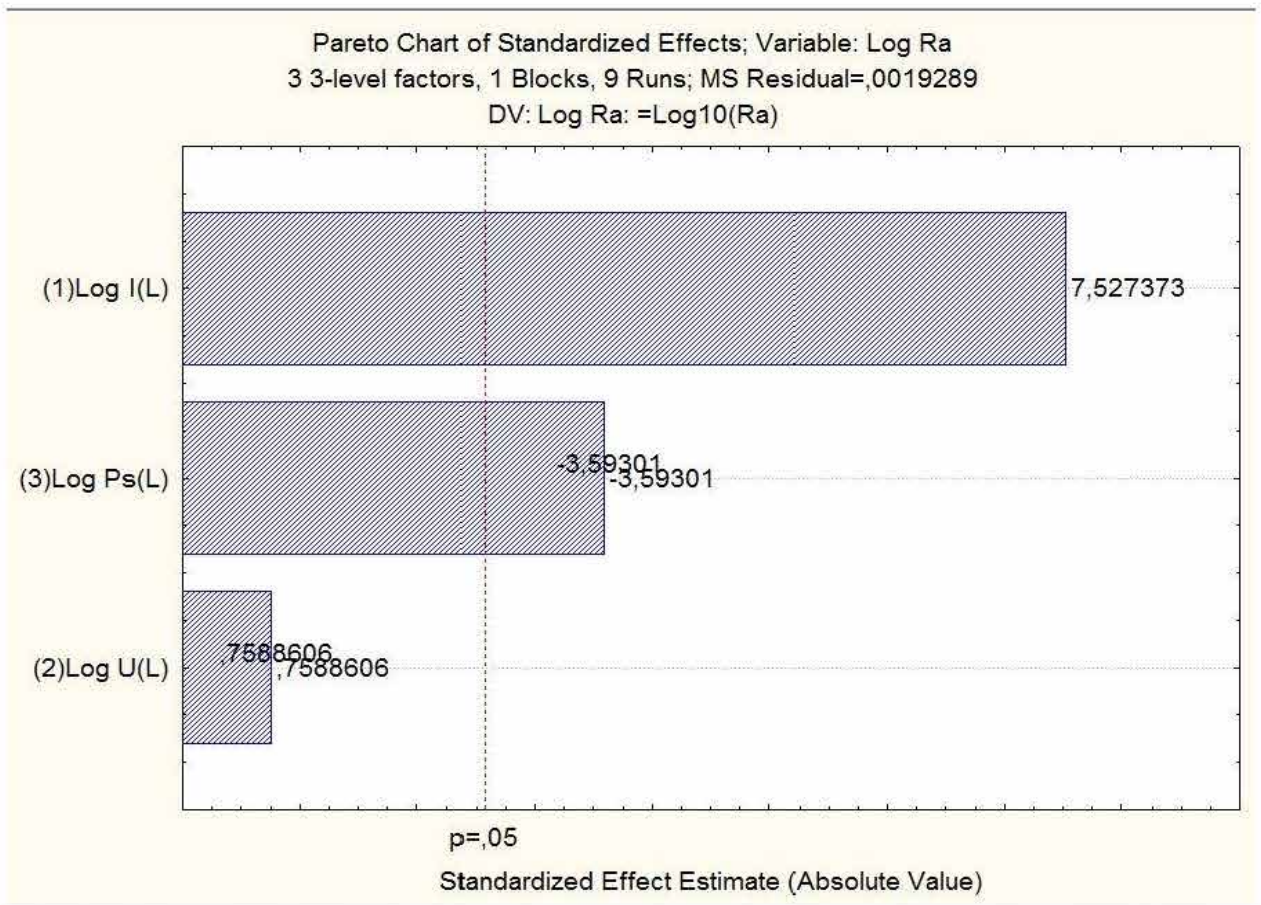


Рис. 3.3. Вплив факторів на величину шорсткості обробленої поверхні  $Ra$

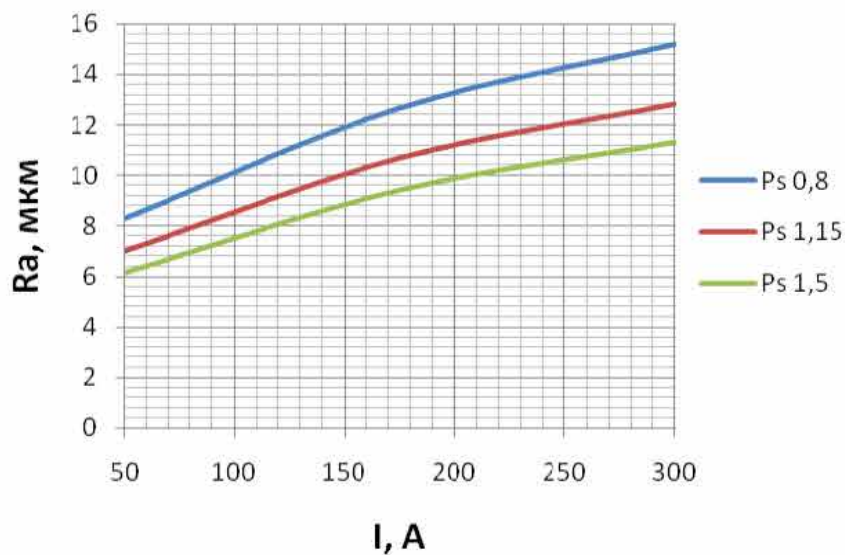


Рис. 3.4. Залежність шорсткості  $Ra$  обробленої поверхні від сили струму  $I$  та статичного тиску  $P_s$

## Знос електрода-інструмента

Ефективність і економічність процесу РОД визначають значною мірою собівартістю і стійкістю ЕІ. Відносний лінійний знос ЕІ, виготовлених із графітізованого матеріалу МПГ-7 при обробці не перевищує 1 % на чорнових режимах, які забезпечують високу продуктивність і помірну якість та 0,05% на чистових режимах та калібруванні.

Розглянемо особливості зносу ЕІ в умовах РОД при прокачуванні через заготовку. Знос є функцією сили технологічного струму та статичного тиску робочої рідини на вході в міжелектродний зазор.

На рис. 3.5 показано вплив на відносний лінійний знос ЕІ  $\gamma$  при РОД змінних факторів: сили технологічного струму  $I = 50 \dots 300$  А, статичного тиску робочої рідини  $P_s = 0,8 \dots 1,5$  МПа, робочої напруги  $U = 28 \dots 32$  В.

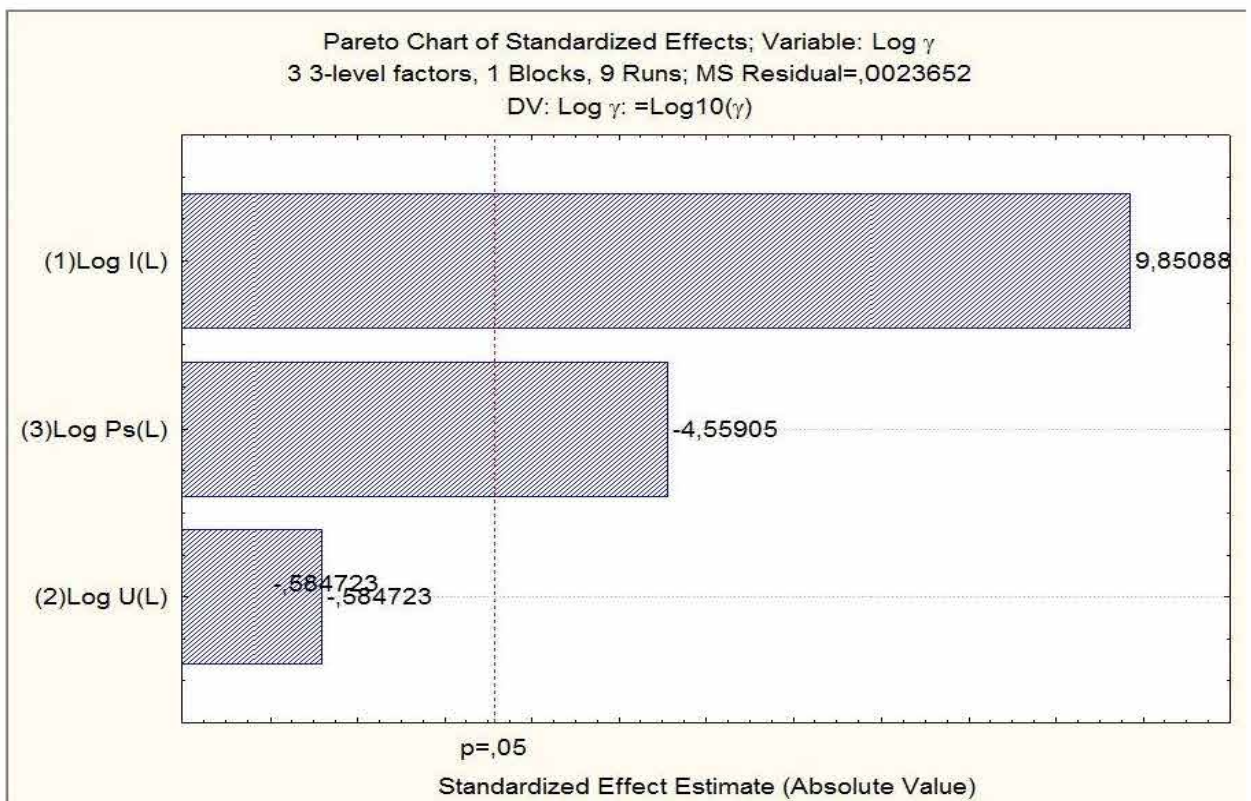


Рис. 3.5. Вплив факторів на величину зносу ЕІ при прокачування через заготовку

Графік побудовано згідно рівняння регресії:

$$Y(\gamma) = -0,45 + 0,88 x_1 - 0,052 x_2 - 0,41 x_3 \quad (3.7)$$

Відповідно, математична модель зносу EI, %:

$$\gamma = 0,355 I^{0,489} U^{-0,4} P_s^{-0,66} \quad (3.8)$$

На рис. 3.6 показано залежність зносу EI  $\gamma$  при РОД обробки деталей при прокачування через заготовку від  $I$  та  $P_s$ , що визначають за формулою, %:

$$\gamma = 0,355 I^{0,489} P_s^{-0,66} \quad (3.9)$$

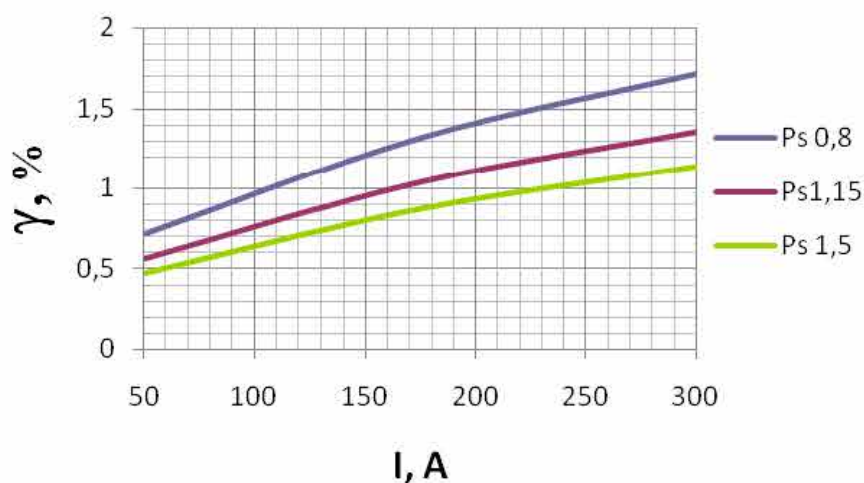


Рис. 3.6. Залежність відносного лінійного зносу EI  $\delta$  від сили струму  $I$  та статичного тиску  $P_s$

Згідно представленого виразу знос EI збільшується зі збільшенням сили технологічного струму  $I$  та статичного тиску робочої рідини  $P_s$ , що відповідає відомим уявленням. Підвищення напруги в зазначених межах сприяє зменшенню зносу EI, оскільки зменшується опір торцевого зазору і покращуються умови руху рідини.

## Міжелектродний зазор

Побудову профілю робочої поверхні ЕІ виконують згідно технологічних схем формоутворення, режимів обробки та схеми утворення міжелектродних зазорів. Розрахунок розмірів ЕІ з врахуванням міжелектродного зазору, шорсткості поверхні виконують згідно існуючих методик ЕЕО..

На рис. 3.7 показано вплив факторів на величину міжелектродного зазору  $\delta$  при РОД при прокачуванні через заготовку змінних: сили технологічного струму  $I = 50 \dots 300$  А, статичного тиску робочої рідини  $P_s = 0,8 \dots 1,5$  МПа, робочої напруги  $U = 28 \dots 32$  В.

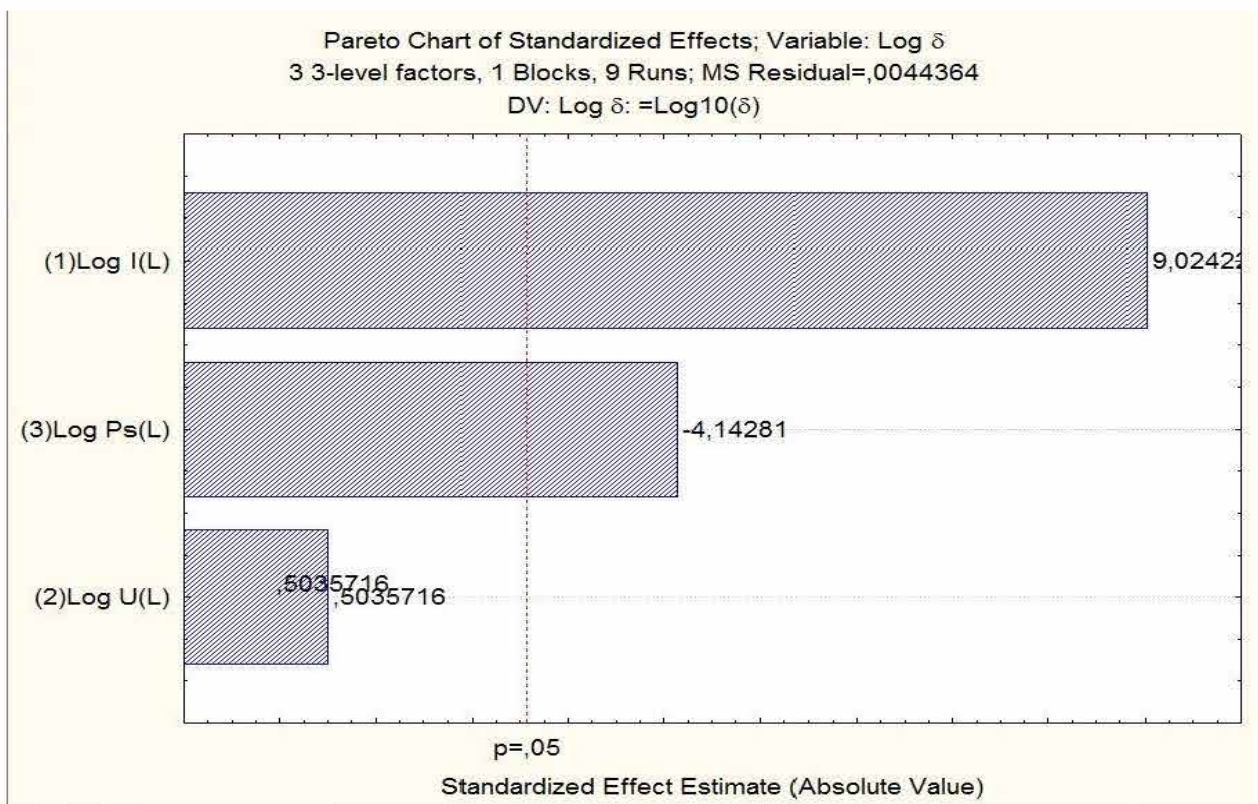


Рис. 3.7. Вплив факторів на величину міжелектродного зазору

Рівняння регресії:

$$y(\delta) = -0,78 + 0,885 x_1 + 0,049 x_2 - 0,4 x_3 \quad (3.10)$$

Відповідно, модель величини міжелектродного зазору, мм:

$$\delta = 0,00163I^{0,614}U^{0,472}P_s^{-0,822} \quad (3.11)$$

Оптимально реалізувати процес при мінімальних міжелектродних зазорах можливо, але при цьому різко зростає тиск робочої рідини. Звичайно при РОД міжелектродний зазор коливається в межах 0,05...0,1 мм: зменшується зі збільшенням  $P_s$  і збільшується зі збільшенням  $I$ .

На рис. 3.8 показано залежність величини міжелектродного зазору  $\delta$  при РОД від  $I$  та  $P_s$ , що визначають за формулою, мм:

$$\delta = 0,00163I^{0,164}P_s^{-0,822} \quad (3.12)$$

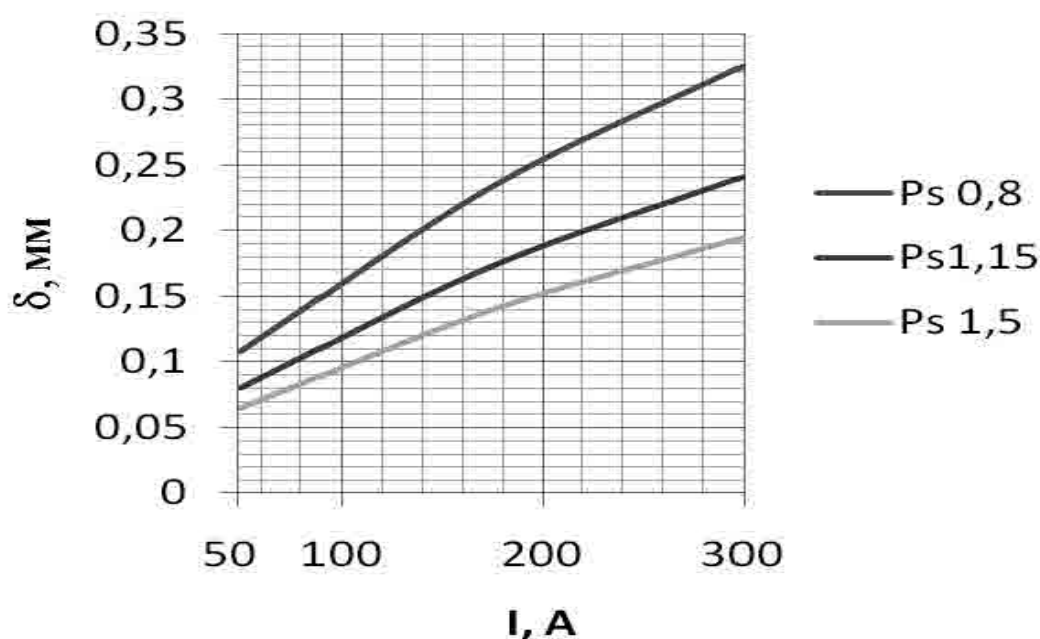


Рис. 3.8. Залежність міжелектродного зазору  $\delta$  від сили струму  $I$  та статичного тиску  $P_s$

### 3.2. Висновки

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

Продуктивність обробки приблизно прямо пропорційна силі технологічного струму, який обмежується площею поперечного перерізу ЕІ.

