

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

Стрельчук Роман Михайлович



УДК 621.9

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОГО АЛМАЗНОГО
ШЛІФУВАННЯ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ
ЗІ ЗМІННОЮ ПОЛЯРНІСТЮ ЕЛЕКТРОДІВ**

05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Реферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2025

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Шелковий Олександр Миколайович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
професор кафедри інтегрованих технологій
машинобудування ім. М.Ф. Семка

Опоненти: доктор технічних наук, професор
Кальченко Володимир Віталійович,
Національний університет
«Чернігівська політехніка», м. Чернігів,
проректор з науково–педагогічної роботи

доктор технічних наук, професор
Новіков Федір Васильович,
Харківський національний економічний
університет імені Семена Кузнеця, м. Харків,
професор кафедри здорового способу життя,
технологій і безпеки життєдіяльності

доктор технічних наук, професор
Лавріненко Валерій Іванович,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля,
НАН України, м. Київ,
завідувач відділу алмазно–абразивної
і фізико–технічної обробки

Захист відбудеться «11» вересня 2025 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.050.12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Ректорський корпус (аудиторія 38).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2 та за посиланням:

<https://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/vr/archives/6422>

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Олена НАБОКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження.

Випуск конкурентоспроможної машинобудівної продукції нерозривно пов'язаний з різким підйомом технічного рівня машин, що випускаються, збільшенням надійності та довговічності в експлуатації, підвищенням їхньої точності. Вирішення цих завдань можливе завдяки застосуванню матеріалів підвищеної міцності та зносостійкості, створенню комбінованих (гібридних) процесів і технологій обробки.

Шліфування є основним процесом обробки деталей машин і забезпечує високу продуктивність, геометричну точність та якість обробленої поверхні.

Незважаючи на те, що шліфування є широко поширеним процесом обробки, вивченням якого було зайнято велике число вчених, наукових і науково-виробничих колективів, розширення на цей час номенклатури виробів, які виготовляють із таких матеріалів, як тверді сплави, високолеговані, швидкорізальні сталі та титанові сплави, ставлять перед дослідниками завдання постійного вдосконалення процесу шліфування та створення, із використанням сучасних надтвердих матеріалів, нових комбінованих процесів шліфування.

Проблему високопродуктивного і високоякісного обробки цих матеріалів, що належать до групи важкооброблюваних звичайними процесами, погана обробка яких пов'язана з наявністю в їхній структурі дуже твердих карбідів, можна успішно розв'язати за допомогою шліфування алмазними кругами з підтримкою різальних властивостей робочої поверхні круга за допомогою керованих впливів. У цьому разі ефективно різання зернами забезпечується унікальними властивостями алмазу, твердість якого в 2,8–5 разів перевершує твердість абразивних матеріалів, які найчастіше використовують під час шліфування, на основі карбиду кремнію та електрокорунду білого, а управляючі впливи на зв'язку дають змогу формувати та підтримувати в процесі обробки необхідні параметри робочої поверхні круга, що забезпечує стабілізацію вихідних технологічних показників шліфування та, як наслідок, – підтримку ріжучих властивостей круга, підвищення продуктивності та якості обробки.

Як показав аналіз сучасних досліджень, присвячених управлінню ріжучими властивостями круга в процесі шліфування, найповнішою мірою їх розв'язано в роботах А.І. Грабченка, В.Д. Дорофєєва, П.І. Ящерицина, Koshy P., Yadava V., Ю.А. Пахаліна, П.Г. Матюхи, Е.Я. Гродзинського стосовно алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів. В основу управління ріжучими властивостями робочої поверхні круга електроалмазним шліфуванням покладено принцип рівності інтенсивності примусового видалення зв'язки та розмірного зносу зерен, які працюють у режимі руйнування, внаслідок чого в процесі шліфування підтримується відповідна висота виступання зерен над зв'язкою. У дослідженнях шліфування зі стабілізацією ріжучих властивостей робочої поверхні круга електроерозійним процесом, основний внесок у які внесли М.К. Беззубенко, М.Д. Узунян, Kozak J., Choudhury S.K., Jain V.K., Gupta M., розроблено низку нових способів керівних впливів на робочу поверхню круга, вивчено їхні фізичні особливості

та вплив керівних впливів на технологічні показники широкої гами оброблюваних матеріалів, розроблено конструкції верстатів і джерел технологічного струму.

Відомі та перераховані процеси шліфування не дають змоги отримувати необхідні якісні і кількісні показники за значного зниження питомої витрати інструменту і витрат різних видів енергії. Це пояснюється тим, що в основу наявних способів покладено однозначні електрофізичні процеси, що безперервно протікають, між електродами: абразивним інструментом і заготовкою. Їхнє основне призначення – сприяти поверхневому оплавленню зв'язки абразивного електрода–інструменту з метою виявлення різальних елементів, наприклад, алмазних зерен – для зняття обробленого припуску з електрода–заготовки. Електроди, абразивний інструмент і заготовка, при цьому, мають стабільну полярність протягом усього процесу обробки. При цьому, здебільшого, в дослідженнях використовуються емпіричні, дослідно–статистичні методи, які через властиві їм особливості обмежують сферу застосування отриманих результатів.

