

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:
«Підвищення жорсткі установки РОД з використанням
електроерозійних головок»
«Increasing the rigidity of EDM installations using EDM heads»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ПМ-22М-2
спеціальності 131
«Прикладна механіка»,
_____ Голованов І. В.

Керівник проекту
канд. техн. наук, доцент
_____ Віталій ШМЕЛЬОВ

Рецензент
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр КУЗИК

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет: Механіко-технологічний

Кафедра: Обробки металів тиском та спецтехнологій

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ММР

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

30 серпня 2023 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ
Голованова Івана Валентиновича**

1. Тема роботи: «Підвищення жорсткі установки РОД з використанням електроерозійних головок».

2. Керівник роботи: Шмельов Віталій Миколайович, канд. техн. наук, доцент.

3. Строк подання роботи до захисту: 02 січня 2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.

Мета: дослідження технологічних характеристик процесу та жорсткості обладнання для розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.

Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методику експериментальних досліджень; виконати експериментальні дослідження та провести аналіз отриманих результатів; розробити рекомендації для підвищення жорсткості конструкцію установки для РОД з використанням електроерозійних головок; виконати розрахунки з економічної частини.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи:

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
№ 5 «Економічна частина»	Савеленко Г. В., к. т. н., доц.	04.09.2023 р.	20.12.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури	15.09.2023 р.	
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу	02.10.2023 р.	
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення керівникові	25.11.2023 р.	
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту	15.12.2023 р.	
5	Перевірка роботи на плагіат	20.12.2023 р.	
6	Зовнішнє рецензування роботи	22.12.2023 р.	
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії	16.01.2024 р.	

Дата видачі завдання
30 серпня 2023 р.

Підпис керівника
_____ Шмельов В. М.

Завдання прийнято до виконання
30 серпня 2023 р.

Підпис здобувача
_____ Голованов І. В.

АНОТАЦІЯ

Голованов І.В. «Підвищення жорсткості установки РОД з використанням електроерозійних головок», спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП - «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023 рік.

Метою роботи є дослідження технологічних характеристик процесу та жорсткості обладнання для розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.

Проведено дослідження жорсткості установки розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок на базі настільного свердлувального верстата, та дані рекомендації по підвищенню жорсткості установки, що дозволить суттєво підвищити точність та якість обробки на таких установках.

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

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

ANNOTATION

Holovanov I. "Increasing the rigidity of EDM installations using EDM heads", specialty 131 "Applied Mechanics", EP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023.

The purpose of the work is to study the technological characteristics of the process and the rigidity of the equipment for dimensional processing with an electric arc using electroerosion heads as a highly effective alternative to traditional methods of metalworking.

A study of the rigidity of the installation of dimensional processing with an electric arc using electroerosion heads based on a desktop drilling machine was carried out, and recommendations were given to increase the rigidity of the installation, which will significantly improve the accuracy and quality of processing on such installations.

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

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. РОД ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНА АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ.....	9
1.1. Штампування.....	9
1.2. Лазерне різання.....	12
1.3. Плазмове різання.....	13
1.4. Електроерозійна обробка.....	17
РОЗДІЛ 2. НАПРЯМКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	31
2.1. Обґрунтування напрямків і методів досліджень.....	31
2.2. Обладнання, пристрої, апаратура.....	33
2.3. Планування експерименту та статистична обробка результатів.....	34
2.4 Охорона праці при роботі на верстатах РОД.....	37
2.5. Висновки.....	38
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД	39
3.2. Визначення технологічних характеристик РОД металевим ЕІ	39
3.2. Висновки.....	46
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ УСТАНОВКИ ДЛЯ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЕГ.....	47
4.1. Дослідження жорсткості установки	47
4.2. Висновки.....	54
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	61
ДОДАТКИ.....	63

ВСТУП

Актуальність теми. На сьогодні підприємства переходять від масового характеру виробництва до серійного та дрібносерійного. Тому постає питання вибору оптимальної технології виготовлення тих чи інших деталей. Правильне вирішення цього питання дозволить розширити номенклатуру не тільки типорозмірів, а й форми готових виробів.

Той чи інший спосіб виготовлення передбачає різноманітні обмеження щодо форми та розмірів готових деталей. Так наприклад при штампуванні мінімальний розмір при вирубуванні-пробиванні залежить від товщини заготовки, він повинен бути мінімум в 1,2 рази більший товщини заготовки; при використанні лазера слід звернути увагу на наявність зони термічного впливу, можливі проблеми при отриманні деталей з товстолистових заготовок, можливість короблення готових деталей, а також значна частка початкових капіталовкладень передбачають використання лазера в тих випадках, коли без нього неможливо обійтися. Застосування плазмового різання заготовки є найдешевшим але наявність значної зони термічного впливу і оплавлених країв унеможливує застосування плазмового різання для виготовлення деталей.

Спосіб розмірної обробки електричною дугою (РОД) [1], що запропонував Носуленок В.І., як спосіб електроерозійної обробки стаціонарною електричною дугою, дає можливість отримання деталей різноманітного контуру без зони термічного впливу, без оплавлених країв, товщина заготовки залежить лише від довжини електрод-інструмента (ЕІ).

Універсальні та спеціальні верстати РОД є відносно дорогими для застосування їх на підприємствах з одиночним та дрібносерійним виробництвом, а також у ремонтних майстернях. Одним з перспективних напрямків є розробка електроерозійних головок (ЕЕГ) [2] до металорізальних верстатів, що дозволяють без суттєвих змін в конструкції верстату

встановлювати на нього ЕЕГ, а після завершення обробки знімати ЕЕГ і використовувати верстат за своїм призначенням.

Найбільш розповсюдженим металорізальним верстатом в ремонтних майстернях, дрібних підприємствах є настільні свердлувальні верстати.

Проте, такі верстати призначені для отримання отворів в деталях з великими допусками на точність їх виготовлення. В наслідок чого жорсткість таких верстатів не є високою, в порівнянні з спеціалізованим обладнанням для електроерозійної обробки. При цьому між електродний зазор між електродом і заготовкою в процесі обробки може сягати сотих і десятих часток міліметра.

Таким чином, виконання досліджень, спрямованих на визначення жорсткості обладнання за умов РОД з використанням електроерозійних головок та розробка рекомендацій, що до методів підвищення жорсткості металорізальних верстатів є актуальним науково-прикладним завданням, успішне виконання якого дозволить більш широко впроваджувати процес РОД у виробництво.

Мета роботи: дослідження технологічних характеристик процесу та жорсткості обладнання для розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.

Задачі дослідження:

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД з використанням електроерозійних головок та визначення меж його раціонального застосування;

2. Дослідження жорсткості настільного свердлувального верстату за умов використання його для РОД з використанням ЕЕГ.

3. Розробка рекомендацій для підвищення жорсткості настільного свердлувального верстату за умов використання його для РОД з використанням ЕЕГ;

4. Визначення впливу фізико-технологічних характеристик процесу РОД, на його кількісні та якісні показники.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Запропоновано та розроблено конструктивні елементи для підвищення жорсткості конструкцію настільного свердлувального верстату за умов РОД з використанням ЕЕГ, що дозволить точність та якість виготовлення деталей.

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 рекомендації, що до конструктивних елементів необхідних для підвищення жорсткості конструкцію настільного свердлувального верстату за умов, що дозволить точність та якість виготовлення деталей способом РОД з використанням ЕЕГ.

Особистий внесок здобувача

Постановка мети і задач досліджень; розробка рекомендацій, що до підвищення жорсткості установки; експериментальні дослідження, що до визначення жорсткості, а також технологічних характеристик процесу РОД, та аналіз отриманих результатів.

Апробація результатів та публікації.

Брав участь у LVII науково-технічна конференція здобувачів вищої освіти за результатами якої опубліковано 1 тези у збірнику тез доповідей здобувачів вищої освіти LVII науково-технічної конференції «Наука виробництву, 2023» за підсумками проведення «Дня науки – 2023».

РОЗДІЛ 1. РОД ЯК ВИСОКОЕФЕКТИВНА АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ ТЕХНОЛОГІЯМ

Високоєфективні технології металообробки, такі як плазмове і лазерне різання, традиційні процеси електроерозійної обробки, процеси розмірної обробки дугою, отримують все більш широке застосування взамін штампуванню при виготовленні листових деталей, які складають приблизно 70% загального переліку деталей, які звичайно виготовляються штампуванням. Зварні і штаповані конструкції з листових деталей на 30...50% легші, ніж отримані із сортового прокату та литва. Залежно від характеристик оброблюваного матеріалу, вимог до отримуваної деталі та конкретних умов виробництва застосовують різні способи виготовлення таких деталей.

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

Штампування - основний спосіб отримання деталей з листового металу в умовах масового, крупносерійного та серійного виробництва. Серійність визначається габаритами деталей та програмою випуску.

Діапазон розмірів штапованих 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 вирубіванні і калібруванні 9-11-го квалітетів точності.

Суть штаповальних розділових операцій зводиться до відокремлення однієї частини заготовки від іншої за рахунок зсуву, який завершується руйнуванням металу у вогнищі деформації. При визначенні зусиль необхідних для відокремлення металу вирішальними є довжина лінії різку, товщина та механічні характеристики металу, величина затушення

ріжучих кромок, зазор між інструментом, швидкість процесу і т. і.

Чим більша товщина металу s , габаритні розміри деталі d та міцність матеріалу, тим більше зусилля потрібне для виконання роботи відокремлення, тим більш потужне обладнання застосовують.

При штампуванні має місце геометрична недосконалість поверхні відокремлення.

Шорсткість поверхні приймають для блискучого пояска відповідною $Ra_{2,5} \dots 0,63$ (6-7 класи), а для зони сколу $Rz_{80} \dots 20$ (3-5 класи) по ГОСТ 2789-73.

При відхиленні від оптимальних зазорів при вирубуванні-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).

Для виконання зазначених вимог в умовах масового та крупносерійного виробництва, як найбільш економічні способи, застосовують зачистку та чистове вирубування-пробивання. Їх ціллю є отримання якомога більшого блискучого пояска, по можливості на всю товщину заготовки, та зменшення зони сколу до мінімуму, що має місце при звичайному вирубуванні-пробиванні. За рахунок зменшення розтягуючих напруг в зоні різання металу досягають максимальних значень пластичності. Для цього застосовують наступні схеми: вирубування із обтисненням із заваленими кромками; пуансоном, більшим за матрицю; зі стиканням або поперечною осадкою; із обтисненням через дві матриці. В наслідок цього ускладнюється конструкція штампа, зростає його вартість, значно збільшується робоче зусилля.

При чистовому вирубуванні-пробиванні шорсткість поверхні зрізу $Rz_{0,4} - 1,6$ мкм, після зачистки – $Rz_{0,63} - 1,25$ мкм. Відхилення розмірів контурів плоских металевих деталей при розмірах від 50 до 120 мм при товщині від 0,2 до 5 мм коливається в межах (0,1 - 0,6) мм. При чистовому

вирубіванні-пробиванні досягається точність IT 7(8) для товщини до 12 мм із міжосьовим відхиленням (0,015 - 0,030) мм [4].

Обмеження застосування штампування визначається технологічністю деталей, основні показники при цьому – трудомісткість та технологічна собівартість. Зазначені критерії визначають критичні величини розмірів деталі, відхилення від яких веде до підвищення трудомісткості операцій штампування, а також підвищення вартості і складності штампів. Ці вимоги є визначальними, якщо не входять в протиріччя з вимогами до конструкції (значення параметрів вказані в долях від товщини).

Форма та розміри штампованих деталей, точність штампування, характер виробництва – визначають технологію штампування та форму робочого інструменту. Для масового та крупносерійного виробництва характерним є використання автоматизованих процесів, для кожної деталі - окремого технологічного процесу та інструменту – штампа, так як номенклатура деталей не є великою, а в перерахунку затрат на кількість деталей в партії чи серії отримаємо низьку собівартість виготовлення.