Шорсткість обробленої поверхні є переважно функцією статичного тиску при вході в зазор.

ЕІ, виготовлений із матеріалу МПГ-7 має досить високу стійкість, його лінійний знос коливається в межах 0,3...1% і залежить від режиму обробки та геометрії робочої частини ЕІ. Величина міжелектродних зазорів коливається в межах 0,04...0,12 мм.

## РОЗДІЛ 4. РОД ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ

Спосіб РОД дозволяє отримувати отвори в деталях та деталі у вигляді стержнів за умови створення оптимальних умов течії робочої рідини в зоні обробки, що дозволяє отримати електричну дугу високих енергетичних характеристик малих розмірів, яка дозволяє вести розмірну обробку.

Оптимальні гідродинамічні умови створюються при умові якщо поверхня електрод-інструмента паралельна поверхні заготовки, що обробляють.

При збільшенні відхилення від паралельності поверхонь ЕІ та заготовки може виникнути ситуація, в зоні обробки (горіння електричної дуги), де робоча рідина, яка має стискати електричну дугу, не тече в наслідок чого електрична дуга набуває енергетичних та геометричних характеристик звичайної зварювальної дуги, що, як відомо, не може вести розмірної обробки.

Для визначення величини відхилення від паралельності проведено серію експериментів при яких заготовки мали похилу стартову поверхню обробки по відношенню до поверхні ЕІ (див. рис. 4.1)

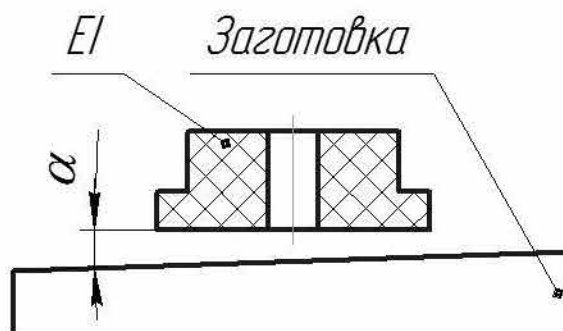


Рис. 4.1. Визначення граничного відхилення від паралельності поверхонь ЕІ і заготовки

В результаті дослідів було встановлено, що допустимим відхиленням куту нахилу стартових поверхонь  $\alpha$  для забезпечення умов протікання процесу розмірної обробки електричною дугою в межах  $1^\circ$ .

При збільшенні цього кута відбувається суттєвий перерозподіл потоку робочої рідини в зоні обробки в наслідок чого робоча рідина починає текти в

зоні де міжелектродний зазор  $\delta_2$  більший, а не стиснена електрична дуга загорається в зоні де міжелектродний зазор  $\delta_1$  менший.

При необхідності обробки отворі чи стержнів, що мають нахилену торцеву поверхню по відношенню до початкової поверхні заготовки, як показано на рисунку 4.2 в зоні обробки не створюються умови для протікання процесу РОД.

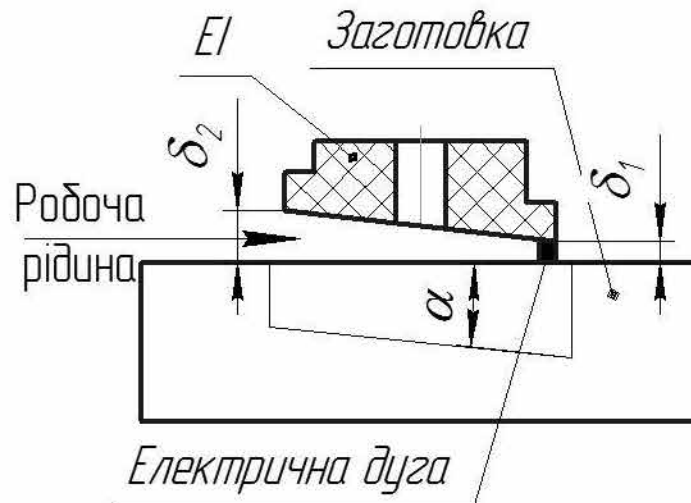


Рис. 4.2. РОД деталей з нахиленою торцевою поверхнею

Для того, щоб забезпечити оптимальні умови протікання процесу РОД в зоні обробки за зазначених вище умов пропонується на поверхні заготовки розміщувати накладку, яка сформує на початковій стадії рівномірний міжелектродний зазор (рис. 4.3)

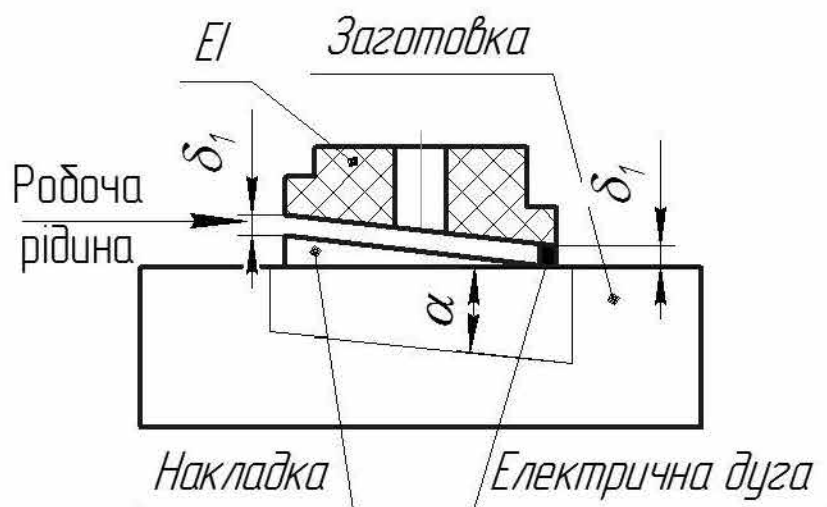


Рис. 4.3. РОД деталей з нахиленою торцевою поверхнею з встановленою накладкою

Для відводу робочої рідини і продуктів ерозії із зони обробки при проектуванні ЕІ в ньому передбачається отвір. Зазвичай такий отвір намагаються розташувати в геометричному центрі ЕІ, що дозволяє забезпечити оптимальні умови течії робочої рідини з однаковими гідравлічними опорами в різних точках зони обробки по периметру.

Проте, якщо заготовка має складний контур, що значно відрізняється від «правильних» геометричних фігур (циліндр, прямокутник тощо) як показано на рисунку 4.4.

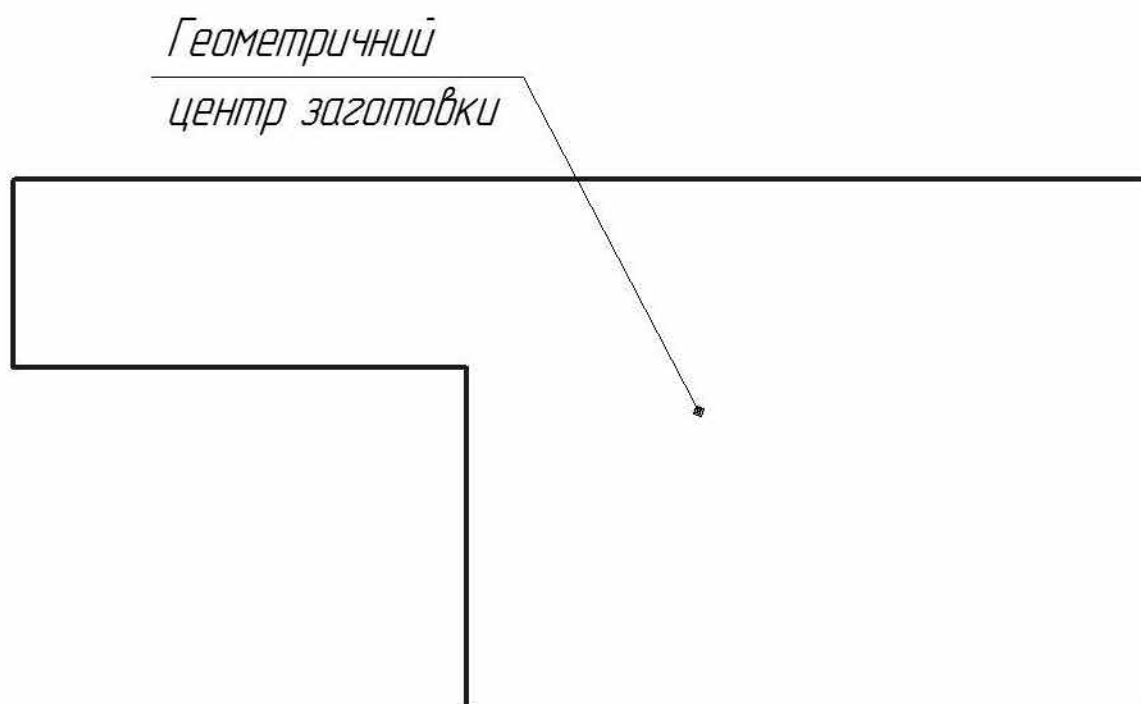


Рис. 4.4. Деталь складного профілю

При розташуванні отвору для відводу робочої рідини і продуктів ерозії в геометричному центрі такої заготовки теоретична довжина траси течії робочої рідини від периметра заготовки до отвору для відведення робочої рідини в різних частинах заготовки будуть значно розрізнятись. При цьому робоча рідина буде текти по закону найменшого опору, тому в деяких точках заготовки, де довжина траси течії робочої рідини буде найбільша, робоча рідина практично текти не буде, що призведе до виникнення електричних дуг

з енергетичними і геометричними параметрами наближеними до зварювальних дуг (рис 4.5).