Тому дана робота присвячена розв'язанню важливої та актуальної науково–прикладної проблеми з розробки процесу електроерозійного алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів, яка об'єднає створення нового комбінованого (гібридного) процесу з використанням сучасних надтвердих матеріалів, ефективного керування поверхнями шліфувального круга та деталі за рахунок періодичної зміни полярності підключення електродів у зоні різання. Цей підхід має забезпечити досягнення високих якісних і кількісних показників обробки за одночасного зниження питомої витрати інструменту та енерговитрат, що дасть змогу підвищити конкурентоспроможність машинобудівної продукції завдяки поліпшенню технічного рівня, надійності, довговічності та точності деталей, що виготовляються.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертаційна робота виконана відповідно до визначених пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки на період до 2028 року Закону України «Про систему пріоритетних напрямів наукової, науково–технічної та інноваційної діяльності в Україні» (ст.4 п.4 освоєння нових технологій виробництва матеріалів, їх обробки і з'єднання, створення індустрії наноматеріалів та нанотехнологій). Дисертаційна робота виконана на кафедрі "Інтегровані технології машинобудування" НТУ "ХПІ" у рамках завдання держбюджетної НДР МОН України М2247 «Розробка та дослідження екологічних безводних процесів алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів» (ДР № 0121U109541, 2021–2022 рр), М2249 «Розробка технологічних основ високошвидкісного алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів для виробів авіаційної техніки з використанням твердого змащування» (ДР №0124U000678, 2023–2025 рр), М2301 «Формування і трансформація періодичних нановуглецевомісних структур на поверхні металів

короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами»" (ДР № 0124U000481, 2024–2026 рр.), в котрих здобувач був автором окремих підрозділів.

Мета і завдання дослідження – підвищення ефективності та розширення технологічних можливостей електроерозійного алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів шляхом стабілізації вихідних технологічних показників процесу обробки за рахунок періодичної зміни полярності підключення електродів у зоні різання.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні задачі:

1. Провести систематизацію та аналіз сучасних підходів до підвищення ефективності процесу шліфування, а також виявлення перспективних напрямів для подальших досліджень і розробок у галузі електроерозійного шліфування.

2. Комплексно вивчити фізичні процеси в зоні різання і встановити закономірності, які дадуть змогу оптимізувати процес електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів.

3. Дослідити вихідні показники процесу електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів і їх порівняти з традиційними методами шліфування, такими як алмазно–іскрове шліфування.

4. Вивчити фізичні закономірності, що відбуваються під час електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів, і на підставі цих закономірностей розробити математичні моделі для прогнозування зносу інструмента, шорсткості поверхні та ефективності обробки.

5. Провести дослідження теплових процесів під час електроерозійного шліфування зі змінною полярністю, визначити їхній вплив на якість обробки та розробити рекомендації для оптимізації цього процесу.

6. Розробити математичні моделі, які дозволили б ефективно керувати процесом електроерозійного шліфування зі змінною полярністю з огляду на його складність, вплив випадкових чинників і взаємозв'язок технологічних та електричних параметрів.

7. Провести аналіз економічної ефективності процесу електроерозійного шліфування зі змінною полярністю, а також зробити оптимізацію цього процесу з метою зниження собівартості обробки та підвищення продуктивності.

Об'єкт дослідження – процес електроерозійного алмазного шліфування з періодичною зміною полярності підключення електродів у зоні різання матеріалів.

Предмет дослідження – фізичні та технологічні закономірності зміни в часі вихідних показників процесу електроерозійного алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів в умовах періодичної зміни полярності підключення електродів у зоні різання.

Методи дослідження – теоретичні дослідження в роботі ґрунтувалися на фундаментальних положеннях теорії різання, теорії управління технічними системами, матеріалознавства, опору матеріалів, теорії пружності, теплофізики, теорії оптимізації та методології техніко–економічного аналізу процесів алмазно–абразивного обробки; реалізовувалися з використанням математичних

моделей, які включають аналітичні та емпіричні складові, в середовищі сучасних інструментальних засобів математичного аналізу. Отримані результати не суперечать теоретичним основам різання матеріалів. Експериментальні дослідження зміни вихідних показників під час електроерозійного шліфування проводилися на реальному металообробному обладнанні в лабораторних умовах. Під час обробки результатів проведених експериментів застосовувалися загальноприйняті коректні методи математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в підтвердженні можливості підтримання різальної здатності алмазних кругів на металевій зв'язці періодичною зміною полярності електродів в зоні різання. При цьому:

Вперше:

1. Розроблено технологічні основи електроерозійного алмазного шліфування з періодичною зміною полярності підключення електродів у зоні різання, що ґрунтуються на комплексному аналізі факторів впливу фізичних явищ на параметри продуктивності обробки та якості отриманої поверхні деталі.

2. Доведено, що зміна підключення полярності електродів може одночасно впливати на теплонапруженість процесу, збільшую її за рахунок появи додаткових теплових імпульсів від електричних розрядів, та знижуючи її завдяки формуванню розвинутого рельєфу ріжучої поверхні інструменту за рахунок зменшення сили різання та тертя. Це дало змогу обґрунтувати можливість зниження загальної теплонапруженості процесу порівняно зі шліфуванням з постійної полярністю.

3. Сформульовано наукове положення про представлення процесу видалення матеріалу з обробленої поверхні в зоні різання у вигляді комбінації електроерозійної дії та мікрорізання з доведенням переваги зміни полярності у формуванні розвинутого ріжучого рельєфу, що сприяє сталісті процесу та зниження зносу алмазних зерен.

Удосконалено:

4. Функціональні залежності міжелектродного зазору, відстані між зернами та геометрії лунок від електричних режимів та характеристик інструменту, котрі дають змогу прогнозувати параметри продуктивності обробки та якості отриманої поверхні.

Одержали подальший розвиток і поліпшення:

5. Комплекс математичних моделей, який описує процес електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів:

– динамічна модель зносу алмазного круга, яка враховує випадковий розподіл абразивних зерен, їхню нерегулярну геометрію та вплив електричних розрядів під час зміни полярності на зв'язку інструмента,

– динамічна модель процесу електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів, яка апроксимована нелінійною моделлю Гаммерштейна, що забезпечило стійкість автоматичного керування і виявленням екстремальних характеристик процесу,

– геометричні та математичні моделі механізму різання під час електроерозійного шліфування твердих сплавів, що включають опис зносу інструмента у вигляді гвинтового циліндроїда та імовірно–статистичну модель формування шорсткості з використанням методу Монте–Карло,

– електрична модель міжелектродного зазору на основі параметричної ідентифікації осцилограм, яка описує коливальні процеси в зазорі, котра дозволить підвищити точність керування процесом,

– фізико–математична модель напружено–деформованого стану, котра враховує ушкоджувальність матеріалу, яка підтверджена експериментально та пов'язує залишкові напруження в матеріалі зі стійкістю шліфованого інструменту.