В умовах дрібносерійного та серійного виробництва, при наявності великої номенклатури продукції, такий характер підготовки до виробництва не виправдав би себе тому, що в обігу постійно потрібно мати велику кількість інструменту та технологічних процесів, що призводить до постійного зростання вартості виробничого циклу. За таких умов найбільш раціональним є застосування таких технологічних процесів.

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

В деяких випадках застосовують штампування гумою або

поліуретаном, штампування рідиною, штампування з підігріванням та інші.

Штампування по елементах виконують на координатно-пробивних пресах при штампуванні деталей типу плат, панелей з великою кількістю отворів різної форми та розмірів. Суть процесу полягає в послідовному штампуванні елементів за допомогою змінного інструменту що встановлений в револьверній головці пресу. Оброблювана деталь подається як автоматично з використанням ЧПК, так і вручну.

Одним з способів по елементного штампування є штампування-висічка. Характерним є переривчата взаємодія інструменту і заготовки, що поліпшує тріщино утворення та знижує зусилля штампування. Процес проходить на прорізних пресах і автоматах та обробляючих центрах. Кількість ходів прорізних пресів малих габаритів становить 500...1400 ход/хв, а у крупних пресів-автоматів - 200...400 ход/хв.

Недоліками штампування є:

1. Довгий кінематичний ланцюг перетворення енергії в роботу.
2. Великі зусилля на інструмент.
3. Спеціальні вимоги до інструменту, а саме твердості і стійкості.
4. Обмеження по товщині заготовки.
5. Складність конструкції.
6. Дороговизна обладнання.

1.2. Лазерне різання

Лазери застосовують в промисловості для виконання різноманітних технологічних операцій: різання, свердлування, зварювання, гравіювання і т.ін.

В останній час лазери застосовують для розкрою листового металу. Принцип лазерного різання полягає в тому, що гостро сфокусований лазерний промінь спрямовують на поверхню оброблюваного матеріалу. Під дією променя металу передається велика кількість світлової енергії, поглинаючи її метал розплавляється. Пари та рідкий метал видаляють з зони

обробки потоком інертного газу або кисню, повітря. Додавання кисню підвищує швидкість та якість різання за рахунок отримання додаткової теплової енергії від реакції взаємодії кисню з металом. Оброблюваність матеріалів лазером залежить від їх здатності поглинати світлову енергію та теплопровідності.

Така різноманітність виконуваних операцій забезпечується наступними перевагами лазера:

1. відсутність інструменту (його роль виконує лазерний промінь);
2. можливість регулювання переміщення і потужності енергії променя;

Головним недоліком лазерної технології є її висока вартість. Впровадження нових технологічних рішень поступово знижує їх вартість до одиниці продукції, проте, використання лазера для деяких областей залишається достатньо дорогим, порівняно з іншими альтернативними технологіями, навіть тоді, коли лазер здатен забезпечити кращу якість. Враховуючи вартість лазерів, їх вигідне застосування можливе лише тоді, коли неможливо або дуже складно реалізувати звичайні технології [13].

Серед недоліків технології лазерного розкрою листового металу також слід зазначити:

1. наявність зони термічного впливу, що ускладнює подальшу механічну обробку, та призводить до короблення довгих тонколистових деталей.
2. Висока вартість обладнання.
3. Обмеження по товщині різку.

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.

Таблиця 1.1

Енергетичні параметри джерел тепла термічних способів різання

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

Разом з високими енергетичними показниками плазмовий струмінь має найбільш високий динамічний тиск, що в сукупності обумовлює переваги ППР перед ГКР і тим більше ЕДР за швидкісними показниками різання, причому порівняно з ГКР вони виявляються на товщині не більше 50...60 мм, ЕДР же поступається обом способам на порядок.

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).

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 [6].

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 борін, леміхів та інш. [7].

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. Товстолистові 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 (грату). 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 процесу є:

1. порівняно велика, до 1 мм, зона термічного впливу при обробці вуглецевих сталей, що ускладнює подальшу механічну обробку;
2. складність отримання отворів діаметром до 50 мм;
3. товщина розрізаємого металу не перевищує 80-100 мм;
4. досить жорсткі вимоги до відхилення від перпендикулярності різь. Залежно від товщини деталі кут відхилення не повинен

перевищувати 10-50°. При виході за ці межі спостерігається значне розширення різу;

1.4. Електроерозійна обробка

Спосіб ЕЕО заснований на використанні для локального руйнування металу нестаціонарних електричних розрядів, став основою багатьох технологічних процесів виготовлення відповідальних деталей в індивідуальному, серійному і масовому виробництві.

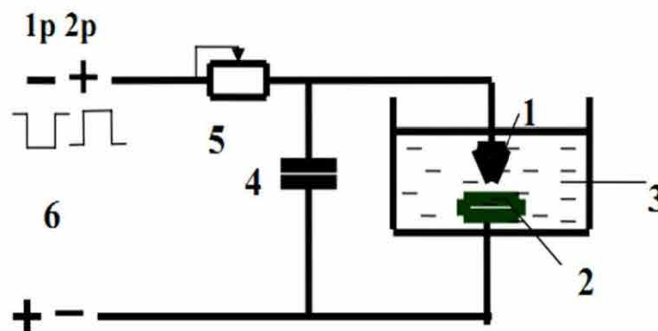


Рис. 1.1. Схема електроерозійної обробки матеріалів: 1 - електрод-інструмент, 2 - оброблювана деталь, 3 - середа, в якій проводиться розряд, 4 - конденсатор, 5 - реостат, 6 - джерело живлення, 1р - режим електроіскрової обробки, 2р - режим електроімпульсної обробки

Схема електроерозійної обробки матеріалів приведено на рис. 1.1. Схема живиться імпульсною напругою різної полярності, що відповідає електроіскрову режиму (1р) і електроімпульсної режиму (2р). Напруга живлення заряджає конденсатор (4), паралельно якому включений розрядний проміжок між електродом-інструментом (1) і оброблюваною деталлю (2), які поміщені в рідину з низькою діелектричною проникністю. Коли напруга на конденсаторі перевищить потенціал запалювання розряду, відбувається пробій рідини. Рідина нагрівається до температури кипіння і утворюється газовий міхур з парів рідини. Далі електричний розряд розвивається в газовому середовищі, що призводить до інтенсивного локального розігрівання деталі, приповерхневі шари матеріалу плавляться і продукти розплаву у вигляді кульок застигають в проточній рідині і виносяться із зони

обробки.

В залежності від параметрів електричних розрядів розрізняють такі види ЕЕО: електроіскрова, високочастотна, низькочастотна електроімпульсна, електроімпульсна (середні частоти), високочастотна електроімпульсна, обробка із застосуванням широкодіапазонних генераторів імпульсів.

Залежність величини ерозії сталевого електрода (анода) від енергії і тривалості одиночного імпульсу Таблиця 1.2.

Таблиця 1.2

Характеристика імпульса		Розмір лунки		
Енергія, Дж	Тривалість, мкс	Глибина, мм	Діаметр, мм	Об'єм, м ³
0,001	9	0,015	0,1	0,000078
0,1	40	0,025	0,75	0,0074
1,0	60	0,042	1,65	0,06
2,0	1500	0,050	2,0	0,1

ЕЕО для розділових операцій застосовують для отримання глухих та наскрізних пазів і щілин малої ширини; робочих деталей розділових штампів невеликих габаритів із твердих сплавів та загартованих сталей; робочих частин різців та інших інструментів; розрізання заготовок із вольфраму та інших важкооброблюваних матеріалів, наприклад, магнітних сплавів, при обробці яких потрібно досягати мінімальних втрат матеріалу.

Різновиди електроерозійної обробки

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

Електроіскрова обробка

Вона заснована на використанні іскрового розряду. При цьому в каналі розряду температура досягає 10000 °С, розвиваються значні гідродинамічні сили, але самі імпульси відносно короткі і, отже, містять мало

енергії, тому вплив кожного імпульсу на поверхню матеріалу невелика. Метод дозволяє отримати хорошу поверхню, але не володіє достатньою продуктивністю. Крім того, при цьому методі знос інструменту відносно великий (досягає 100% від обсягу знятого матеріалу). Метод використовується в основному при прецизійної обробці невеликих деталей, дрібних отворів, вирізці контурів. Твердосплавних штампів дротяним електродом.

При електроіскровий обробці використовують пряму полярність, тобто ЕІ під'єднують до катода, а ЕЗ - до анода. Генератор імпульсів налаштовують на відповідні режими обробки. Тривалість імпульсу становить 20...200 мкс. Величина енергії імпульсу регулюється підбором ємності конденсаторів.

При збільшенні ємності конденсатора накопичується запас енергії зростає і, отже, підвищується продуктивність процесу. У залежності від кількості енергії, що витрачається у імпульсі, режим обробки ділять на жорсткий або середній (для попередньої обробки) і м'який або особливо м'який (оздоблювальної обробки). М'який режим обробки дозволяє отримувати розміри з точністю до 0,002 мм при шорсткості поверхні Ra 0,63...0,16 мкм.

Обробку ведуть у ваннах заповнених діелектричної рідиною. Рідина виключає нагрівання електродів (інструменту і заготовки), охолоджує продукти руйнування, зменшує бічні розряди між інструментом і заготовлею, що підвищує точність обробки.

Для забезпечення безперервності процесу обробки необхідно, щоб зазор між інструментом - електродом і заготовлею був постійним. Для цього електроіскровим верстата постачають стежить системою і механізмом автоматичної подачі інструментів. Інструменти - електроди виготовляють з міді, латуні, міднографітові та інших матеріалів. [8]

У ерозійних верстатах використовують різні ГІ електричних розрядів: RC (резистор - ємність); RLC (L - індуктивність); LC; лампові генератори. У

промисловості застосовують шірокодіапазонніе транзисторні ПТ. Ці генератори споживають потужність 4 ... 18 кВт при силі струму 16 ... 125 А. Ефективність обробки складає 75...1900 мм³/хв при шорсткості обробленої поверхні 4...0,2 мкм. [9]

Електроіскровим методом обробляють практично всі струмопровідні матеріали, але ефект ерозії при одних і тих же параметрах електричних імпульсів різний. Залежність інтенсивності ерозії від властивостей матеріалів називають електроерозійної оброблюваністю. Якщо прийняти електроерозійні оброблюваність сталі за одиницю, то для інших металів її можна уявити наступних відносних одиницях: тверді сплави - 0,5; титан - 0,6; нікель - 0,8; мідь - 1,1; латунь - 1,6; алюміній - 4; магній - 6.

Електроіскровим методом доцільно обробляти тверді сплави, труднооброблювані матеріали і сплави, тантал, молібден і інші матеріали.

Електроіскровим методом отримують наскрізні отвори будь-якої форми поперечного перерізу, глухі отвори і порожнини, фасонні отвори і порожнини за способом трепонації, отвори з криволінійними осями; вирізують заготовки з листа, виконують плоске, кругле і внутрішнє шліфування, розрізають заготовки, таврують деталі.

Електроіскрову обробку застосовують для виготовлення деталей штампів і прес-форм, фільтри, ріжучого інструменту, деталей паливної апаратури двигуни внутрішнього згорання, сіток і сит.

Електроіскрову обробку застосовують також для зміцнення поверхневого шару металів деталей машин, прес-форм, ріжучого інструменту. Зміцнення полягає в тому, що на поверхню виробів наносять тонкий шар будь-якого металу, сплаву або композиційного матеріалу. Подібні покриття підвищують твердість, зносостійкість, жаростійкість, ерозійну стійкість та інші характеристики виробів.