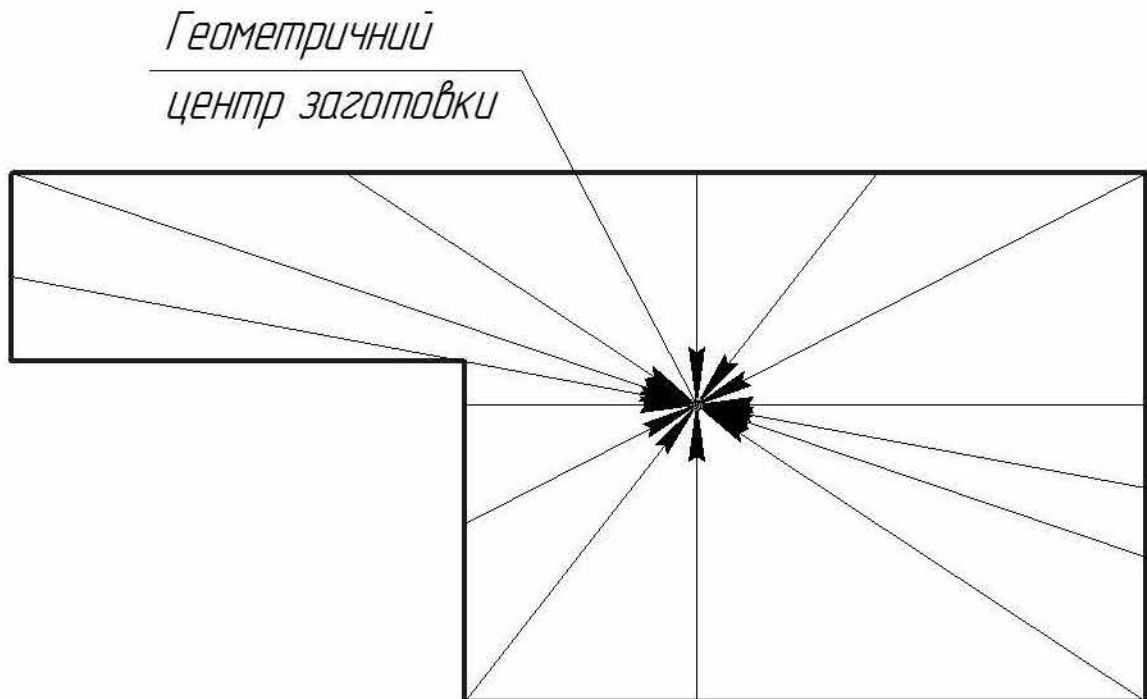


Рис. 4.5. Довжина траси течії робочої рідини в деталі складного профілю

Для того щоб уникнути такого ефекту пропонується розділяти такі складні поверхні на декілька сегментів і розташовувати в геометричних центрах цих сегментів технологічні отвори для відводу робочої рідини та продуктів ерозії із зони обробки (рис. 4.6)

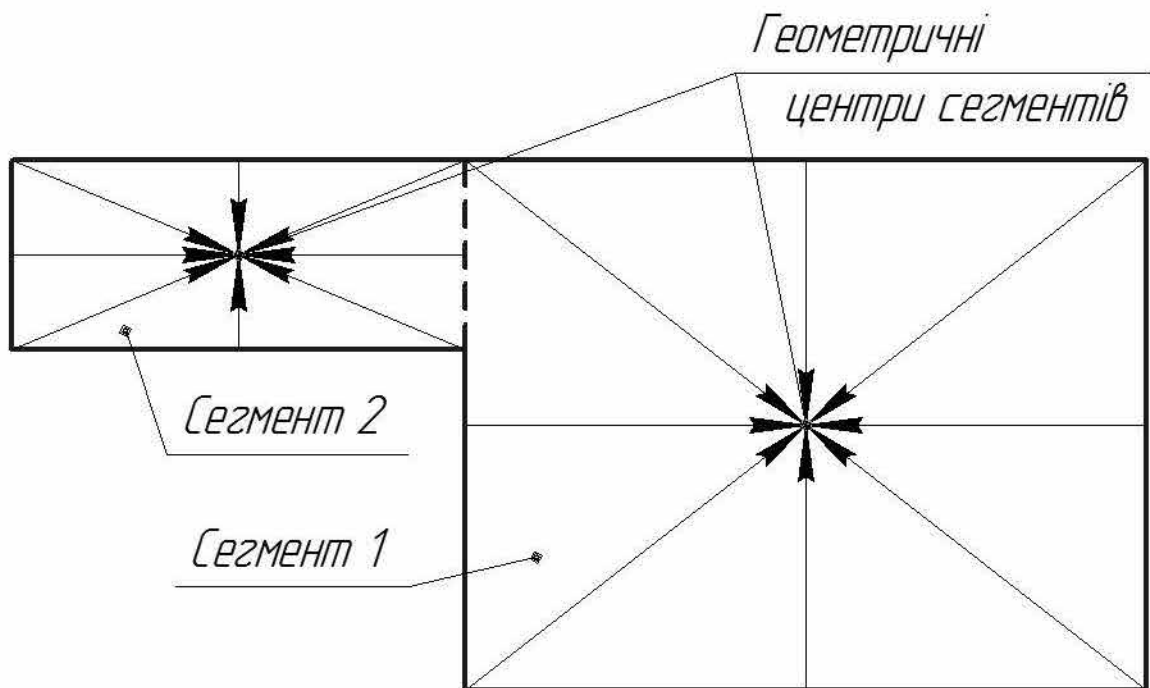


Рис. 4.6. Деталь складного профілю розділена на сегменти

Для того щоб уникнути перетікання робочої рідини між сегментами пропонується розмежувати сегменти «гідравлічним замком» у вигляді пропилу по лінії, що показано на рисунку 4.6. штриховою лінією (див. рис. 4.7)

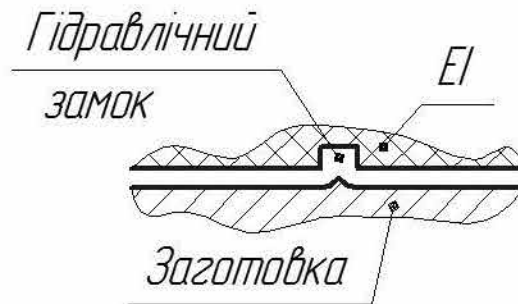


Рис. 4.7. Пропил в EI по границі сегмента для створення гідравлічного замка

## 4.2. Висновки

4.2.1. Запропоновано різні технологічні прийоми для реалізації процесу РОД деталей складного профілю, що дозволяє обробляти деталі які мають нахилену торцеву поверхню по відношенню до початкової поверхні заготовки, а також мають складний контур, що значно відрізняється від «правильних» геометричних фігур (циліндр, прямокутник тощо).

## РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД

В розділі наведений порівняльний аналіз варіантів виготовлення отворів за двома різними технологічними процесами. Згідно базового варіанту отвори виготовляються за дві операції: свердлувальна на верстаті OPTIdrill D 33Pro та електроерозійна на верстаті розмірної обробки дугою.

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

### **Витрати на виконання науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт**

Витрати на проведення НДДКР являються складовою частиною капітальних вкладень, які передбачаються для виготовлення або модернізації системи. Вартість НДДКР визначаємо шляхом розрахунку за окремими статтями витрат у вигляді кошторису (табл. 5.1). Трудомісткість робіт по кожній стадії залежить від призначення, ступені новизни, особливостей конструкції виробу.

Таблиця .5.1.

Трудомісткість виконання НДДКР

Статті витрат та зміст робіт	Трудомісткість в людино - днях
Постановка задачі збір інформації, формулювання технічного завдання.	8
Аналіз діючої системи виявлення недоліків, розробка заходів по її модернізації	15
Розробка ескізного проекту і блок-схем	7
Виготовлення і налагодження макетів, моделей або експериментальних зразків майбутніх виробів, програм і алгоритмів	16
Статті витрат та зміст робіт	Трудомісткість в людино - днях
Витрати на виготовлення первісного комплексу спеціального інструменту і пристроїв (штампів, шаблонів, моделей, інструментів, прес-форм і пристроїв цільового призначення)	15
Складання специфікацій та розробка робочої документації	10
Всього витрат часу, Тнд	71

Величина витрат по кожній статті кошторису НДДКР визначається методом прямого розрахунку і заноситься до табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

Кошторис витрат на виконання НДДКР

Найменування статей	Позначення	Величина, грн.
Заробітна плата науково-виробничого персоналу	$Z_{нд}$	46774,8
Витрати на наукові відрядження	$V_{нд}$	18709,92
Загальногосподарські витрати	$H_{ак}$	9354,96
Всього	$K_{нд}$	74839,68

На основі трудомісткості НДДКР розраховується плановий фонд заробітної плати для ведення наукових досліджень за формулою:

$$Z_{нд} = T_{нд} \cdot O_{нд} \cdot (1 + 0.01 \cdot H_d) \cdot (1 + 0.01 \cdot H_c) \quad (5.1)$$

де  $H_d$  - 20% - процент додаткової зарплати;

$H_c$  - 22% - норматив відрахування у соціальні фонди.

$O_{нд}$  - 450 грн. - середньоденний оклад конструктора;

$$Z_{нд} = 71 \cdot 450 \cdot (1 + 0.01 \cdot 20) \cdot (1 + 0.01 \cdot 22) = 46774,8 \text{ грн.}$$

Витрати на наукові відрядження становлять 40% від заробітної плати:

$$V_{нд} = 46774,8 \cdot 0,4 = 18709,92 \text{ грн.}$$

Загальногосподарські витрати становлять 20% від заробітної плати:

$$H_{ак} = 46774,8 \cdot 0,2 = 9354,96 \text{ грн.}$$

**Визначення технологічної собівартості**

Витрати, що складають технологічну собівартість:

Змінні –  $v$ , величина яких в річній технологічній собівартості змінюється пропорційно зміні програми випуску продукції  $N_e$ , грн./дет.;

Постійні –  $p$ , величина яких суттєво не змінюється зі зміною обсягу річного випуску продукції, грн./дет.