Практичне значення одержаних результатів полягає в значному підвищенні ефективності алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів. Розроблені математичні моделі міжелектродного зазору, відстані між зернами та параметрів ерозійних лунок дають змогу оптимізувати електричні режими та характеристики інструмента, забезпечуючи максимальну продуктивність і якість обробки важкооброблюваних матеріалів, таких як тверді сплави. Встановлені закономірності підвищують стабільність процесу, мінімізують теплові дефекти і шорсткість поверхні, що особливо важливо для прецизійного виробництва. Зміна полярності електродів сприяє формуванню розвиненого ріжучого рельєфу, знижуючи питоме зношування алмазних кругів і збільшуючи їхню працездатність, що скорочує витрати на інструмент.

Новий процес електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів збільшує продуктивність на 52 – 72%, знижує питомі витрати алмазних кругів на 65–85% і зменшує шорсткість поверхні на 50 – 54%, що скорочує час і витрати на виробництво різальних інструментів. Поліпшення стійкості інструменту на 53% за рахунок високих стискаючих напружень ($\sigma = -3,8$ ГПа) підвищує надійність виробів. Встановлені закономірності дають змогу оптимізувати режими шліфування (струм, тиск, швидкість круга), знижуючи теплонапруженість і ризик дефектів, таких як тріщини. Зміна полярності електродів зменшує тертя, збільшуючи стійкість інструменту і скорочуючи витрати.

Виходячи з результатів досліджень, запропоновано технічні рішення щодо виконання наступних задач: комплексне вивчення фізичних процесів у зоні різання, дослідження вихідних показників процесу електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів, вивчення фізичних закономірностей, які відбуваються під час електроерозійного алмазного шліфування, дослідження теплових процесів під час електроерозійного шліфування, розроблення математичних моделей, що дали б змогу ефективно керувати процесом електроерозійного шліфування (Пат. UA 131894 U УКРАЇНА, Пат. UA 138656 U УКРАЇНА, Пат. UA 138657 U УКРАЇНА). Практичні рекомендації щодо виконання одержаних результатів впроваджені у виробничих умовах на підприємствах м.Харкова: Акціонерне товариство «Українські енергетичні машини» та Акціонерне товариство «FED». Результати

досліджень використовуються у навчальному процесі кафедри "Інтегровані технології машинобудування" НТУ "ХПІ" при підготовці фахівців з навчальної спеціальності «Прикладна механіка» та на кафедрі машинобудування, транспорту і зварювання «Української інженерно-педагогічної академії» з навчальної спеціальності «Професійна освіта (Машинобудування)».

Особистий внесок здобувача.

Усі наукові положення, представлені для захисту, були розроблені мною особисто. Алгоритми, програмне забезпечення, моделювання та експериментальні дослідження також виконані самостійно. Формулювання основних завдань дослідження та структура роботи опрацьовані спільно з науковим консультантом. Підготовка патентів і деяких статей здійснювалася разом із співавторами. У роботі вказано посилання на авторів і джерела, коли використовувалися відомі залежності, експериментальні дані, наукові положення, системи комп'ютерного моделювання чи програмне забезпечення.

Апробація результатів дисертації.

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях і семінарах: IV Науково-технічна конференція «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і устаткування обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (м. Харків, НТУ "ХПІ" 2012 р.), Високі технології: тенденції розвитку (м. Харків, НТУ "ХПІ" 2015, 2020 р.), «Фізичні і комп'ютерні процеси» (м. Харків, ХНЕУ 2014, 2016 р.); Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я MicroCAD (м. Харків, 2016, 2021–2024 р), Нові та нетрадиційні технології в ресурсо– та енергозбереженні (2018–2024 р., м. Одеса, ОНПУ), «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» м. Чернігів, НУ «Чернігівська політехніка» 2021–2023 р), «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, ДДМА, 2021–2023 р), Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange: International Conference (Lviv, Ukraine, 2021), 3rd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (2021, Odessa, Ukraine), «Нові технології в машинобудуванні (м. Харків, НАУ «ХАІ» 2021–2023 р).

Публікації. Основні положення та наукові результати дисертаційної роботи опубліковані в 61 науковій праці, з них: 35 статей у періодичних виданнях, з яких 6 у виданнях, внесених до наукометричних баз SCOPUS та/або Web of Science, 25 статей в наукових фахових виданнях України категорії Б, 4 статті у закордонних періодичних виданнях, 23 у матеріалах апробаційного характеру, 3 патенти України на корисну модель.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 541 сторінці друкованого тексту, складається зі анотації двома мовами, вступу, 8 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 16 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 383 сторінки друкованого тексту. Робота ілюстрована 19 таблицями та 189 рисунками. Список використаних джерел містить 320 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено обґрунтування вибору теми дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету, завдання і методи дослідження. Описано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію матеріалів дисертації, виділено особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено аналізу сучасних тенденцій підвищення ефективності алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів, що є ключовим методом фінішної обробки в машинобудуванні завдяки високій точності та якості поверхні. Алмазне шліфування забезпечує продуктивну обробку міцних і зносостійких матеріалів за допомогою синтетичних надтвердих інструментів. Однак потенційні ріжучі властивості алмазних кругів використовуються недостатньо через слабе утримання зерен у зв'язці інструменту, що спричиняє їх передчасне випадання (до 50 % при обробці сталі та 25 % при шліфуванні твердого сплаву). Алмазні круги на металевих зв'язках переважають органічні за міцністю утримання зерен і продуктивністю (у 2–10 разів), але мають недоліки, такі як знижена самозаточуваність і схильність до засолювання, що вказує на технічну суперечність між вимогами міцності зв'язки та її самозаточування. Розробка металевих зв'язок спрямована на оптимізацію складу для забезпечення рівнозносостійкості зерен і зв'язки, що підвищує стійкість інструменту. Введення антифрикційних наповнювачів зменшує засолювання, а перехідні метали (Ti, Fe, Co, Ni) підвищують адгезію до алмазів (до 240 МПа). Правка кругів включає механічні (продуктивність до 265 мм³/хв), хімічні, електрохімічні (до 1000 мм³/хв) та електроерозійні методи (точність 5–20 мкм), кожен із яких має свої переваги й обмеження. Комбіновані процеси шліфування, зокрема алмазно–іскрове шліфування (АІШ) та електроерозійне алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів (ЕАШ ЗП), стабілізують ріжучі властивості, підвищуючи стійкість кругів у 10 разів і знижуючи витрату алмазів на 30 – 50 %.