На обмежених ділянках особливо навантаженої поверхні деталі можна проводити найскладніші мікрOMETALURГІЙНИХ процеси.

3 верстатів з системами ЧПУ найбільшого поширення в

промисловості мають координатнопрошивочніе, копіювальнo - вирізні і універсальні копіювальнo – прошивальних [10].

Координатно-прошивальні верстати працюють за позиційній системі ЧПУ, що дозволяє автоматично за заданою програмою встановлювати (позиціонувати) заготовку щодо інструмента в необхідне положення. Обробку ведуть профільованим інструментом. Під час обробки заготівля переміщень не має.

Копіювальнo-вирізні верстати працюють по контурній системі ЧПУ. Обробку ведуть непрофільовані інструментом - нескінченним електродом - дротом. Застосовують мідну, латунну, вольфрамові, молибденовую дрiт діаметром 0,02...0,3 мм. Програмне пристрій верстатів надано для не тільки регулювання рухів формоутворення, а й регулювання технологічного режиму - напруги на іскровому проміжку. Особливість процесу вирізки полягає в наявності змінної еквідістанти, що залежить від ширини прорізується паза. Отже, пристрій ЧПУ верстатів повинні забезпечувати корекцію еквідістанти. У верстатах такого типу системи ЧПУ забезпечують управління по чотирьох і більше координатним осям.

В універсальних копіювальнo-прошивальних електроерозійних верстатах використовують дві системи ЧПУ: систему адаптивного управління з попередніми набором координат і режимів за програмою і систему адаптивно - програмного управління за трьома координатним осям. У верстатах цього типу системи ЧПУ забезпечують планетарний рух заготовки в наступному режимі, автоматичне позиціонування заготівлі та автоматичну зміну інструмента. Електроіскрових обробка широко застосовується для прорізання пазів, вирізки по контуру, для виготовлення штампів, прес-форм, фільтери, ріжучих інструментів та інших. Добре обробляються тверді сплави, тантал, вольфрам, молибден і інші. До недоліків процесу відносять: порівняно низьку продуктивність обробки, великий знос електродів і утворення на деталях дефектного шару товщиною 0,05...0,5 мм.

Електроімпульсна обробка

Заснована на використанні імпульсів дугового розряду. Цей метод став впроваджуватися в промисловість на початку 1950х р. На відміну від іскрового, дугового розряд має температуру плазми нижче (4000-5000 °С), що дозволяє збільшувати тривалість імпульсів, зменшувати проміжки між ними і т. о. вводити в зону обробки значні потужності (декілька десятків кВт), тобто збільшувати продуктивність обробки. Характерне для дугового розряду переважно руйнування катода приводить до того, що знос інструменту (в цьому випадку він підключається до анода) нижче, ніж при електроіскровий обробці, складаючи 0,05-0,3% від обсягу знятого матеріалу (іноді інструмент взагалі не зношується). Економічніший Електроімпульсний метод використовується в основному для чорнової обробки і для трикоординатної обробки фасонних поверхонь. Обидва методи (електроіскровий і електроімпульсно) доповнюють один одного. [11]

При електроімпульсній обробки використовують електричні імпульси більшої тривалості. Великі потужності імпульсів, одержуваних від електронних генераторів, забезпечують високу продуктивність процесу обробки. Застосування генераторів і графітових електродів, а також обробка на зворотній полярності дозволили зменшити руйнування електродів.

Електроімпульсну обробку найбільш доцільно застосовувати при попередній обробці штампів, турбінних лопаток, тврдосплавних деталей, фасонних отворів в деталях з корозійно-стійких сталей і жароміцних сплавів. У верстатах для електроімпульсної обробки широко використовують різні системи програмного керування. Високоточна конструкція верстатів з чутливими сервосистеми дозволяє виготовляти деталі складної геометричної форми з високою точністю.

Прилади автоматичного перемикання на різні подачу та глибину різання, керовані системою ЧПУ, забезпечують оптимальне використання верстатів, тому що в залежності від ходу процесу обробки режим роботи узгоджується з технологічними вимогами до деталей. Застосовувані адаптивні системи програмного керування дозволяють своєчасно визначати

відхилення в ході обробки і усунути їх. Зміни параметрів процесу обробки вносяться до пристрою, що формує сигнал корекції що дозволяє за допомогою простих електродів виготовляти деталі складних геометричних форм, зокрема порожнин штампів. [9]

Якість поверхні залежить від режимів обробки. Грубий режим приводить до отримання висоти нерівностей Ra50...6,3 мкм і зміни поверхневого шару глибиною 0,2...0,4 мм. При чистовому режимі досягається шорсткість поверхні Ra6,3...1,25 мкм. Обробка ведеться в рідкому діелектрику, інструмент автоматично подається в напрямку обробки, що забезпечує сталість зазору. Для обробки використовуються спеціальні верстати різних моделей з машинними генераторами, високочастотними установками, електронними генераторами і т. д. Високоточні верстати з різними системами програмного управління дозволяють виготовляти деталі зі складними формами.

Метод вважається доцільним для попередньої обробки фасонних поверхонь штампів, лопаток, інструментів. Застосовується він і для обробки твердих, нержавіючих і жароміцних сплавів.

Високочастотна обробка

Електроіскрову обробку застосовують для підвищення точності і зменшення шорсткості поверхонь, оброблених електроерозійним методом. Метод заснований на використанні електричних імпульсів малої потужності при частоті 100...150 кГц.

При високочастотній електроіскровій обробці конденсатор розряджується при замиканні первинної ланцюга імпульсного трансформатора переривником, вакуумної лампою або тиратрона. Інструмент-електрод і заготівля включені у вторинну ланцюг трансформатора, що виключає виникнення дугового розряду.

Продуктивність методу в 30...50 разів вище, ніж при електроіскровому методі, при значному збільшенні точності і зменшення шорсткості поверхні. Знос інструмента незначний [12].

Високочастотний електроіскровий метод застосовують при обробки заготовок із твердих сплавів, тому що він виключає структурні зміни та освіта мікротріщин в поверхневому шарі матеріалу оброблюваної заготовки.

Електроконтактна обробка

Заснована на локальному нагріві заготовки в місці контакту з електродом-інструментом і видаленні розм'якшеного або навіть розплавленого металу із зони обробки механічним способом: відносним рухом заготовки та інструменту. Джерелом теплоти в зоні обробки служать імпульсні дугові розряди. Електроконтактні обробку оплавленням рекомендують для обробки великих деталей з вуглецевих і легованих сталей, чавуну, кольорових сплавів, тугоплавких і спеціальних сплавів.

Метод застосовують при зачистці виливків від заток, від різанні ливникових систем і прибутків, зачистці прокату з спецсплавів, чорновому круглому зовнішньому, внутрішньому і плоскому шліфуванні корпусних деталей машин з важкооброблюваних сплавів, шліфуванні з одночасною поверхневої загартуванням деталей з вуглецевих сталей. Метод обробки не забезпечує високої точності і якості поверхні, але дає високу продуктивність знімання металу внаслідок використання великих електричних потужностей.

Електроконтактна обробка заснована на введенні в зону механічної обробки електричної енергії - порушення потужної дуги змінного або постійного струму між, наприклад, диском, що служить для видалення матеріалу із зони обробки, і виробом. Переваги методу - висока продуктивність (до 10^6 мм³/хв) на грубих режимах, простота інструменту, робота при відносно невеликих напругах, низькі питомі тиску інструменту - 30-50 кН/м² (0,3-0,5 кгс/см²) і, як наслідок, можливість використання для обробки твердих матеріалів інструменту, виготовленого з відносно м'яких матеріалів. До недоліків відносять: велику шорсткість обробленої поверхні, теплові впливи на метал при жорстких режимах.

Електроконтактна обробка не забезпечує високої точності і якості поверхні (шорсткість поверхні близько 50 мкм), але призводить до високої

продуктивності внаслідок значного знімання металу. Застосовується вона для різання заготовок, обдирання виливків, заточування інструменту, плоского шліфування, прошивки отворів, очищення від окалини, обробки криволінійних поверхонь т. д. Рекомендується для обробки вуглецевих і легованих сталей, чавуну, кольорових сплавів, тугоплавких, важкооброблюваних і спеціальних сплавів.

Різновидом електроконтактної обробки є електроабразивна обробка - обробка абразивним інструментом (у т. ч. алмазно-абразивним), виготовленим на основі провідних матеріалів. Введення в зону обробки електричної енергії значно скорочує знос інструменту. [13]

Область застосування (ЕЕО)

Типові операції електроерозійної обробки. За технологічними ознаками встановлюються такі види ЕЕО:

1. Прошивання отворів: При ЕЕО прошивають отвори на глибину до 20 діаметрів з використанням стрижневого ЕІ і до 40 діаметрів - трубчастого ЕІ. Глибина прошиваємого отвору може бути значно збільшена, якщо обертати ЕІ, або оброблювану поверхню, або і те і інше з одночасною прокачуванням РЖ через ЕІ або з відсмоктуванням її із зони обробки. Швидкість електроерозійного прошивання (ЕЕПр) досягає 2-4 мм/хв.

2. Маркування: Маркування виконується нанесенням на виріб цифр, букв, фірмових знаків і ін. Електроерозійні маркування забезпечує високу якість, не викликає деформації металу і не створює зони концентрації внутрішньої напруги, що виникає при маркуванні ударними клеймами. Глибина нанесення знаків може коливатися в межах від 0,1 до 1 мм. Операція може виконуватися одним ЕІ і по багатоелектродною схемою. Виготовляються ЕІ з графіту, міді, латуні, алюмінію. Продуктивність становить близько 3-8 мм/с. Глибина знаків залежить від швидкості руху електрода. При швидкості руху електрода більше 6 мм/с чіткість знаків погіршується. У середньому на знак заввишки 5 мм витрачається близько 4 с.

3. Вирізання: В основному виробництві електроерозійні вирізання

(ЕЕВ) застосовують при виготовленні деталей електро-вакуумної та електронної техніки, ювелірних виробів і т. д. в інструментальному виробництві, при виготовленні матриць, пуансонів, пуансонодержателів та інших деталей, а також вирубних штампів, копіїв, шаблонів, цанг, лекал, фасонних різців та ін

4. Шліфування: Цей процес шліфування застосовують для чистової обробки важкооброблюваних матеріалів, магнітних та твердих сплавів.

Відхилення розмірів профілю після електроерозійного шліфування знаходиться в межах від 0,005 до 0,05 мм, шорсткість $Ra=2,5$ (0,25), продуктивність 260 мм²/хв.

Основним недоліком традиційних способів ЕЕО, заснованих на використанні нестационарних електричних розрядів є порівняно низька продуктивність при визначеній шорсткості обробленої поверхні, що обмежує область їх раціонального застосування порівняно з РОД.

Розмірна обробка електричною

В умовах виробництва 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.

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. 1.2). 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.