Технологічна вартість продукції в обсязі річного випуску визначається за формулою:

$$C_{р\text{ич}} = v_i \cdot N_e + p_i \quad (5.2)$$

Проведемо порівняння собівартості технологічних процесів із застосуванням поелементного розрахунку.

Формула технологічної собівартості на річну програму випуску має вигляд, грн./дет.:

– для свердлування

$$C_{рiч} = (M_o + Z_{o.d.c.} + B_{ел} + B_e + B_{a.об.} + B_{ен}) \cdot N_e, \quad (5.3)$$

– при застосуванні РОД

$$C_{рiч} = (M_o + Z_{o.d.c.} + B_{ел} + B_{a.об.} + B_{ен} + B_{ел.р.} + B_{р.р.}) N_e + Z_{нал} \quad (5.4)$$

де  $M_o$  – вартість основних матеріалів. Враховується у випадку коли змінюється спосіб розкрою або марка матеріалу;

$Z_{o.d.c.}$  – заробітна плата основна і додаткова виробничих робітників з відрахуванням на соцстрах;

$B_{ел}$  – витрати на електроенергію;

$B_v$  – витрати на воду технічну;

$B_{a.об.}$  – витрати на амортизацію обладнання;

$B_{ен}$  – витрати на експлуатацію приміщень;

$B_{р.р.}$  – витрати на робочу рідину;

$Z_{нал}$  – витрати на налагодження;

Розрахунки по зазначених статтях ведуть за наступними формулами.

### **Змінні витрати**

Вартість основних матеріалів з відрахуванням повернених відходів:

$$M_o = a_p \cdot Ц_m \cdot K_{mp} - q_{ei\delta x} \cdot Ц_{ei\delta x} \quad (5.5)$$

де  $a_p$  – норма витрат металу, кг;  $q_{ei\delta x}$  – маса відходів ( $q_{ei\delta x} = a_p - a_q$ ), кг;  $a_q$  – чиста маса деталі, кг;  $Ц_m$  – ціна 1 кг металу, грн;  $K_{mp}$  – коефіцієнт, що враховує транспортно-заготівельні витрати (приймається 1,05... 1,08);  $Ц_{ei\delta x}$  – ціна 1 кг відходів, грн.

Заробітна плата основна і додаткова виробничих робітників з

відрахуваннями на соціальне страхування:

$$Z_{o.d.c.} = L_{zod.i} \cdot \frac{t_{шт.i}}{60} \cdot (1 + K_{np} + K_{\partial} + K'_{\partial} + K_{шк}) \cdot (1 + \frac{K_c}{100}), \quad (5.6)$$

де  $L_{zod.i}$  – годинна тарифна ставка, грн. (див. табл. 5.3);

$t_{шт.i}$  – штучний час на операцію, хв;

$K_{np}$  – коефіцієнт, що враховує премії відрядникам за виконання плану і якість робіт,  $K_{np} = 0,3 \dots 0,32$ ;

$K_{\partial}$  – коефіцієнт, що враховує доплати за фактично відроблений час,  $K_{\partial} = 0,075 \dots 0,08$ ;

$K'_{\partial}$  – коефіцієнт, що враховує доплати за не відроблений час,  $K'_{\partial} = 0,08 \dots 0,1$ ;

$K_c$  – коефіцієнт, що враховує відрахування на соціальне страхування  $K_c = 22\%$ ;

$K_{шк}$  – коефіцієнт, що враховує шкідливість робіт (при плазмовому різанні),  $K_{шк} = 0,08$ .

Таблиця 5.3

Годинна тарифна ставка

Розряд	II	III	IV
Ставка	30,89	34,00	38,64

Витрати на силову електроенергію

$$B_{ел} = \frac{N_{уст} \cdot K_{од} \cdot K_N \cdot K_{\partial в} \cdot K_{\omega}}{\eta_M} \cdot \frac{t_{шт.i}}{60} \cdot C_{ел} \quad (5.7)$$

де  $N_{уст}$  – встановлена потужність електродвигуна, кВт;

$K_{од}$  – коефіцієнт одночасної роботи двигунів устаткування,  $K_{од} = 0,6 \dots 1,3$ ;

$K_N$  – середній коефіцієнт завантаження двигуна за потужністю, приймається для М та ВС – 0,8; ДС та О – 0,5;

$K_{об}$  – середній коефіцієнт завантаження двигуна за часом, приймається для М та ВС – 0,8; ДС та О – 0,6;

$K_{\omega}$  – коефіцієнт, що враховує витрати електроенергії в мережі, приймається для М та ВС – 1,04; ДС та О – 1,08;

$\eta_m$  – ККД електродвигунів;

$C_{ел}$  – ціна 1 кВт·год електроенергії, приймається 2,35 грн/ кВт·год.

Витрати на ремонт устаткування, грн.:

$$B_{рем} = \frac{(W_m \cdot R_m + W_e \cdot R_e)}{T_{рц}} \cdot \frac{t_{ум.і}}{60}, \quad (5.8)$$

де  $W_m, W_e, W_{ел}$  – витрати на всі види ремонту за ремонтний цикл;

$R_m, R_e, R_{ел}$  – умовна ремонтна складність відповідно механічної, електричної та електронної частини устаткування;

$T_{рц}$  – тривалість міжремонтного циклу.

Витрати на амортизацію універсального устаткування:

$$B_{ам.об} = \frac{C_б \cdot H_{а.відр.}}{\Phi_{д.о.} \cdot \lambda_n \cdot 100} \cdot \frac{t_{ум.і}}{60}, \quad (5.9)$$

де  $C_б$  – балансова вартість обладнання, грн;

$H_{а.відр.}$  – норма амортизаційних відрахувань, приймається 15 %;

$\Phi_{д.о.}$  – дійсний річний фонд часу роботи обладнання ;

$\lambda_n$  – нормативний коефіцієнт завантаження обладнання за часом .

Витрати на експлуатацію приміщень:

$$B_{ен} = \frac{S_{е.пт} \cdot K_f \cdot C_{кз}}{\Phi_{д.о.} \cdot \lambda_n} \cdot \frac{t_{ум.і}}{60}, \quad (5.10)$$

де  $S_{е.пт}$  – виробнича площа в плані, що зайнята одиницею устаткування, м<sup>2</sup>,

$K_f$  – коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення), приймають за табл. 5.4.

$C_{кз}$  – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м<sup>2</sup> виробничої площі,

грн/м<sup>2</sup>·рік, величина  $C_{к2}$  складає для О та ДС – 1200; для ВС та М – 1500.

Таблиця 5.4

Коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу

$S_{в.м}$ , м <sup>2</sup>	3,0	6,0	12,0	20	30	40 і більше
$K_f$	6,0	5,0	4,0	2,5	2,0	1,5

Витрати на стиснене повітря:

$$B_{c.нов} = Q_{c.нов} \cdot \Pi_{c.нов} \cdot K_{me} \cdot \frac{t_{ум.і}}{60}, \quad (5.11)$$

де  $Q_{c.нов}$  – витрати стисненого повітря, м<sup>3</sup>/год;  $\Pi_{c.нов}$  – ціна 1 м<sup>3</sup> стисненого повітря, прийнято 0,45 грн/м<sup>3</sup>;  $K_{me}$  – коефіцієнт, що враховує тип виробництва, для ДС – 0,85; для М – 1,15.

Витрати на воду:

$$B_{вод} = Q_{вод} \cdot \Pi_{вод} \cdot K_{me} \cdot \frac{t_{ум.і}}{60}, \quad (5.12)$$

де  $Q_{вод}$  – витрата води, м<sup>3</sup>/год;  $\Pi_{вод}$  – ціна 1 м<sup>3</sup> води, прийнято 9,56 грн/м<sup>3</sup>.

Витрати на електроди вольфрамові:

$$B_{ел.вфр} = Q_{ел.вфр} \cdot \Pi_{ел.вфр} \cdot \frac{t_{ум.і}}{60}, \quad (5.13)$$

де  $Q_{ел.вфр}$  – витрата вольфрамового електрода гр/м;  $\Pi_{ел.вфр}$  – ціна 1 гр вольфрамового електрода, грн/гр.

Витрати на електроди графітові:

$$B_{ел.гр} = Q_{ел.гр} \cdot \Pi_{ел.гр} \cdot h_{ел.гр} \cdot \Pi, \quad (5.14)$$

де  $Q_{ел.гр}$  – витрата графітового електрода мм/хв (приймається 0,05);

$\Pi_{ел.гр}$  – ціна 1 гр графітового електрода, грн/гр;

$h_{ел.гр}$  – питома вага графіту, гр/мм<sup>3</sup>;

$\Pi$  – площа робочої поверхні електрода, мм<sup>2</sup>.

Витрати на кисень

$$B_{O_2} = Q_{O_2} \cdot C_{O_2} \cdot \frac{t_{um.i}}{60}, \quad (5.15)$$

де  $Q_{O_2}$  – витрата кисню (залежить від товщини металу) кг/год ;

$C_{O_2}$  – ціна кисню, грн/кг.

Витрати на гелій

$$B_{He} = Q_{He} \cdot C_{He} \cdot \frac{t_{um.i}}{60}, \quad (5.16)$$

де  $Q_{He}$  – витрата гелію, кг/год;

$C_{He}$  – ціна гелію, грн/гр.

Витрати на азот

$$B_{N_2} = Q_{N_2} \cdot C_{N_2} \cdot \frac{t_{um.i}}{60}, \quad (5.17)$$

де  $Q_{N_2}$  – витрата азоту, кг/год;

$C_{N_2}$  – ціна азоту, грн/гр.