В другому розділі проведено теоретичний аналіз фізичних процесів ЕАШ ЗП – комбінованого методу обробки, що інтегрує механічне мікрорізання алмазними зернами з електроерозійним впливом електричних розрядів. Цей підхід спрямований на підвищення ефективності обробки та стійкості інструменту. Дослідження зосереджується на зоні різання як складній комбінованій системі, де одночасно діють механічні, електрофізичні та термічні процеси, а також на впливі параметрів електричних розрядів і зміни полярності електродів на формування ріжучого рельєфу інструменту та продуктивність обробки. У розділі проаналізовано сили різання, механізми зносу алмазного інструменту, стружкоутворення та формування оброблюваної поверхні. На основі математичних моделей і теоретичних підходів сформульовано уявлення, що дозволяють оптимізувати технологічні параметри процесу для підвищення якості та ефективності обробки.

Зона різання при ЕАШ ЗП розглядається як складна система, що поєднує процеси мікрорізання алмазними зернами та електроерозійного впливу електричних розрядів у міжелектродному проміжку. Ця зона одночасно є

місцем механічної дії ріжучих зерен і простором для електрофізичних явищ, таких як термічні, електрогідрравлічні та плазмохімічні процеси. Синергетичний ефект цих явищ сприяє підвищенню продуктивності обробки та стійкості ріжучого рельєфу інструменту. Встановлено, що за наявності гарантованого міжелектродного зазору домінує розрядна ерозія, тоді як за присутності струмопровідних перемичок (наприклад, стружки) переважає вибухова ерозія. Електричні розряди впливають на стружку, оброблювану поверхню та зв'язку круга, а їхня інтенсивність залежить від енергії імпульсів і складу мастильно-охолоджувального середовища. Зміна полярності електродів стабілізує процес і сприяє формуванню ефективного ріжучого рельєфу, що позитивно позначається на продуктивності та якості обробки.

Для оцінки силових характеристик процесу ЕАШ ЗП розроблено математичну модель розрахунку складових сил різання P_z і P_y на одиничному алмазному зерні та шліфувальному крузі. Модель враховує розподіл нормальних і дотичних напружень, температуру різання та вплив зміни полярності електродів. Експериментальна перевірка моделі на сталі Р6М5 із використанням алмазних кругів різної зернистості (50/40, 100/80, 160/125) показала точність розрахунків із розбіжністю 15 – 25 %. Для дрібнозернистих кругів (50/40) розбіжність сягала 35 % через зниження профілю інструменту, що не повністю враховується моделлю. Отримані результати підтверджують адекватність моделі для практичного застосування та її потенціал для оптимізації режимів обробки.

Механізм різання при ЕАШ ЗП залежить від кількості активних ріжучих зерен, яка досліджувалася шляхом моделювання для плоского шліфування торцем круга. Встановлено, що число активних зерен зростає зі збільшенням поперечної подачі: від 2 – 3 при подачі $S = 0,01$ мм/подв.хід до 26 – 28 при $S = 0,06$ мм/подв.хід. Це відображає інтенсифікацію процесу знімання матеріалу та зносу зерен. Однак коефіцієнт використання алмазів K_w навіть в оптимальних

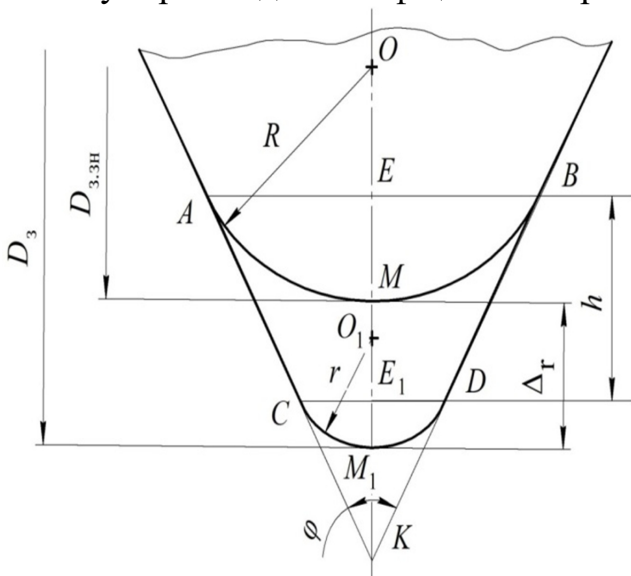


Рисунок 1 – Схема до розрахунку зносу об'єму зерна

умовах становить лише 22,4 %, що значно нижче потенційних можливостей інструменту. Порівняно зі звичайним шліфуванням (8 – 12 % для твердих сплавів і сталей), ЕАШ ЗП демонструє вищу ефективність, але все ще потребує вдосконалення для підвищення K_w до 40% шляхом оптимізації концентрації алмазів і режимів обробки. Знос алмазних зерен при ЕАШ ЗП обумовлений абразивними, адгезійними, дифузійними процесами та графітизацією, яка домінує при обробці сталей і сплавів.