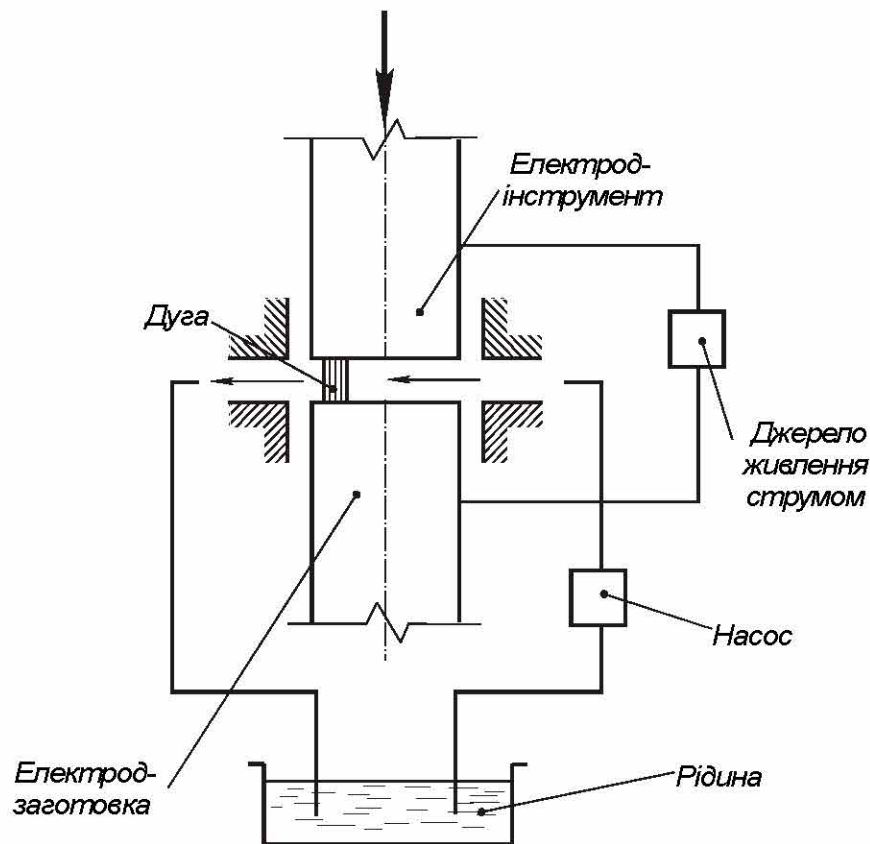


Рис. 1.2. Принципова схема РОД

Перспективним для виготовлення листових деталей із зазначеними параметрами є спосіб РОД, який дозволяє здійснити як розділові операції при обробці складних внутрішніх і зовнішніх контурів, так і одержати фасонні профілі типу фасонних зубчатих поверхонь, квадратних отворів з фасками і т. і. [14].

РОД – це принципово новий процес обробки металів, заснований на використанні стаціонарної електричної дуги [1]. 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.

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.

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 переважаючого 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 житись 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. Напруга робочого ходу джерел живлення визначається особливостями реалізації технологічних схем формоутворення і коливається в межах 20...50 В і більше. Напруга холостого ходу коливається в межах 50...100 В і більше.

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 [15].

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

Отже робота, що спрямована на визначення жорсткості обладнання за умов РОД з використанням електроерозійних головок та розробка рекомендацій, що до методів підвищення жорсткості металорізальних верстатів є актуальним науково-прикладним завданням, успішне виконання якого дозволить більш широко впроваджувати процес РОД у виробництво.

Мета роботи: дослідження технологічних характеристик процесу та жорсткості обладнання для розмірної обробки електричною дугою з використанням електроерозійних головок як високоефективної альтернативи традиційним способам металообробки.

Задачі дослідження:

1. Аналіз технологічних можливостей, переваг і недоліків способу РОД з використанням електроерозійних головок та визначення меж його раціонального застосування;

2. Дослідження жорсткості настільного свердлувального верстату за умов використання його для РОД з використанням ЕЕГ.

3. Розробка рекомендацій для підвищення жорсткості настільного свердлувального верстату за умов використання його для РОД з використанням ЕЕГ;

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 отримуючої деталі. Застосування РОД з використанням електроерозійних головок являє значний інтерес для отримання різноманітних порожнин та отворів в важкооброблюваних та загартованих сталей. Тому необхідні дослідження фізичного механізму електричної ерозії в умовах РОД, розробка технології та пристроїв, дослідження гідродинамічних процесів, що протікають в процесі обробки, приклади реалізації конкретних технологій, впровадження цих технологій у виробництво та визначення області раціонального практичного застосування процесу і його конкурентоспроможності порівняно з іншими способами обробки.

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

З огляду на те, що на дрібних підприємствах і ремонтних майстернях зазвичай відсутні матеріали для електрод-інструмент (ЕІ), які мають високу ерозійну стійкість. Тому для досліджень використовувались ЕІ зі сталі 45 та робочу рідину, яка являє собою суміш мастила і гасу. Найкраща якість обробки досягається при застосуванні зворотної полярності електродів.

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

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

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

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



Рис. 2.1. Настільний свердлувальний верстат 2М112

2.2. Обладнання, пристрої, апаратура

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

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



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

Дослідження жорсткості обладнання виконувались за допомогою гідравлічного навантажувача, що імітував вплив тиску робочої рідини на ЕЕГ та цифрового індикатора.

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 [16,17,18]. 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:

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

Тепер задача зводиться до побудови лінійної моделі виду

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

де $Y = \lg y$

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

$$b_1 = \beta_1$$

$$X_1 = \lg l$$

$$b_2 = \beta_2$$

$$X_2 = \lg P_s \text{ т.д.}$$

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 [16,17,18] і застосуванням програмного пакету STATISTICA 6.0 [18]. 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
lg l	0,983979	0,024166	1,419427	0,034860	40,71774	0,000000
lg P	-0,168174	0,024166	-0,491145	0,070576	-6,95915	0,000437

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

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

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

2.4. Охорона праці при роботі на верстатах РОД

Безпека при експлуатації електроерозійних верстатів РОД

Верстати РОД повинні експлуатуватися в строгій відповідності з вимогами техніки безпеки. При порушенні цих вимог створюється підвищена небезпека враження електричним струмом, одержання опіків унаслідок загоряння робочої рідини, отруєння газоподібними продуктами розкладання робочого середовища, а також травмування рухомими деталями і вузлами верстата. Крім того, у заходах щодо охорони праці повинні бути враховані збільшений шум, вплив робочого середовища й інші супутні явища при роботі, що становлять визначену небезпеку і погіршують умови праці [19,20].

До роботи на верстатах РОД допускаються особи, що пройшли медогляд, спеціальне навчання, інструктаж, атестовані за правилами проведення робіт на верстаті, по наданню першої допомоги при ураженні

електрострумом і пожежної безпеки. Робота на верстаті чи його ремонт дозволяється за умови, що в приміщенні, де установлений верстат, знаходяться не менш двох чоловік, що можуть надати один одному необхідну допомогу. На кожному робочому місці обов'язково повинен бути електроізоляційний коврик під ноги. Під час роботи не слід торкатися струмонесучих частин (електрода, електродотримача, бобіни з дротом на вирізних верстатах і т.д.). Налагодження, установку виробу інструмента варто робити, упевнившись у тому, що генератор технологічного струму виключений. По закінченню роботи, при проведенні налагоджувальних робіт, технічному обслуговуванні, а також при перервах у подачі електроенергії верстат повинен бути відключений від мережі живлення [19, 20].

Вимоги до технологічного обладнання

Вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів.

Безпека праці на виробництві містить такі складові:

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

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

2.5. Висновки

2.5.1. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень РОД з ЕЕГ.

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

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

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕСУ РОД

3.1. Визначення технологічних характеристик РОД металевим ЕІ

Склад робочої рідини суміш мастила індустріального і гасу, матеріал заготовки – сталь45, матеріал ЕІ – сталь 45, полярності електродів – зворотна, продуктивність обробки, згідно викладеного, є функцією сили струму, напруги, динамічного тиску потоку робочої рідини.

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

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

Таблиця 3.1 - Межі варіювання факторів

Фактори	X_{max}	X_{min}	X_0	ΔX
Сила току I, A	200	50	125	75
Статичний тиск P_s, MPa	1,0	0,5	0,75	0,25

Таблиця 3.2 - Матриця планування експерименту

Номер експерименту	$x_1 (I)$	$x_2 (P_s)$	$y_1 (M)$ мм ³ /хв	$y_2 (Ra)$ мкм	$y_3 (\delta)$ мм	$y_4 (\gamma)$ %
1	-	-	464	12	0,15	81,7
2	-	0	331	8	0,12	79,3
3	-	+	251	5,5	0,06	77,7
4	0	-	1806	18	0,19	83,4
5	0	0	1289	12,5	0,14	80,9
6	0	+	978	9	0,08	79,3
7	+	-	3200	22	0,24	84,2
8	+	0	2354	16	0,18	81,8
9	+	+	1966	11	0,1	80,1

Продуктивність обробки отворів металевим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(M) = 1404,333 + 1079x_1 - 379,167x_2. \quad (3.1)$$