Витрати на вуглекислоту

$$B_{CO_2} = Q_{CO_2} \cdot C_{CO_2} \cdot \frac{t_{um.i}}{60}, \quad (5.18)$$

де  $Q_{CO_2}$  – витрата вуглекислоти, кг/год;

$C_{CO_2}$  – ціна азоту, грн/гр.

Витрати на робочу рідину

$$B_{p.pid.} = Q_{p.pid.} \cdot C_{p.pid.} \cdot \frac{t_{um.i}}{60}, \quad (5.19)$$

де  $Q_{p.pid.}$  – витрата робочої рідини, кг/рік;

$C_{p.pid.}$  – ціна робочої рідини, грн.

### Постійні витрати

Витрати на налагодження

$$Z_{нал} = A \cdot L_{год.нал} \cdot \frac{t_{n.z.i}}{60} \cdot (1 + K_{np} + K_{\delta} + K_{\delta}') \cdot (1 + \frac{K_c}{100}), \quad (5.20)$$

де  $A$  – кількість партій, що відповідає кількості переналагоджень на рік;

$L_{\text{год.налі}}$  – годинна тарифна ставка наладчика, грн/год;

$t_{\text{н.з.і}}$  – підготовчо-заключний час на даній операції, хв.

Витрати на штампи на річну програму

$$Z_{\text{ш}} = \frac{C_{\text{ш}} + p \cdot C_{\text{ш}}}{T_{\text{сл}}} \cdot (1 + b), \quad (5.21)$$

де  $C_{\text{ш}}$  – первинна вартість штампа, грн;  $C_{\text{ш}}$  – ціна однієї переточки, грн;  $p$  – кількість переточок;  $T_{\text{сл}}$  – строк служби, протягом якого штамп повинен бути списаний;  $b$  – кількість дублерів.

Витрати на амортизацію засобів механізації та автоматизації

$$B_{\text{а.сн.}} = \frac{C_{\sigma} \cdot H_{\text{а.р.}}}{100}, \quad (5.22)$$

де  $C_{\sigma}$  – балансова вартість пристрою, грн.  $Q_{\text{р.під.}}$   $C_{\text{р.під.}}$

Визначаємо технологічну собівартість за наведеними вище формулами (5.1-5.22) за базовим та запропонованим варіантами і результати розрахунку зводимо до табл. 5.7 – 5.12.

### **Розрахунок технологічної собівартості за базовим варіантом**

Вихідні дані по трудомісткості операцій базового технологічного процесу та параметрах обладнання для розрахунку технологічної собівартості на операції пробивання квадратних отворів наведені в таблицях 5.5 і 5.6.

Таблиця 5.5

Базовий технологічний процес

№ п/п	Операція	Модель обладнання	Штучний час, хв $t_{\text{шт } i}$	Підготовчо-заключний час, хв $t_{\text{н.з.}}$	Розряд робітник а	Тарифна ставка
1	Свердлування	OPTIdrill D 33Pro	5	30	IV	38,64
1	РОД	Установка РОД	5	30	IV	38,64

## Параметри обладнання

Модель	Габарити, м		Площа в плані, м <sup>2</sup>	Коеф. додаткової площі	Потужність двигуна, кВт	ККД двигуна, %	Вартість Цб, грн
	L	B					
Установка РОД	5	3	15	2	15	0,8	450000
ВДУ-504УХЛЗ	1,27	0,81	1,0287	4	5	0,8	10770
OPTIdrill D 33Pro	0,8	0,5	0,4	2	1,1	0,8	31044

Продовження табл. 5.6

Умовна ремонтна складність, УРЕ			Витрати на 1 УРЕ, грн			Тривалість ремонтного циклу Тр.ц, годин	Амортизація відрахування, %
R <sub>м</sub>	Re	Rel	W <sub>м</sub>	We	We <sub>л</sub>		
14	5,5	0	1500	1000	0	50000	0,15
0	5	5	0	180	100	50000	0,15
6	5	5	500	180	100	50000	0,15

Розрахунок змінних витрат на операції здійснюється за формулами (5.2)...(5.14) і представлений в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7

## Розрахунок перемінних витрат на пробивання отвору

№ статті витрат	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
	a <sub>p</sub>	Норма витрати металу	кг	0
M <sub>o</sub>	a <sub>ч</sub>	Чиста маса	кг	0
0	Ц <sub>м</sub>	Ціна 1 кг матеріалу	грн	14,5
	Ц <sub>відх</sub>	Ціна 1 кг відходів	грн	3,4
	K <sub>тр</sub>	Коеф транспортно-заготів. витрат	1,05... 1,08	0,7
	t <sub>шт</sub>	Штучний час	хв	10
З <sub>о.д.с.</sub>	L <sub>год</sub>	Годинна тарифна ставка	грн	38,64
11,549496	K <sub>пр</sub>	Коеф премій за виконання плану	0,3...0,32	0,3
	K <sub>д</sub>	Коеф. доплат за фактично відроблений час	0,075..0,08	0,08
	K <sub>д1</sub>	Коеф. премій за вик плану	0,08...0,1	0,09
	K <sub>с</sub>	Відрахування на соцстрах	0,5	0,22
	N <sub>уст</sub>	Встановлена потужність двигуна	кВт	21,1
	В <sub>ел</sub>	ККД двигуна	-	0,8
2,3428912	Ц <sub>ел</sub>	Ціна 1 кВт.год електроенергії	грн	2,35

№ статті витрат	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
5				
	$K_{од}$	Коеф одночасної роботи двигунів	0,6... 1,3	0,7
	$K_N$	Коеф завантаження за потужністю	BC-0,8;ДС-0,5	0,5
	$K_{дв}$	Коеф завантаження за часом	BC-0,8;ДС-0,6	0,6
	$K_w$	Коеф втрат ел енергії в мережі	BC-1,04;ДС-1,08	1,08
	$W_M$	Витрати на ремонт механічної частини	грн/УРЕ	24000
$V_{рем}$	$W_e$	Витрати на ремонт електричної частини	грн/УРЕ	7300
0,107666667	$W_{ел}$	Витрати на ремонт електронної частини	грн/УРЕ	1000
	$R_M$	Умовна ремонт. складність механічної частини	УРЕ	14
	$R_e$	Умовна ремонтна складність електр. частини	УРЕ	4,5
	$R_{ел}$	Умовна ремонтна складність електрон. частини	УРЕ	0
	$T_{р.ц.}$	Тривалість міжремонтного циклу	год	50000
	$C_б$	Балансова вартість обладнання	грн	491814
$V_{ам.обл}$	$H_{а.р.}$	Норма амортизаційних відрахувань	%/100%	0,15
3,284014423	$\Phi_{д.о.}$	Дійсний річний фонд часу роботи обладнання	год	4680
	$\lambda_n$	Коефіцієнт завантаження обладнання за часом	-	0,8
	$S_{в.пл}$	Виробнича площа в плані	м <sup>2</sup>	16,4287
$V_{е.прим}$	$K_f$	Коефіцієнт додаткової виробничої площі	-	2,6666667
0,004505295	$C_{пл}$	Річні витрати, пов'язані з використанням 1м <sup>2</sup> площі	грн	1200
	$Q_{р.рід}$	Витрати робочої рідини	кг	0,2
$V_{р.рід}$	$C_{р.рід}$	Вартість робочої рідини (масла)	грн/кг	92
3,0666667				
	$Q_{ел.грф}$	Витрати графітових електродів	мм/хв	0,05
$V_{ел.грф}$	$C_{ел.грф}$	Вартість графітових електродів	грн/г	0,7
1,23088	$h_{ел.грф}$	Питома вага	г/мм <sup>3</sup>	2,1
	$\Pi$	Площа робочої поверхні	мм*мм	100,48

Розрахунок постійних витрат здійснюється згідно формул (5.20)...(5.22) і представлений в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8

Розрахунок постійних витрат на пробивання отвору

№ статті витрат	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
2.1.	$t_{п.з.}$	Підготовчо-заключний час	хв	30
$Z_{нал}$	$L_{год.нал}$	Годинна тарифна ставка наладчика	грн/год	0,8135
10,763	<b>A</b>	Кількість партій (що відповідає кількості переналагоджень) на рік	-	12
2.2.	$\Pi_{шт}$	Первинна вартість штампа	грн	2700
$Z_{ш}$	$C_{ш}$	Вартість ремонту	грн	150
2100	$p$	Кількість переточок	раз	10
	$b$	Кількість дублерів	шт	0
	$T_{сп}$	Строк експлуатації до повного зносу	років	2

Розрахунок транспортних витрат на перевезення заготовок до механоскладального цеху із застосуванням електрокар приведений в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9

Розрахунок транспортних витрат

Параметр	Розмірність	Значення
Маса деталі	кг	1,49
Програма випуску	шт	50000
Вантажопід'ємність електрокари	кг	350
Тривалість 1 перевезення	годин	0,5
Вартість 1 години експлуатації електрокари	грн/год	16,23
Кількість перевезень	разів	235
Тривалість роботи електрокари	годин	117
Вартість експлуатації електрокари на програму	грн	1899

Параметрах обладнання для розрахунку технологічної собівартості на операції зенкування фасок наведені в таблиці 5.10.

### Запропонований варіант

Вихідні дані по трудомісткості та параметрах обладнання для розрахунку технологічної собівартості на операції прошивання круглих отворів з фасками наведені в таблицях 5.10 і 5.11.