Електричні розряди, особливо при високих енергіях імпульсів W (до 80 мДж), сприяють утворенню майданчиків зносу та мікротріщин на зернах, але також підвищують міцність їх закріплення у зв'язці завдяки мікрооплавленню на межі зерно – зв'язка. Розроблена математична модель зносу, що представляє зерна у вигляді еліпсоїда обертання (рисунок 1), дозволяє розрахувати об'ємний знос і питому витрату алмазів. Результати моделювання узгоджуються з експериментальними даними з розбіжністю 7 – 15 %, що підтверджує високу точність моделі. Зі збільшенням нормального тиску питома витрата алмазів зростає, особливо для дрібнозернистих кругів, що пов'язано з інтенсивнішим об'ємним зносом. Об'єм зношеної частини алмазного зерна визначали по отриманій залежності:

$$V_a = \pi \left[D_3 - (R - r) \left(\frac{1}{\sin \frac{\varphi}{2}} - 1 \right) \right] \left(R^2 - r^2 \right) \left(\operatorname{ctg} \frac{\varphi}{2} - \frac{\pi}{360} \varphi \right) \quad (1)$$

де D_3 – діаметр зерна, мм; $(R - r)$ – діаметр зерна після зносу, мм; φ – кут при вершині зерна.

Таким чином питому витрату алмазів в крузі обчислювали за формулою:

$$q = \frac{V_a \cdot \gamma_1 \cdot K \cdot n_{p.k}}{F \cdot \Delta h \cdot \gamma_2} \quad (2)$$

де K – концентрація алмазного круга, F – площа поперечного перерізу пластини, мм^2 , Δh – лінійне знімання пластини, мм, γ_1 та γ_2 – щільність матеріалу інструменту та оброблюваного матеріалу, г/мм^3 , $n_{p.k}$ – кількість робочих зерен, що контактують.

Для моделювання шорсткості поверхні на заготовці використано стохастичний підхід на основі методу Монте – Карло. Базова одиниця – лунка-імпульс, описана як сегмент сфери з випадково розподіленими параметрами глибини та діаметра. Накладання лунок на поверхню заготовки протягом часу обробки формує профіль шорсткості поверхні, що характеризується параметрами R_a , R_z , R_{\max} . Отримані статистичні розподіли дозволяють прогнозувати рівень шорсткості поверхні заготовки за заданих механічних режимів і параметрів електричного розряду.

У загальному випадку при ЕАШ ЗП, наприклад при обробці твердих сплавів, при яких знімання матеріалу, здійснюється за рахунок комбінації процесів мікрорізання – сколювання, крихкого об'ємного руйнування та ерозійного видалення матеріалу.

Видалення матеріалу в зоні контакту в результаті впливу мікрорізання – сколювання, крихкого об'ємного руйнування та ерозійного процесу можна розглядати як випадкову подію, яка характеризується спільною імовірністю видалення матеріалу деталі хоча б одним з вищевказаних процесів.

Загальна імовірність видалення визначається:

$$P(M) = 1 - \overline{P_1(M)} \cdot \overline{P_2(M)} \cdot \overline{P_3(M)}, \quad (3)$$

де $P_1(\bar{M})$ – імовірність того, що матеріал не видалений за рахунок мікрорізання; $P_2(\bar{M})$ – імовірність того, що матеріал не видалений за рахунок об'ємного крихкого руйнування, $P_3(\bar{M})$ – імовірність ерозійного неруйнування матеріалу.

Це рівняння також може бути представлено у формі:

$$P(M) = 1 - \exp(-a_0 - a_1(y, \tau) - a_2(y, \tau) - a_3(y, \tau)) \quad (4)$$

де a_0 – показник, що визначає імовірність видалення матеріалу на рівні y до входу поверхні в зону контакту деталі з шліфувальним кругом; $a_1(y, \tau), a_2(y, \tau), a_3(y, \tau)$ – показники, які визначають зміну імовірності видалення матеріалу в зоні контакту деталі з шліфувальним кругом за рахунок протікання процесів механічного різання, крихкого об'ємного руйнування, ерозійного видалення матеріалу відповідно; y – відстань від зовнішньої поверхні заготовки до розглядаємого рівня; τ – поточний момент часу.

При розрахунку $P_1(\bar{M})$ і $P_2(\bar{M})$ абразивні зерна робочої поверхні інструменту розділені на такі, що роблять мікрорізання матеріалу, і які сколюють матеріал заготовки. Число зерен, які потенційно ріжуть, визначається залежністю:

$$n_{зр} = n_z(1 - P_{ск}), \quad (5)$$

де $P_{ск}$ – імовірність події, що випадково обране зерно робить сколювання матеріалу.

На основі обробки експериментальних даних для розрахунку $P_{ск}$ запропонована залежність:

$$P_{ск} = P_0 \left[1 - \left(\frac{u}{t_\phi} \right)^\beta \right], \quad (6)$$

де P_0 і β – коефіцієнт і показник ступеня, які залежать від властивостей оброблюваного матеріалу, режиму шліфування і характеристики інструмента.

Для схеми обробки торцем шліфувального круга при розрахунку імовірності $P_1(\bar{M})$ рівняння для показника ступеня a_1 при експоненті має вигляд:

$$\begin{aligned} a_1(y, \tau) = & n_z \kappa_c (V_k \pm V_u) C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} \int_{t_0}^t \int_0^{t_f - y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} dud\tau - \\ & - n_z \kappa_c (V_k \pm V_u) C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} \int_{t_0}^t \int_0^{t_f - y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} P_0 dud\tau + \\ & + n_z \kappa_c (V_k \pm V_u) C_b \frac{\chi}{H_u^\chi} \int_{t_0}^t \int_0^{t_f - y} (t_f - y - u)^m u^{\chi-1} \left[P_0 \left(\frac{u}{t_f} \right)^\beta \right] dud\tau \end{aligned} \quad (7)$$

Виразивши інтеграл (на виході зерен із зони контакту), отримали залежність:

$$a_1(y, \tau) = A_1 \left(\frac{\Gamma(\chi)(1-P_0)}{\Gamma(m+\chi+1)} + \frac{\Gamma(\chi+\beta)P_0}{\Gamma(m+\chi+\beta+1)t_f^\beta} (t_f - y)^\beta \right) \quad (8)$$

де $A_1 = \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi (V_k \pm V_u) \Gamma(m+1)(t-t_0)}{H_u^\chi} (t_f - y)^{m+\chi}$; κ_c – коефіцієнт

стружкоутворення; C_b , m – коефіцієнти форми зерен; t_f – фактична глибина мікрорізання; u – відстань від умовної зовнішньої поверхні інструменту до вершини зерна; n_3 – кількість зерен в одиниці об'єму робочого шару інструменту; V_k, V_u – кругова швидкість інструменту і заготовки; H_u – величина шару робочої поверхні шліфувального круга, у межах якої підраховується n_3 .