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

$$M = 0,939 \cdot I^{1,544} \cdot P_s^{-0,824}. \quad (3.2)$$

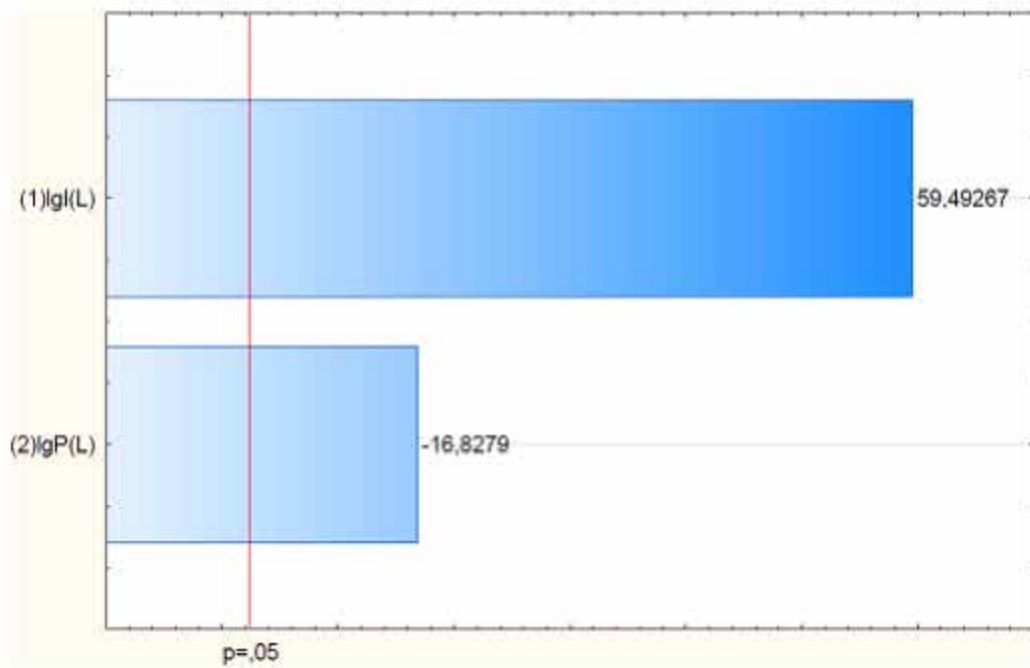


Рис. 3.1. Степень впливу факторів на продуктивність процесу M

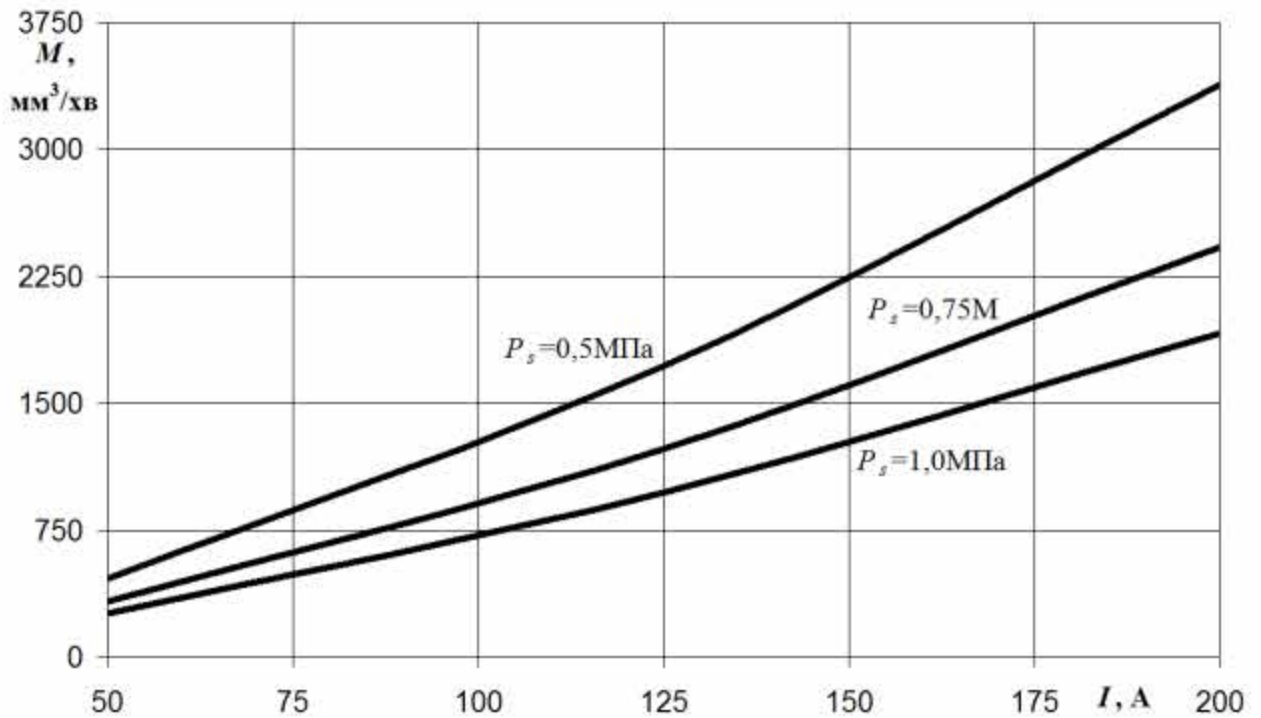


Рис. 3.2. Залежність продуктивності процесу M від I та P_s

На підставі ранжування факторів (рис. 3.1) встановлено, що продуктивність процесу визначається перш за все силою технологічного струму I , другим по степеню впливу є статичний тиск робочої рідини P_s .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.3 - ANOVA

ANOVA; Var.:lgM; R-sqr=,99843; Adj.:99791 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003287 DV: lgM: =Log10(M)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI L	1,163431	1	1,163431	3539,378	0,000000
(2)lgP L	0,093084	1	0,093084	283,179	0,000003
Error	0,001972	6	0,000329		
Total SS	1,258487	8			

Таблиця 3.4 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgM; R-sqr=,99843; Adj.:99791 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003287 DV: lgM: =Log10(M)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	2,973216	0,006108	486,7764	0,000000	2,958270	2,988161	2,973216	0,006108	2,958270	2,988161
(1)lgI(L)	0,865864	0,014554	59,4927	0,000000	0,830252	0,901477	0,432932	0,007277	0,415126	0,450738
(2)lgP(L)	-0,247920	0,014733	-16,8279	0,000003	-0,283970	-0,211870	-0,123960	0,007366	-0,141985	-0,105935

Шорсткість поверхні отворів оброблених металевим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(Ra) = 12,667 + 3,917x_1 - 4,417x_2. \quad (3.3)$$

Математична модель шорсткості поверхні отворів має наступний

вигляд, МКМ:

$$Ra = 0,882 \cdot I^{0,48} \cdot P_s^{-1,032}. \quad (3.4)$$

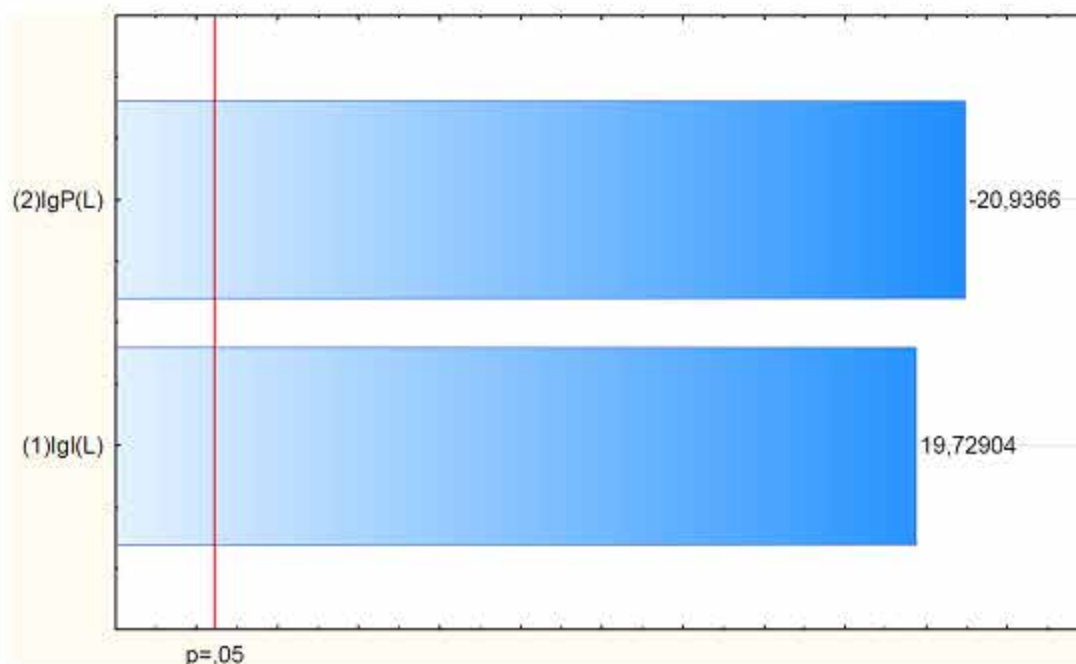


Рис. 3.3. Степень впливу факторів на шорсткість поверхні Ra

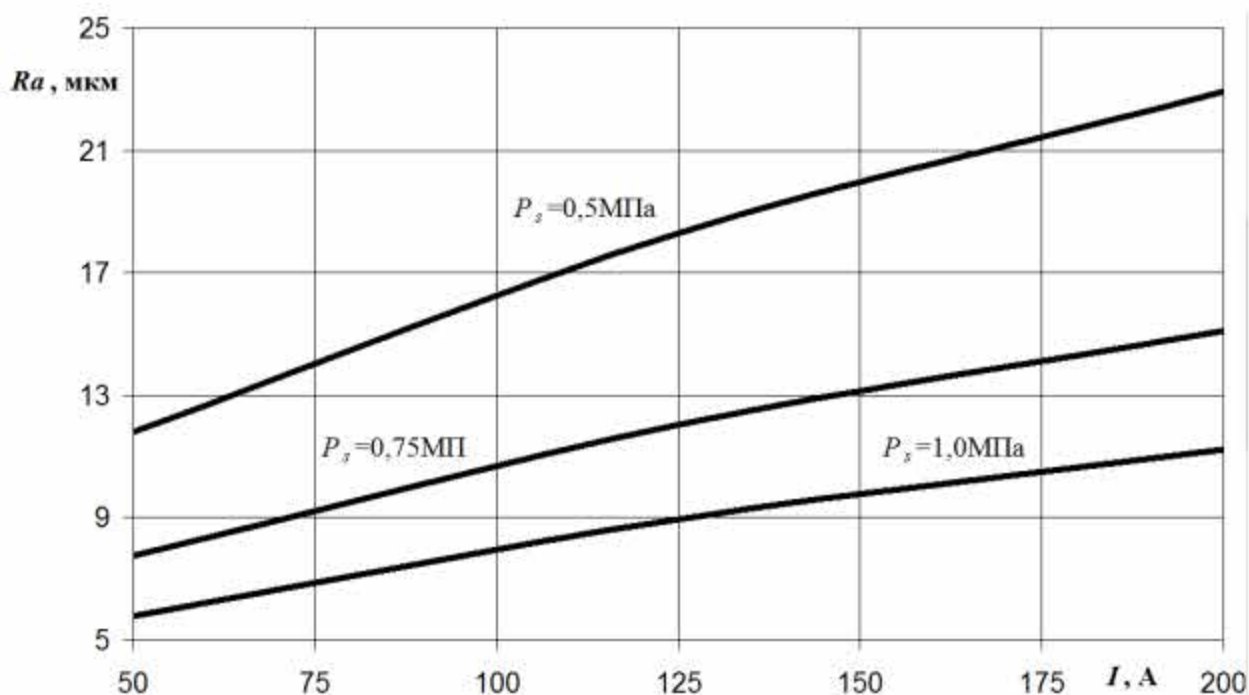


Рис. 3.4. Залежність шорсткості обробленої поверхні Ra від P_s та I

На підставі ранжування факторів (рис.3.3) встановлено, що шорсткість поверхні визначається перш за все статичним тиском робочої рідини P_s , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму I .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.5 - ANOVA

ANOVA; Var.:lgRa; R-sqr=,9928; Adj.:,9904 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003336 DV: lgRa: =Log10(Ra)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI L	0,129837	1	0,129837	389,2350	0,000001
(2)lgP L	0,146217	1	0,146217	438,3397	0,000001
Error	0,002001	6	0,000334		
Total SS	0,278056	8			

Таблиця 3.6 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgRa; R-sqr=,9928; Adj.:,9904 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0003336 DV: lgRa: =Log10(Ra)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	1,061835	0,006153	172,5732	0,000000	1,046779	1,076891	1,061835	0,006153	1,046779	1,076891
(1)lgI(L)	0,289254	0,014661	19,7290	0,000001	0,253379	0,325129	0,144627	0,007331	0,126689	0,162564
(2)lgP(L)	-0,310723	0,014841	-20,9366	0,000001	-0,347038	-0,274408	-0,155362	0,007421	-0,173519	-0,137204

Об'ємний знос EI при виготовленні отвору металевим EI

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\gamma) = 80,933 + 1,233x_1 - 2,033x_2 \quad (3.5)$$