Таблиця 5.10

#### Базовий технологічний процес

№ П/П	Операція	Модель обладнання	Штучний час, хв $t_{шт i}$	Підготовчо-заклучний час, хв $t_{n.з.}$	Розряд робітника	Тарифна ставка
1	РОД	Установка РОД	7	30	IV	38,64

Таблиця 5.11

#### Параметри обладнання

Модель	Габарити, м		Площа в плані, м <sup>2</sup>	Коеф. додаткової площі	Потужність двигуна, кВт	ККД двигуна, %	Вартість Цб, грн
	L	B					
Установка РОД	5	3	15	2	15	0,8	450000
ВДУ-504УХЛЗ	1,27	0,81	1,0287	4	5	0,8	10770
Витрати НДДКР			0				74840

Продовження табл. 5.11

Умовна ремонтна складність, УРЕ			Витрати на 1 УРЕ, грн			Тривалість ремонтного циклу Тр.ц, годин	Амортизація відрахування, %
Rm	Re	Rel	Wm	We	Wel		
14	5,5	0	1500	1000	0	50000	0,15
0	5	5	0	180	100	50000	0,15
0	0	0	0	0	0	0	0,15

Розрахунок змінних витрат на операції здійснюється за формулами (5.2)...(5.14) і представлений в таблиці 5.12.

Таблиця 5.12

## Розрахунок перемінних витрат на пробивання отвору

№ статті витрат	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
	$a_p$	Норма витрати металу	кг	0
$M_o$	$a_{ч}$	Чиста маса	кг	0
0	$\Pi_m$	Ціна 1 кг матеріалу	грн	14,5
	$\Pi_{відх}$	Ціна 1 кг відходів	грн	3,4
	$K_{тр}$	Коеф транспортно-заготів. витрат	1,05... 1,08	0,7
	$t_{шт}$	Штучний час	хв	7
$Z_{o.d.c.}$	$L_{год}$	Годинна тарифна ставка	грн	38,64
11,549496	$K_{пр}$	Коеф премій за виконання плану	0,3...0,32	0,3
	$K_d$	Коеф. доплат за фактично відроблений час	0,075..0,08	0,08
	$K_{д1}$	Коеф. премій за вик плану	0,08...0,1	0,09
	$K_c$	Відрахування на соцстрах	0,5	0,5
	$N_{уст}$	Встановлена потужність двигуна	кВт	20
$V_{ел}$	ККД	ККД двигуна	-	0,8
2,34289125	$\Pi_{ел}$	Ціна 1 кВт.год електроенергії	грн	2,35
	$K_{од}$	Коеф одночасної роботи двигунів	0,6... 1,3	0,7
	$K_N$	Коеф завантаження за потужністю	BC-0,8;ДС-0,5	0,5
	$K_{дв}$	Коеф завантаження за часом	BC-0,8;ДС-0,6	0,6
	$K_w$	Коеф втрат ел енергії в мережі	BC-1,04;ДС-1,08	1,08
<b>6.4.</b>	$W_m$	Витрати на ремонт механічної частини	грн/УРЕ	21000
$V_{рем}$	$W_e$	Витрати на ремонт електричної частини	грн/УРЕ	5500
0,107666667	$W_{ел}$	Витрати на ремонт електронної частини	грн/УРЕ	0
	$R_m$	Умовна ремонт. складність механічної частини	УРЕ	50000
	$R_e$	Умовна ремонтна складність електр. частини	УРЕ	535610
	$R_{ел}$	Умовна ремонтна складність електрон. частини	УРЕ	0,15
	$T_{р.ц.}$	Тривалість міжремонтного циклу	год	4680
	$C_b$	Балансова вартість обладнання	грн	0,8
$V_{ам.обл}$	$H_{a.p.}$	Норма амортизаційних відрахувань	%/100%	16,0287

№ статті витрат	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
3,2840144 23	$\Phi_{д.о.}$	Дійсний річний фонд часу роботи обладнання	год	1,2
	$\lambda_n$	Коефіцієнт завантаження обладнання за часом	—	1200
	$S_{в.пл}$	Виробнича площа в плані	м <sup>2</sup>	0,2
$V_{е.прим}$	$K_f$	Коефіцієнт додаткової виробничої площі	—	92
0,0045052 95	$C_{пл}$	Річні витрати, пов'язані з використанням 1м <sup>2</sup> площі	грн	
	Qp.рід	Витрати робочої рідини	кг	0,05
Вр.рід	Цр.рід	Вартість робочої рідини (масла)	грн/кг	0,7
3,066666 7				2,1
	Q ел.грф	Витрати графітових електродів	мм/хв	100,48
Вел.грф	Ц ел.грф	Вартість графітових електродів	грн/г	0
1,23088	h ел.грф	Питома вага	г/мм <sup>3</sup>	0
	П	Площа робочої поверхні	мм*мм	14,5

Розрахунок постійних витрат здійснюється згідно формул (5.20)...(5.22) і представлений в таблиці 5.13.

Таблиця 5.13

Розрахунок постійних витрат на пробивання отвору

№ п/п статті	Позначка	Найменування	Розмірність	Значення
2.1.	тп.з.	Підготовчо-заключний час	хв	30
Знал	Лгод.нал	Годинна тарифна ставка наладчика	грн/год	38,64
213,003	A	Кількість партій (що відповідає кількості переналаджень)	-	5
2.2.	Ці	Пристрій	грн	600
Зі		Строк експлуатації до повного зносу	років	1
600	Тел			

## Розрахунок технологічної собівартості

№ п/п	Витрати	Розмір витрат, грн
1	<b>Перемінні</b>	17,788
1.1.	Основні матеріали	0
1.2.	Заробітна плата	9,94014
1.3.	Електроенергія	1,55453
1.4.	Ремонт	0,06183
1.5.	Амортизація	2,50352
1.6.	Експлуатація приміщень	0,71924
1.7.	Робоча рідина	2,147
1.8.	Електроди графітові	0,86162
2	<b>Постійні</b>	213,003
2.1.	Налагодження	213,003

Для розмежування області ефективного використання варіантів технологічного процесу, розраховуємо критичну програму, при якій варіанти рівноцінні, тобто  $C_{m1} = C_{m2}$ .

Критична програма випуску визначається за формулою, шт

$$N_{кр} = \frac{p_1 - p_2}{v_2 - v_1}, \quad (5.23)$$

де  $p_1$  і  $p_2$  – відповідно, постійні витрати по базовому варіанту ( $p_1 = 746,4849$  грн) та по запропонованому ( $p_2 = 813,0030$  грн);

$v_1$  і  $v_2$  – відповідно, перемінні витрати по базовому варіанту ( $v_1 = 23,9219$  грн) та по запропонованому ( $v_2 = 17,7875$  грн).

$$N_{кр} = (746,4849 - 813,0030) / (17,7875 - 23,9219) = 11 \text{ шт.}$$

При програмі випуску деталей, яка перевищує  $N_{кр}$ , в тому числі, для заданої програми (50000 шт/рік), більш ефективним є запропонований варіант.

Розрахунки таблиць зведені в порівняльну калькуляцію витрат (табл. 5.15).

## Порівняльна калькуляція витрат

№ п/п	Витрати	Розмір витрат, грн	
		базовий	запропонований
1	<b>Змінні</b>	23,9219	17,7875
1.1.	Основні матеріали	0	0
1.2.	Заробітна плата	11,5495	9,9401
1.3.	Електроенергія	2,3429	1,5545
1.4.	Ремонт	0,1077	0,0618
1.5.	Амортизація	3,2840	2,5035
1.6.	Експлуатація приміщень	2,3403	0,7192
1.7.	Робоча рідина	3,0667	2,1467
1.8.	Електрод графітовий	1,2309	0,8616
2	<b>Постійні (на програму)</b>	746,4849	813,0030
	<b>(на одиницю продукції)</b>	0,014929698	0,01626006
2.1.	Налагодження	346,4849	213,0030
2.2.	Вартість пристосувань	400	600

Економічний ефект від впровадження при програмі випуску 50000 шт:

$$E = (C_{\text{баз}} - C_{\text{проект}}) N$$

$$E = (23,936829698 - 17,80376006) 50000 = 306653,48 \text{ грн.}$$

Строк окупності:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_2 - K_1}{E}$$

$$T_{\text{ок}} = (535610 - 491814) / 306653,48 = 0,14 \text{ року}$$

Розширені результати розрахунків економічного ефекту та терміну окупності при програмі випуску від 10000 до 50000 шт. виробів зводимо до таблиці 5.16.