При протіканні процесу крихкого об'ємного руйнування, наприклад, при обробці твердого сплаву, ширина одиничної риски b_x , як результат взаємодії зерна інструменту з деталлю, більше його фактичної ширини b_k . Для апроксимації b_x використовується ступенева залежність:

$$b_x = C_{bx} (t_f - y - u + \Delta r_x)^{m_x} \quad (9)$$

де Δr_x – величина збільшення знімання матеріалу в процесі крихкого руйнування матеріалу.

Аналогічно a_1 отримано показник ступеня a_2 рівняння (4):

$$a_2(y, \tau) = A_2 \left(\frac{\Gamma(\chi)}{\Gamma(m_x + \chi + 1)} - \frac{\Gamma(\chi + \beta)}{\Gamma(m_x + \chi + \beta + 1)t_f^\beta} (t_f - y - \Delta r_x)^\beta \right), \quad (10)$$

де $A_2 = \frac{n_3 \kappa_c C_b \chi (V_k \pm V_u) \Gamma(m_x + 1) P_0 (t - t_0)}{H_u^\chi} (t_f - y - \Delta r_x)^{m_x + \chi}$.

Для одержання відповідних залежностей для схем круглого і плоского шліфування провели заміну перемінної τ на $\frac{z}{V_u}$ у вираженнях, які визначають

зміну параметрів імовірності в зоні контакту деталі з шліфувальним кругом:

$$a_1(y, L) = \frac{n_3 \kappa_c \sqrt{2\rho} (V_k \pm V_u)}{H_u^\chi V_u} \left[\frac{\pi(1-P_0)L}{8} \left(B^2 - \frac{2BL^2}{3D_E} - \frac{L^4}{5D_E^2} \right) - \frac{0,83P_0 B^2}{\sqrt{D_E t_f^\beta}} \times \right. \\ \left. \times (15D_E^3 B^3 (-\ln(D_E B) + 2\ln(L+C)) + CL(66D_E^2 B^2 + 52L^2 D_E B + 16L^4)) \right] \quad (11)$$

$$a_2(y, L) = \frac{n_3 \kappa_c C_{bx} (V_k \pm V_u) P_0}{4H_u^\chi V_u} \times \\ \times \left[\left(B_1^2 L - \frac{2B_1 L^2}{3D_E} - \frac{L^5}{5D_E^2} \right) - \frac{1}{t_f^\beta} \left(B_1^3 - \frac{B_1^2 L^3}{D_E} + \frac{3B_1 L^5}{5D_E^2} - \frac{L^7}{7D_E^3} \right) \right], \quad (12)$$

де $B = y - t_f$, $C = \sqrt{L^2 + D_{\text{Э}}B}$, $t_f - y - \Delta r_x = -B_1$, L – відстань від основної площини до перетинання рівня y з траєкторією руху найбільш вилученої від центру ріжучої кромки; $t(z)$ – дійсна глибина різання на відстані z від основної площини; D_E – еквівалентний діаметр.

Залежності для розрахунку імовірності невидалення матеріалу при наявності ерозійних процесів отримані виходячи з наступних міркувань. Показник a_3 являє собою математичне чекання сумарної ширини ерозійних лунок, які пройшли через розглянутий перетин y (рисунок 2):

$$a_3 = \lambda_{\text{лун}} b_{EP} \quad (13)$$

де $\lambda_{\text{лун}}$ – середня кількість лунок на одиницю довжини перетину заготовки; b_{EP} – ширина ерозійної лунки на рівні y в заготовці.

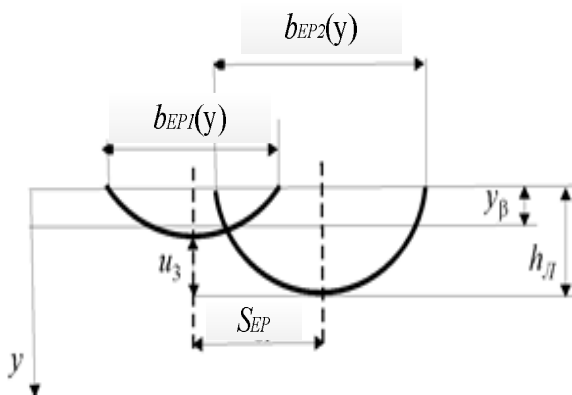


Рисунок 2 – Схема розрахунку ймовірності видалення матеріалу заготовки ерозійними розрядами

Кількість лунок на поверхні заготовки знайдемо з твердження, що розряди формуються насамперед у місцях виникнення стружок. Ширина лунки одиничного розряду визначається при вирішенні теплової задачі. Підставляючи знайдені значення в (13) і встановлюючи межі, виходячи з кінематики обробки, одержимо показник, який визначає імовірність ерозійного видалення матеріалу заготовки в точці з координатою z зони контакту і на рівні y :

$$a_3(y, z) = \Theta \int_0^{t(z) - y_{\beta}(z)} \int_{-L}^L \left(\frac{A}{h + \frac{z^2}{D_E}} - u_3 - y_{EP} \right) \cdot u_3^{\chi-1} \cdot du_3 \cdot dz, \quad (14)$$