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

$$\gamma = 71,27 \cdot I^{0,022} \cdot P_s^{-0,072} \quad (3.6)$$

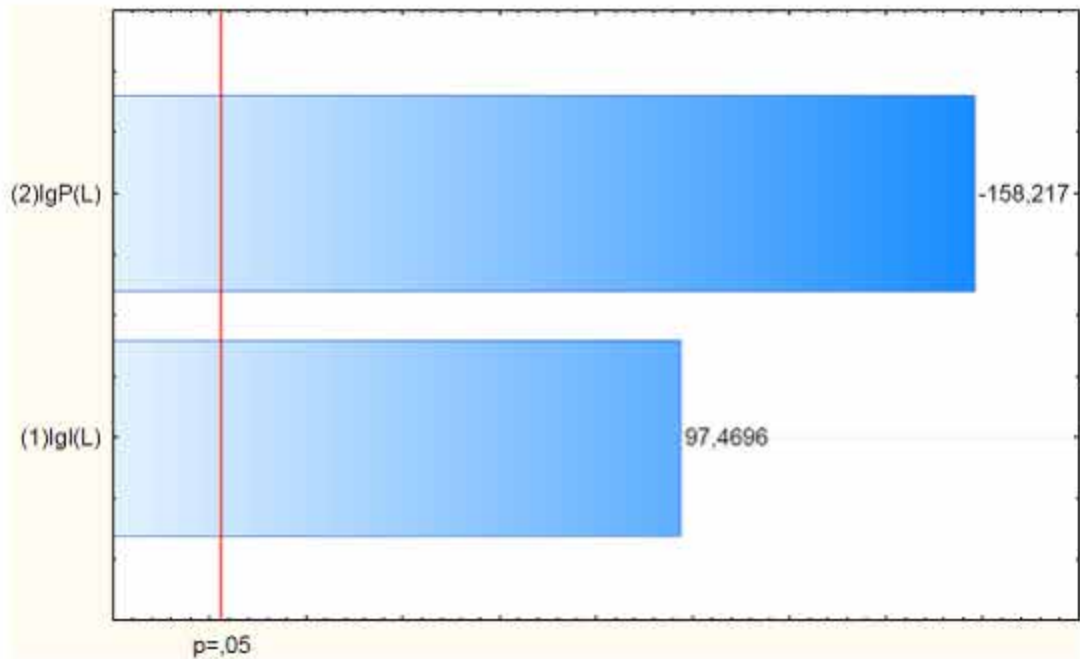


Рис. 3.5. Степінь впливу факторів на об'ємний знос ЕІ γ

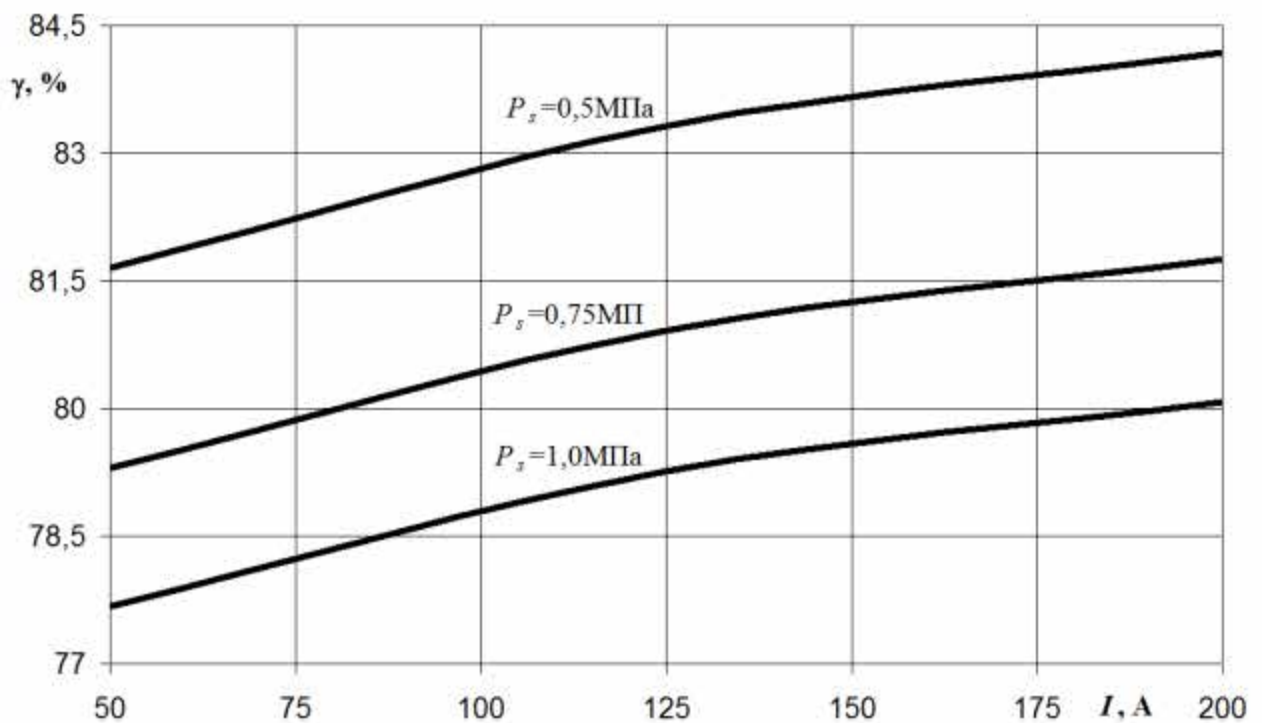


Рис. 3.6. Залежність об'ємного зносу ЕІ γ від P_s та I

На підставі ранжування факторів (рис.3.5) встановлено, що об'ємний знос ЕІ γ визначається перш за все статичним тиском робочої рідини P_s , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму I .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.7 - ANOVA

ANOVA; Var.:lgγ; R-sqr=,99983; Adj.:99977 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=0 DV: lgγ: =Log10(γ)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgL	0,000273	1	0,000273	9500,32	0,000000
(2)lgP L	0,000720	1	0,000720	25032,56	0,000000
Error	0,000000	6	0,000000		
Total SS	0,000994	8			

Таблиця 3.8 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lgγ; R-sqr=,99983; Adj.:99977 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=0 DV: lgγ: =Log10(γ)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	1,907906	0,000057	33385,11	0,000000	1,907766	1,908046	1,907906	0,000057	1,907766	1,908046
(1)lg(L)	0,013273	0,000136	97,47	0,000000	0,012940	0,013606	0,006636	0,000068	0,006470	0,006803
(2)lgP(L)	-0,021809	0,000138	-158,22	0,000000	-0,022147	-0,021472	-0,010905	0,000069	-0,011073	-0,010736

МЕЗ при виготовленні отворів металевим ЕІ

Рівняння регресії в кодовому вигляді має вигляд:

$$y(\delta) = 0,14 + 0,032x_1 - 0,057x_2. \quad (3.7)$$

Математична модель МЕЗ при виготовленні отворів має наступний

вигляд, мм

$$\delta = 0,019 \cdot I^{0,022} \cdot P_s^{-0,072}. \quad (3.8)$$

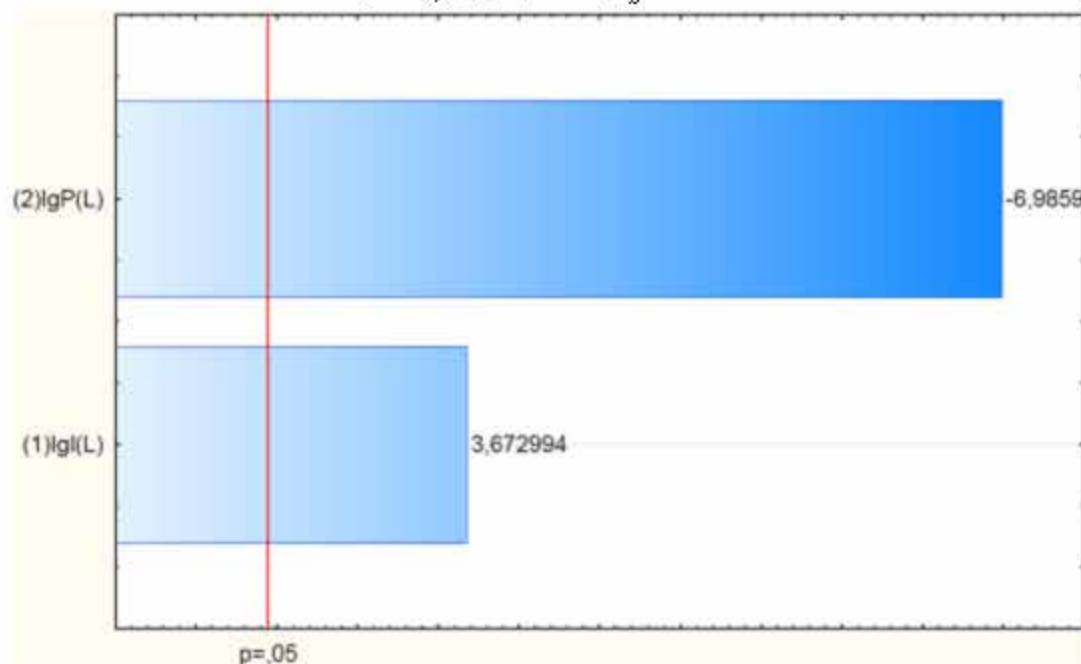


Рис. 3.7. Степінь впливу факторів на МЕЗ δ

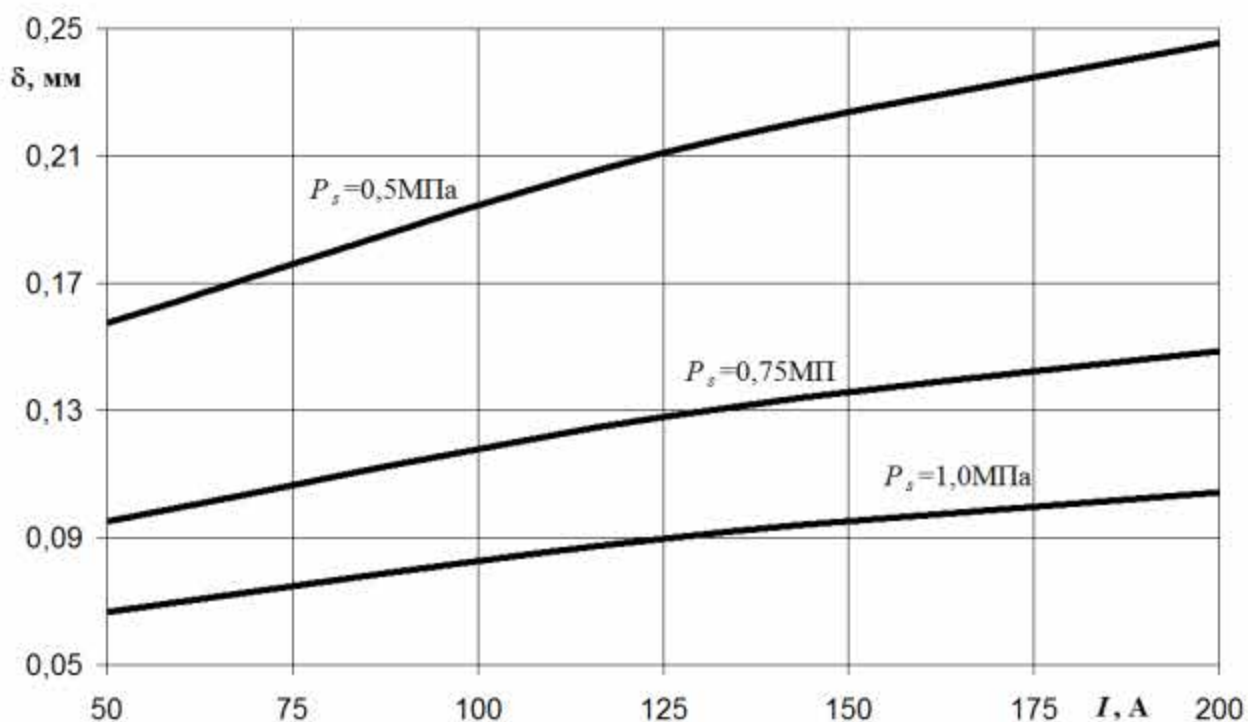


Рис. 3.8. Залежність МЕЗ δ від I та P_s

На підставі ранжування факторів (рис.3.7) встановлено, що МЕЗ δ визначається перш за все статичним тиском робочої рідини P_s , другим по степеню впливу фактором є сила технологічного струму I .

Виконуємо аналіз дисперсії

Таблиця 3.9 – ANOVA

ANOVA; Var.:lg δ ; R-sqr=,91215; Adj:,88286 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0043085 DV: lg δ : =Log10(δ)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)lgI L	0,058126	1	0,058126	13,49088	0,010417
(2)lgP L	0,210272	1	0,210272	48,80374	0,000428
Error	0,025851	6	0,004309		
Total SS	0,294249	8			

Таблиця 3.10 - Effect Estimates

Effect Estimates; Var.:lg δ ; R-sqr=,91215; Adj:,88286 (stal.sta) 2 3-level factors, 1 Blocks, 9 Runs; MS Residual=,0043085 DV: lg δ : =Log10(δ)										
Factor	Effect	Std.Err.	t(6)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt	Coeff.	Std.Err. Coeff.	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	-0,889067	0,022113	-40,2050	0,000000	-0,943176	-0,834958	-0,889067	0,022113	-0,943176	-0,834958
(1)lgI(L)	0,193537	0,052692	3,6730	0,010417	0,064605	0,322469	0,096769	0,026346	0,032302	0,161235
(2)lgP(L)	-0,372619	0,053338	-6,9860	0,000428	-0,503133	-0,242105	-0,186310	0,026669	-0,251567	-0,121053

3.2. Висновки

3.2.1. Теоретично і експериментально досліджено, обґрунтовано і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу: продуктивності процесу обробки отворів, шорсткості обробленої поверхні отворів, точності розмірів отворів, стійкості ЕІ. Досліджено і описано технологічні характеристики процесу. Залежно від режиму обробки сталевим ЕІ продуктивність при виготовленні отворів складає 260...3400 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 5,7...23 мкм; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах 77...84 %, міжелектродний зазор в межах 0,07...0,25 мм.

РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОСТІ УСТАНОВКИ ДЛЯ РОД З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЕГ

4.1. Дослідження жорсткості установки

Під час процесу РОД в середині ЕЕГ створюється тиск робочої рідини, що тисне на шпindel (шток) настільного свердлувального верстата. В наслідок низької жорсткості С-подібної станини такого верстату (див. рис. 2.1) під впливом тиску робочої рідини відбувається пружна деформація станини, що призводить до розкриття станини та зниження точності обробки та погіршення якості обробленої поверхні.

Схему навантаження станини можна представити у вигляді, що показано на рис. 4.1.

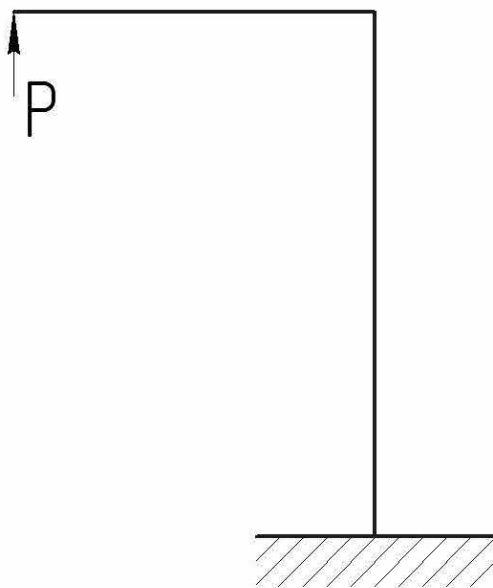


Рис. 4.1. Схема навантаження в станині настільного свердлувального верстату під час РОД з використанням ЕЕГ

Для дослідження величини пружної деформації станини, що виникає при РОД, в заміні ЕЕГ встановлюємо гідравлічний навантажувач (рис 4.2), що являє собою гідроциліндр тиск в якому створюється за рахунок ручного насоса, що встановлено на гідробаку. Діаметр циліндра навантажувача 180мм. Для контролю величини навантаження на насосі встановлено манометр з ціною поділки від 0 до 160 кгс/см².

Для перерахунку тиску, який створює навантажувач, в зусилля, що створює навантажувач, необхідно тиск помножити на площу поперечного переріз гідроциліндру ($F=P \cdot S$ (МПа·мм²=Н)).



Рис. 4.2. Ручний гідравлічний навантажувач

Згідно технічних характеристик ББГ [2] максимальний діаметр електрод-інструмента, що може бути встановлений в неї, 50 мм. Знаючи максимальний тиск робочої рідини можемо визначити які зусилля сприйматиме станина верстату під час обробки процесом РОД.

Табл. 4.1.

Зусилля на шпиндель настільного свердлувального верстата F , в залежності від тиску робочої рідини P_s при максимальному діаметрі електрод-інструмента

P_s , МПа	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6
F , Н	785	1178	1570	1963	2356	2749	3141

Для визначення пружної деформації станини верстата гідравлічний навантажувач встановлюємо на стіл свердлувального верстата, і через проставку для жорсткого з'єднання навантажувача зі станиною верстата (рис 4.3). Далі за допомогою ручного насоса створюємо тиск, що еквівалентний зусиллю на штоку настільного свердлувального верстата F під

час РОД при різних значеннях тиску робочої рідини P_s . За допомогою цифрового індикатора визначаємо величину пружної деформації. Отримані значення вносимо до таблиці 4.2.



Рис. 4.3. Принцип навантаження станини верстата для визначення пружних деформацій під час процесу РОД.

Величина пружних деформацій станини настільного свердлувального верстата в осьовому l радіальному напрямку r

F , Н	785	1178	1570	1963	2356	2749	3141
l , мм	0,309	0,463	0,617	0,771	0,926	1,08	1,235
r , мм	0,03	0,078	0,14	0,216	0,307	0,403	0,513

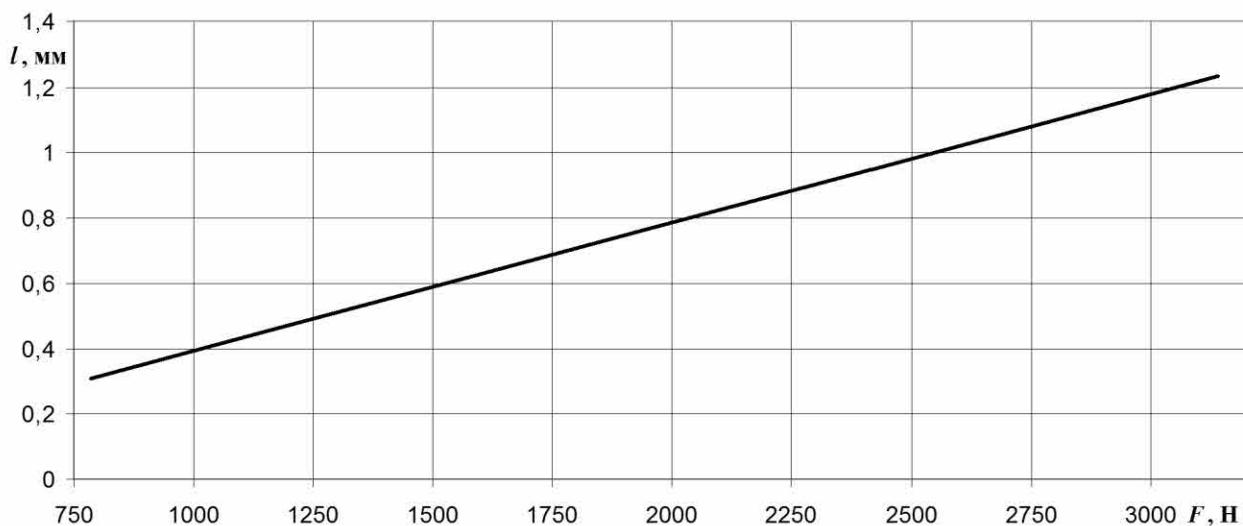


Рис. 4.4. Залежність величини пружної деформації станини верстата в осьовому напрямку l від зусилля на шпинделі F

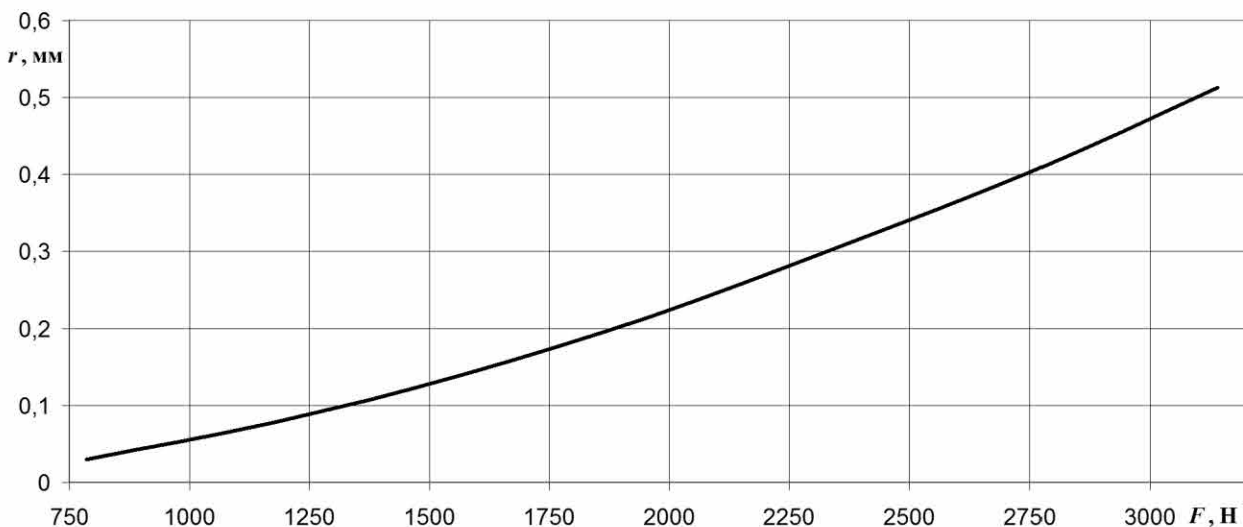


Рис. 4.5. Залежність величини пружної деформації станини верстата в радіальному напрямку r від зусилля на шпинделі F

В результаті проведених досліджень було виявлено, що пружні деформації, які виникають в станині верстата, перевищують величину

міжелектродного зазору, що негативно впливає на точність обробки та якість обробленої поверхні.

В зв'язку з тим, що в процесі обробки тиск в середині електроерозійної головки не є сталим і змінюється в залежності від величини міжелектродного зазору, а, отже, пружні деформації в станині верстата теж змінюються в процесі обробки. Ці недоліки впливають на стійкість процесу обробки так, як ускладнюють можливості утримання оптимального міжелектродного зазору в зоні обробки в наслідок пружних деформацій станини верстата в осьовому і радіальному напрямку, що дорівнюють чи перевищують міжелектродний зазор. Пружні деформації станини верстата призводять до виникнення коротких замикань та різких змін динамічного тиску потоку робочої рідини в зоні обробки. Це проявляється на поверхні обробленої деталі у вигляді відбитків електрода в зоні короткого замикання (рис. 4. 6) та нерівномірної шорсткості поверхні.



Рис. 4.6. Дефект від короткого замикання викликаний пружними деформаціями станини верстата під час процесу РОД.

Для зменшення пружних деформації станини необхідно жорстко зафіксувати шпиндель верстата за допомогою двох стяжок, як показано на рис. 4.7.



Рис. 4.7. Навантаження станини верстата з встановленими стяжками для визначення пружних деформацій під час процесу РОД.

Після встановлення стяжок (різьбова шпилька М8) з сумарним поперечним перерізом $70,6\text{мм}^2$ на установку з попереднім натягом проведено серію навантажень установки для РОД з використанням ЕЕГ за допомогою ручного гідравлічного навантажувача зусиллям аналогічним попереднім дослідженням. Результати досліджень зведено до таблиці 4.3.