## Результати розрахунку економічного ефекту та строку окупності

Програма випуску, шт.	Технологічна собівартість		Економічний ефект, грн.	Строк окупності, років
	Базовий варіант	Запропонований варіант		
1000	24,66837	18,60054	6067,831	7,217736
5000	24,07118	17,95014	30605,23	1,430997
9000	24,00483	17,87787	55142,62	0,794231
13000	23,97931	17,85008	79680,02	0,549648
17000	23,9658	17,83536	104217,4	0,420237
21000	23,95743	17,82625	128754,8	0,34015
25000	23,95175	17,82006	153292,2	0,285703
29000	23,94763	17,81557	177829,6	0,246281
33000	23,94451	17,81217	202367	0,216419
37000	23,94206	17,80951	226904,4	0,193015
41000	23,94009	17,80737	251441,8	0,174179
45000	23,93847	17,8056	275979,2	0,158693
49000	23,93712	17,80413	300516,6	0,145736
53000	23,93597	17,80288	325054	0,134735

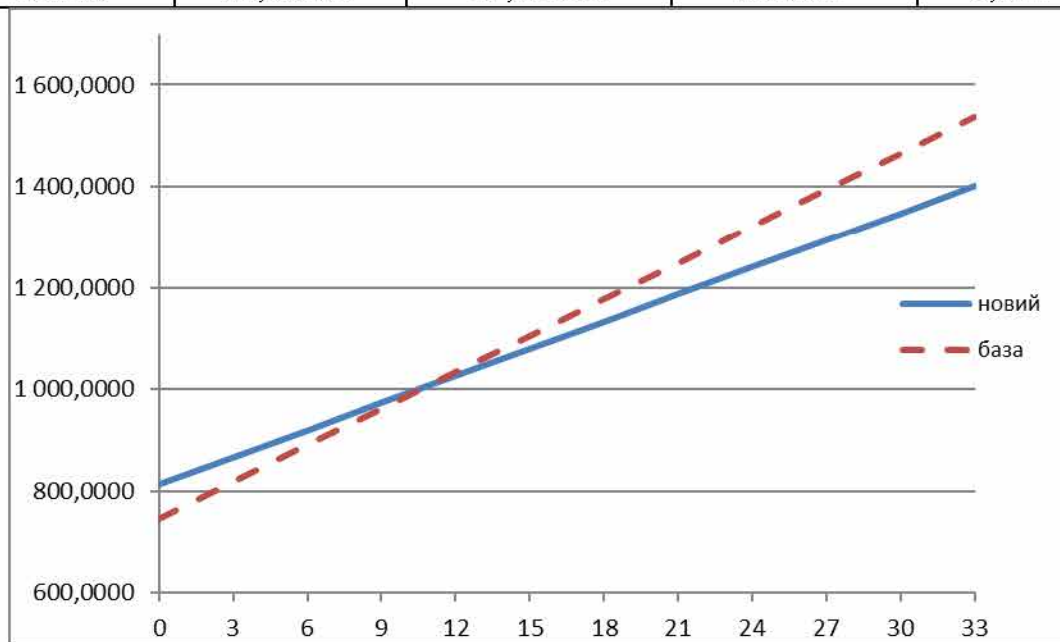


Рис. 5.1. Розмежування області ефективного використання варіантів технологічного процесу

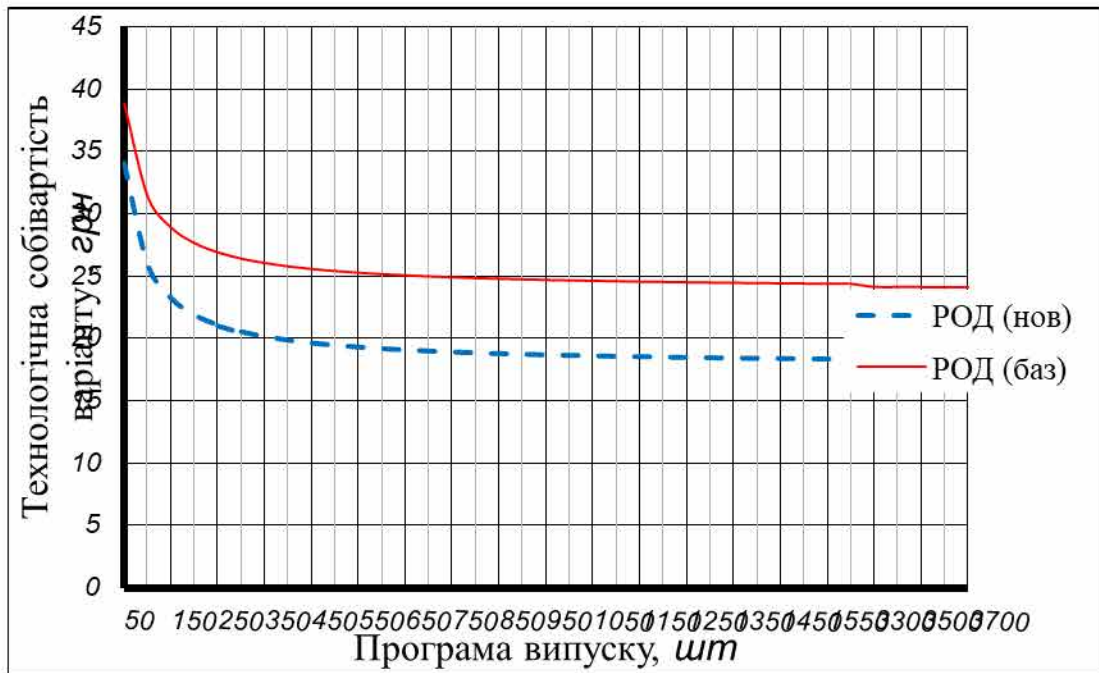


Рис. 5.2. Графіки технологічної собівартості варіантів в залежності від програми випуску

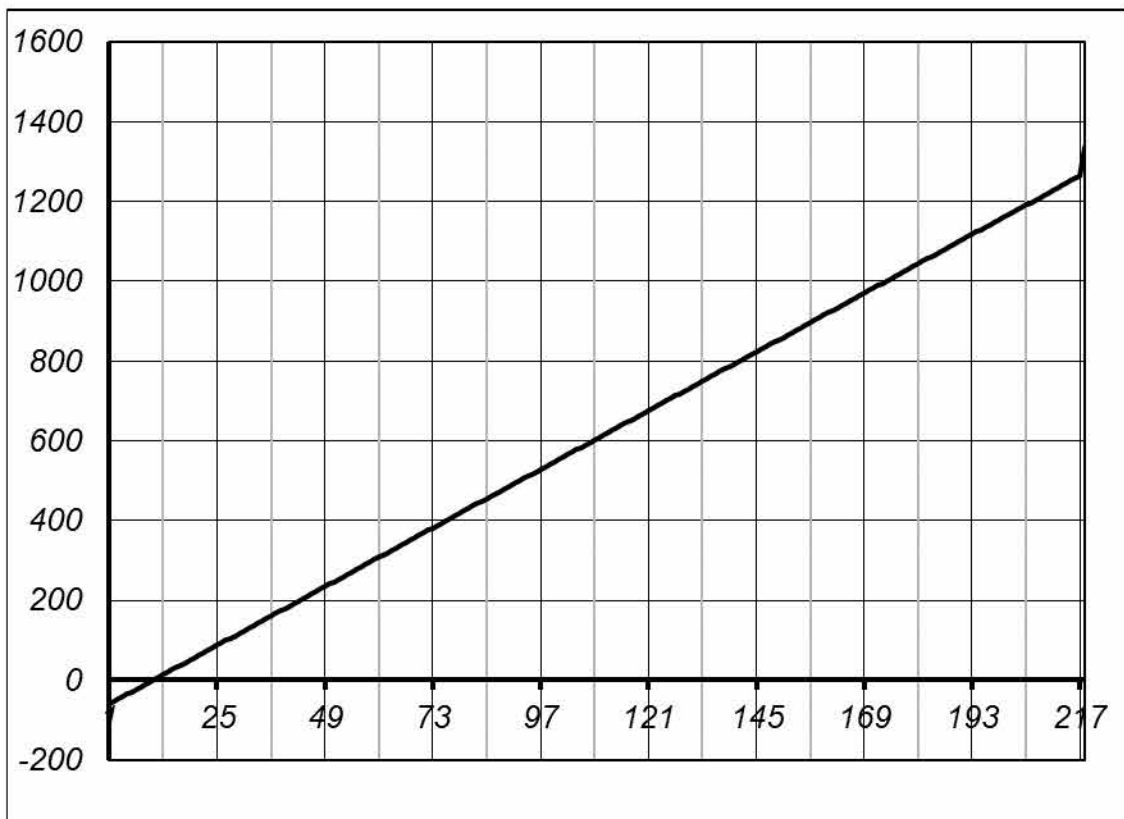


Рис. 5.3. Графік економічного ефекту в залежності від програми випуску

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень.

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

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

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

Продуктивність обробки приблизно прямо пропорційна силі технологічного струму, який обмежується площею поперечного перерізу ЕІ.

Шорсткість обробленої поверхні є переважно функцією статичного тиску при вході в зазор.

ЕІ, виготовлений із матеріалу МПГ-7 має досить високу стійкість, його лінійний знос коливається в межах 0,3...1% і залежить від режиму обробки та геометрії робочої частини ЕІ. Величина міжелектродних зазорів коливається в межах 0,04...0,12 мм.

5. Запропоновано різні технологічні прийоми для реалізації процесу РОД деталей складного профілю, що дозволяє обробляти деталі які мають нахилену торцеву поверхню по відношенню до початкової поверхні заготовки, а також мають складний контур, що значно відрізняється від «правильних» геометричних фігур (циліндр, прямокутник тощо).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Авториф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТТУ „КПІ”. – Київ, 1999. – 36 с.
2. Носуленко В.І., Шмельов В.М. Розмірна обробка металів електричною дугою // Навчальний посібник ПП „Експлозив-Систем”, Кропивницький, 2017.
3. Зубцов М. Е. Листовая штамповка: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности “Машины и технология обработки металлов давлением”. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1980. – 432 с.
4. Ковка и штамповка: Справочник: В 4 т. Т. 4 Листовая штамповка / Под ред. А. Д. Матвеева; Ред. совет: Е. И. Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1985–1987. – 544 с.
5. Общемашиностроительные нормативы времени на газовую сварку, газовую, газoeлектрическую и кислородно-флюсовую резку черных, коррозионно-стойких и цветных металлов – М. Экономика, 1989. – 171 с.
6. Эсибян Э. М. Выбор способов и оборудования для термической резки металлов // Сварщик. – 1999. – № 3 – С. 4...6.
7. Плазменно-дуговая аппаратура. Эсибян Э. М. “Техніка”, 1971, 164 с.
8. Хильчевский В. В. Новая технология производства и ремонта режущих органов сельскохозяйственных машин // Материалы конф. “Высокоэффективные технологии в машиностроении”. – Харьков: АТМ України. – 1998. – С. 91.
9. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.03.04. / ТПИ. – Тула, 1977. – 26 с.
10. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М. : Машиностроение, 1985. – 264 с.

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