де S_{EP} – відстань між двома сусідніми лунками на поверхні зв'язки інструмента в розглянутому перетині; $h_{Л}$ – глибина лунки; u_3 – поточна координата, яка визначає положення ерозійних лунок від найбільш глибокої западини, залишеної ерозійним розрядом; C_{ep} – коефіцієнт форми; y – відстань від зовнішньої поверхні заготівлі до рівня, на якому матеріал вважається вилученим (шар вилученого матеріалу); $V_{ck.3}$ – швидкість ковзання плями

розряду по деталі; U – напруга на електродах; $\Theta = \frac{C_{\text{эп}} k_{\text{эп}} k_C n_3 (V_K \pm V_H) \chi}{V_H H_u^{\chi}}$;

$h = \delta_{CB} - t_f + y_{\beta}$; $A = \frac{\beta z_{\Pi} U^2 \pi k_r^2}{\rho_3 [c_T (\Theta_{\Pi\Pi} - \Theta_O) + L_{\Pi\Pi} + 0.5 V_P^2] (\pi k_r^2 + 2 V_{CK.3} r_{K.CP})}$; z_n – електропровідність плазми; V_p – швидкість розльоту часток; c_T – питома

теплопровідність заготовки; $L_{пл}$ – теплота плавлення електрода; Θ_0 – початкова температура електрода; $\Theta_{пл}$ – температура плавлення електрода; ρ_3 – щільність заготовки; $r_{КСР}$ – радіус каналу розряду; k_r – коефіцієнт корекції радіусу каналу розряду; $k_{ер}$ – коефіцієнт, що враховує кількість стружок, які не викликають розряд.

Отримані залежності (11), (12) і (14) дозволяють розраховувати знімання матеріалу при комбінації процесів мікрорізання – сколювання, крихкого об'ємного руйнування і ерозійного видалення матеріалу. Запропоновані моделі і методика дозволяють проводити аналіз закономірностей знімання матеріалу в зоні контакту заготовки з інструментом не тільки для звичайних, але і для комбінованих процесів шліфування. Запропонована математична модель враховує вплив полярності підключення електродів через коефіцієнт β у рівнянні (14) для розрахунку глибини видаленого шару зв'язки шліфувального круга. Тут β характеризує частку енергії розряду, що йде на ерозію електрода (у цьому разі зв'язки круга). Основні моменти, пов'язані з урахуванням полярності. При обратній полярності електродів (круг – анод) велика частка енергії розряду витрачається на ерозію зв'язки, тому β буде вищим значенням. За прямою полярністю (круг – катод) основна частина енергії йде на ерозію оброблюваної деталі, а не зв'язки, тому β буде нижчим значенням.

Таким чином, при обратній полярності електродів інтенсивність видалення зв'язки буде вищою згідно з рівнянням (14). Періодична зміна полярності дасть змогу регулювати інтенсивність правки круга – при обратній полярності електродів відбуватиметься інтенсивніше видалення зв'язки, а за прямою – меншою мірою. Це дає можливість гнучко керувати станом робочої поверхні круга залежно від вимог до якості обробки деталі.

Третій розділ присвячено розробці нового процесу – електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів (ЕАШ ЗП), який спрямований на підвищення ефективності обробки матеріалів. Введення електричної енергії в зону різання суттєво впливає на технологічні показники шліфування, такі як продуктивність обробки, знос інструменту та якість поверхні. Дослідження електричних режимів є ключовим для вдосконалення процесу, однак використання генераторів імпульсів ускладнює аналіз через велику кількість параметрів (напруга, струм, частота, шпаруватість тощо). Для спрощення експериментів запропоновано застосовувати джерело постійного струму, що дозволяє регулювати лише напругу, струм та полярність, зменшуючи кількість змінних і підвищуючи достовірність результатів.

Електроерозійне алмазне шліфування традиційно виконується за двома постійними полярностями: пряма полярність (заготовка – анод, круг – катод); обратна полярність (заготовка – катод, алмазний круг – анод). Дослідження показали, що обратна полярність забезпечує вищу ріжучу здатність круга та питому інтенсивність шліфування. Коефіцієнт ефективності $K_{эф} = 1$, що вказує на пропорційне зростання продуктивності обробки та витрату алмазів, підтверджує ефективність цього режиму. Натомість при прямій полярності спостерігається засолювання ріжучої поверхні круга через перенесення металу

з деталі на зв'язку, що знижує ріжучу здатність, збільшує нормальну силу різання та викликає вібрації в системі. Ці явища пояснюються аналогією з електроіскровим легуванням, де круг виступає катодом, а метал осідає на його поверхні.

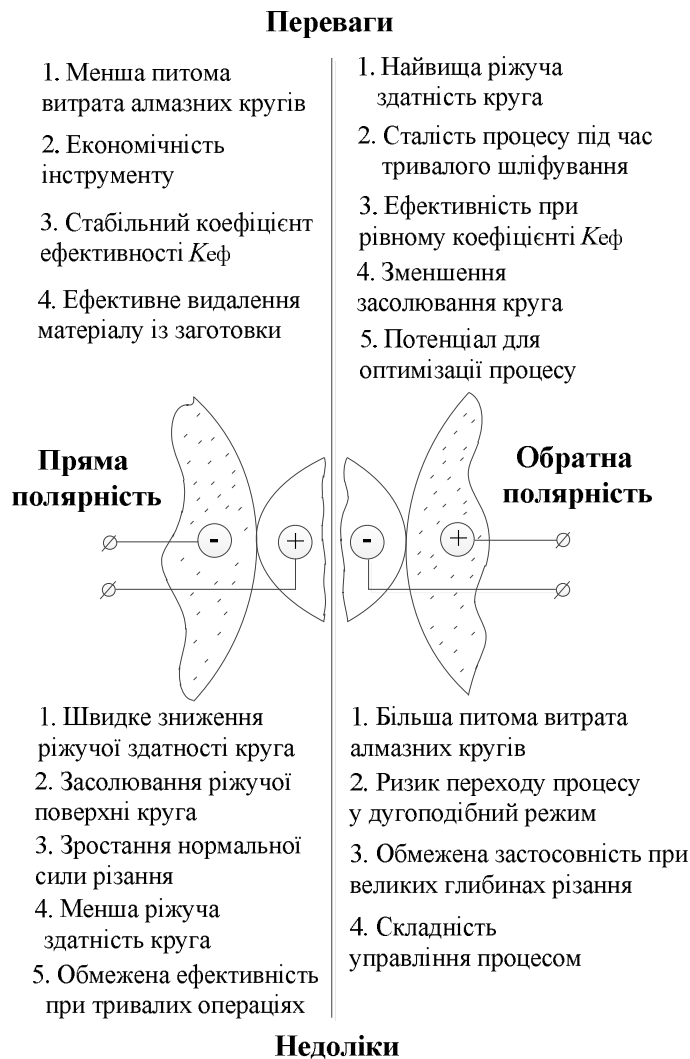


Рисунок 3 – Порівняння процесів ЕАШ за різних способів підключення постійної полярності електродів у зоні різання