Величина пружних деформацій станини настільного свердлувального верстата з встановленими стяжками в осьовому l радіальному напрямку r

F , Н	785	1178	1570	1963	2356	2749	3141
l , мм	0,001	0,016	0,042	0,077	0,112	0,146	0,181
r , мм	0,001	0,008	0,019	0,036	0,054	0,074	0,092

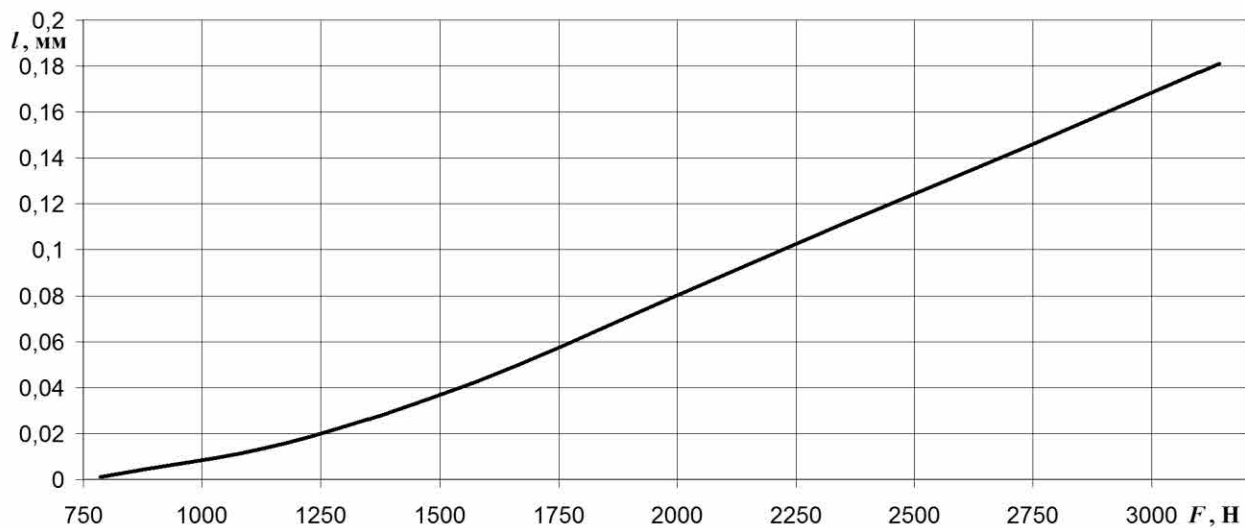


Рис. 4.8. Залежність величини пружної деформації станини верстата з встановленими стяжками в осьовому напрямку l від зусилля на шпинделі F

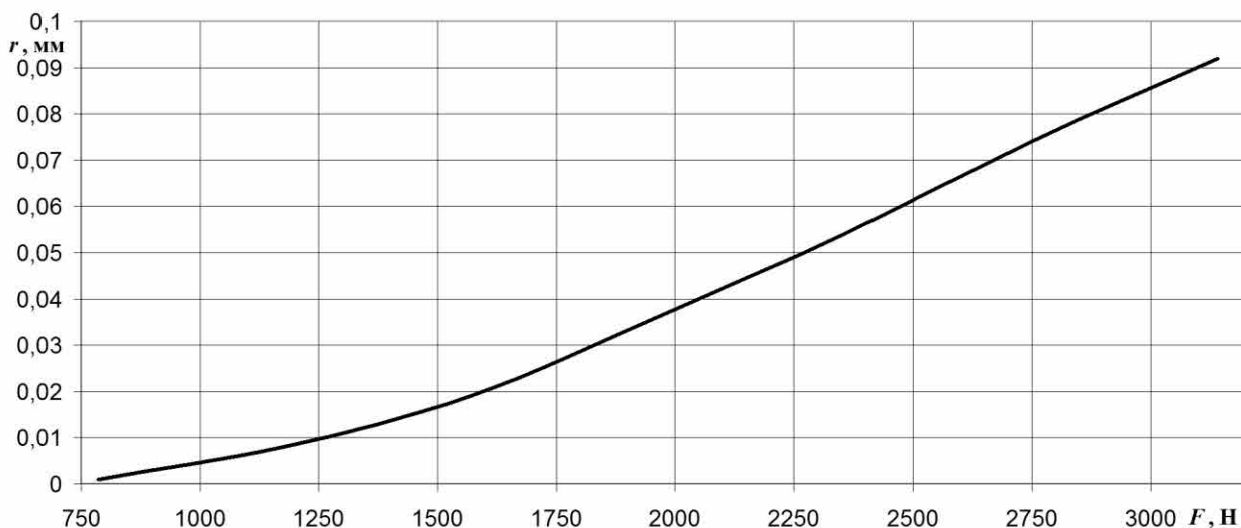


Рис. 4.9. Залежність величини пружної деформації станини верстата в радіальному напрямку r від зусилля на шпинделі F

Проведені дослідження показують, що встановлення двох стяжок у вигляді різьбових шпильок М8 дозволило підвищити жорсткість станини настільного свердлувального верстата в 6... 8 разів.

4.2. Висновки

4.2.1. В процесі обробки в зв'язку зі зміною динамічного тиску в електроерозійній головці пружні деформації станини настільного свердлувального верстата можуть змінюватись на величину рівну або більшу величини міжелектродного зазору, що призводить до дестабілізації процесу обробки та появи дефектів на поверхні обробленої деталі від коротких замикань та нерівномірності шорсткості обробленої поверхні.

4.2.2. Встановлення двох стяжок у вигляді різьбових шпильок М8 дозволило підвищити жорсткість станини настільного свердлувального верстата в 6...8 разів, в наслідок чого величина пружних деформацій станини в процесі обробки коливається в межах величини допуску на міжелектродний зазор.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОД

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

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

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

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

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

Вихідні дані для подальшого розрахунку наведені і табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Вихідні дані

№ п/п	Найменування показників	Умовні позначення	Одиниці виміру	Варіанти	
				базовий	проектний
1	Річна програма випуску	n	шт/рік	17450	17450
2	Середня трудомісткість обробки	t	хв/шт		
	- стержень			13,8	3,7
	- отвір			40	2,9
	Середня трудомісткість обробки	t	год/шт		
	- стержень			0,230	0,062
	- отвір			0,667	0,048
3	Вартість обробки одного шліцьового з'єднання	T	грн/шт	60	40
4	Дійсний фонд часу обладнання при однозмінній роботі	F	год	2008	2008
5	Вартість обладнання	K	грн	185550+800000	980 000
6	Виробнича площа, що займає одиниця обладнання	S	м ²	1,527+2,413	16
7	Коефіцієнт, що враховує додаткову виробничу площу на одну одиницю обладнання	k_{δ}	-	1,1	1,1
8	Вартість 1 м ² виробничої площі	C_p	грн/м ²	4500	4500
9	Сумарна потужність двигунів та джерел живлення	N	кВт	4+3,7=7,7	25+5=30
10	Коефіцієнт використання потужності обладнання	k_n	-	0,9	0,7
11	Вартість однієї кВт/год електроенергії	C_e	грн	1,81	1,81
12	Річна норма амортизаційних відрахувань	a_a	%	11,48	11,48
13	Річна норма відрахувань на утримання та поточний ремонт обладнання	a_y	%	3,64	3,64
14	Річна норма відрахувань на ремонт, амортизацію та утримання виробничої площі	a_n	%	2,4	2,4
15	Коефіцієнт, що ураховує додаткову заробітну плату	$K_{\delta z}$	-	1,089	1,089
16	Коефіцієнт завантаження обладнання	k_{zo}	-	0,75	0,75
17	Сума витрат на НДР	$E_{ндп}$	грн	-	120 000

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

Розрахунок суми капітальних вкладень у виробництво

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

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

Розрахунок собівартості одиниці продукції

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

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

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

При цьому коефіцієнт ефективності НДР:

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

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано напрямки і методи досліджень РОД з ЕЕГ.
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 свердлувального верстату 2М112 з встановленою на ньому ЕЕГ.
4. Теоретично і експериментально досліджено, обґрунтовано і описано математичні моделі технологічних характеристик процесу: продуктивності процесу обробки отворів, шорсткості обробленої поверхні отворів, точності розмірів отворів, стійкості ЕІ. Досліджено і описано технологічні характеристики процесу. Залежно від режиму обробки сталевим ЕІ продуктивність при виготовленні отворів складає 260...3400 мм³/хв; шорсткість обробленої поверхні коливається в межах 5,7...23 мкм; об'ємний знос ЕІ знаходиться в межах 77...84 %, міжелектродний зазор в межах 0,07...0,25 мм.
5. В процесі обробки в зв'язку зі зміною динамічного тиску в електроерозійній головці пружні деформації станини настільного свердлувального верстата можуть змінюватись на величину рівну або більшу величини міжелектродного зазору, що призводить до дестабілізації процесу обробки та появи дефектів на поверхні обробленої деталі від коротких замикань та нерівномірності шорсткості обробленої поверхні.
6. Встановлення двох стяжок у вигляді різьбових шпильок М8 дозволило підвищити жорсткість станини настільного свердлувального верстата в 6...8 разів, в наслідок чого величина пружних деформацій станини в процесі обробки коливається в межах величини допуску на міжелектродний зазор.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Носуленко В. І. Розмірна обробка металів електричною дугою: Авториф. дис. д-ра техн. наук: 05.03.07 / НТТУ „КПІ”. – Київ, 1999. – 36 с.
2. . Носуленко В.І., Шмельов В.М. Розмірна обробка металів електричною дугою // Навчальний посібник ПП „Ексклюзив-Систем”, Кропивницький, 2017.
3. Ресурси Інтернету: <https://danube.pto.org.ua/index.php/component/k2/item/112-tema-2-2-zvaryvalna-duga>.
4. Зубцов М. Е. Листовая штамповка: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности “Машины и технология обработки металлов давлением”. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 432 с.
5. Общемашиностроительные нормативы времени на газовую сварку, газовую, газоэлектрическую и кислородно-флюсовую резку черных, коррозионно-стойких и цветных металлов – М. Экономика, 1989. – 171 с.
6. Плазменно-дуговая аппаратура. Эсибян Э. М. “Техніка”, 1971, 164 с.
7. Хильчевский В. В. Новая технология производства и ремонта режущих органов сельскохозяйственных машин // Материалы конф. “Высокоэффективные технологии в машиностроении”. – Харьков: АТМ України. – 1998. – С. 91.
8. А. с. 1484500 СССР, М. Кл. В 23 Н 1/04. Электрод-инструмент для изготовления деталей типа стержней / В. М. Боков, В. И. Носуленко, В.М. Жердый (СССР). – № 4191166/25-08; Заявлено 06.02.87; Опубл. 07.06.89, Бюл. №21.
9. А. с. 722254 СССР, М. Кл. С 21 Д 1/74. Способ поверхностного упрочнения металлов и сплавов / В. И. Носуленко, Ю. Ф. Качанов, Б. Б. Крышкин (СССР). – № 2477893/22-02; Заявлено 22.04.77; Не подлежит опубл. в откр. печати.
10. Артамонов Б. А. Электроэрозионные, электрохимические и комбинированные с ними методы обработки. Часть I. Технические решения. – М.: ВНИИПИ, 1988. – 62 с.

11. Адаптивное управление станками / Под ред. Б. С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973.
12. Башта Т. Н. Машиностроительная гидравлика. – М.: Машиностроение, 1971.
13. Альберт М. Высокопроизводительная электроэрозионная обработка // В мире производства: передовая зарубежная технология. – 1991. – № 1 – С. 48... 52.
14. Носуленко В. И. Размерная обработка металлов стационарной электрической дугой: Автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.04. / ТПИ. – Тула, 1977. – 26 с.
15. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
16. Боровиков В. П., Боровиков И. П. STATISTICA – статистический анализ и обработка данных в среде Windows – М.: Информационно-издательский дом „Филинь”, 1998. – 608 с.
17. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение: София: Техника, 1980. – 304 с.
18. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер. М. – 1987. – 610 с.
19. Охрана труда в машиностроении : Т.1.,2 : Сб. норм.-техн. документов / Сост. А.И.Шуминов. - М: Машиностроение, 1990. - 383 с. , 349с
20. Охрана труда и техника безопасности на предприятии: Информационный обзор. - Дн-ск: Укрметаллургинформ, 2005. - 175 с.

ДОДАТКИ



Довідка №203 від 18.12.2023р.

Видана студенту групи ПМ22-М2-2 Голованову Івану про те, що він 20 квітня 2023 р. брав участь у засіданні секції LVII науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти приуроченій «Дню науки – 2023» на секції машинобудування, мехатроніки і роботехніки з доповіддю на тему: «Вплив режимів обробки РОД на якість обробленої поверхні» (наук. кер.: доц. В.Шмельов).

Керівник МОВ

Олексій СМІРНОВ