Порівняння процесів ЕАШ за різних способів підключення постійної полярності електродів показано на рисунку 3. У зв'язку із зазначеними вище факторами можна однозначно стверджувати переважне використання під час ЕАШ обратної полярності. Але аналіз наведених залежностей показує, що зі збільшенням потужності електричного струму зростає питома інтенсивність шліфування. Така закономірність пояснюється зменшенням сили різання P_u , що зумовлено кращим розкриттям ріжучої поверхні круга за рахунок інтенсифікації контактно-ерозійних процесів зі збільшенням напруги. Однак при надмірному збільшенні введеної потужності електричного струму дискретний характер контактно-ерозійних процесів переходить у дугоподібний і виникає коротке замикання зони різання. ЕАШ з обратною полярністю трансформується в електроконтактну обробку.

Порівняльні результати експериментів двох процесів алмазно-іскрового шліфування (АШ) та електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів (ЕАШ ЗП) представлено на рисунку 4. Результати шліфування матеріалів – твердого сплаву ВК6 і швидкорізальної сталі – Р6М5 були отримані в рівних умовах за одних і тих самих технологічних режимів для всіх процесів обробки. У якості інструменту був застосований алмазний круг на металевій зв'язці типу 12А2-45° 150×10×3×32 АС6 125/100 М1-4. Обробку проводили на модернізованому верстаті моделі ЗД642Е. Під час АШ з прямою полярністю (АШ ПП) – шліфували швидкорізальну сталь Р6М5; під час АШ з обратною полярністю (АШ ОП) – шліфували твердий сплав ВК6.

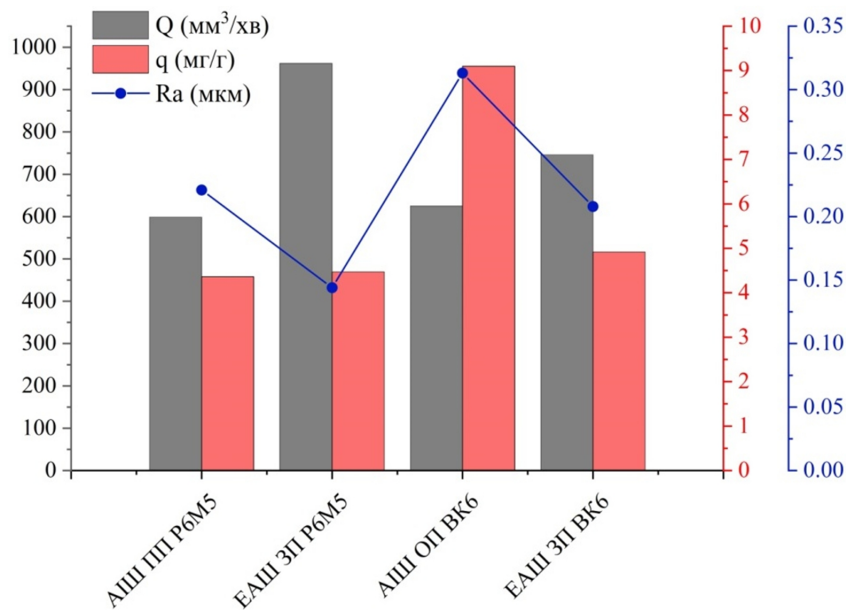


Рисунок 4 – Порівняльні результати експериментів процесів АІШ та ЕАІШ ЗП

Результати показали (рисунок 4), що ЕАІШ ЗП під час обробки швидкорізальної сталі Р6М5 забезпечує найвищу продуктивність ($Q=962$ мм³/хв) і найменшу шорсткість поверхні (Ra 0,14 мкм) за помірної витрати круга ($q=4,47$ мг/г). Під час обробки твердого сплаву ВК6 ЕАІШ ЗП також перевершує АІШ ОП, показуючи вищу продуктивність обробки $Q=746$ мм³/хв, кращу якість обробки поверхні Ra 0,21 мкм і більш ніж в 2 рази менший знос інструмента $q=4,92$ мг/г. АІШ з прямою полярністю (під час обробки сталі Р6М5) має мінімальну витрату круга (4,36 мг/г), але низькі показники продуктивності обробки $Q=599$ мм³/хв та якості поверхні Ra 0,23 мкм. АІШ зі змінною полярністю (під час обробки твердого ВК6) також менш ефективна: продуктивність обробки складає $Q=625$ мм³/хв, висока витрата круга $q=9,1$ мг/г і висока шорсткість поверхні (Ra 0,31 мкм). ЕАІШ ЗП зі змінною полярністю краще для обробки обох матеріалів, забезпечуючи оптимальне поєднання продуктивності, якості поверхні та стійкості інструменту.

Механізм переваг змінної полярності пояснюється комбінованим впливом ерозії та мікрорізання. Періодична зміна напрямку електронного та іонного потоків у зоні контакту інструмента з деталлю сприяє рівномірному розподілу енергії, що зменшує локальний перегрів і знос круга. Крім того, досліджено вплив частоти імпульсів на процес шліфування. Зі збільшенням частоти імпульсів спостерігалось зменшення розмірів ерозійних лунок і ерозійної продуктивності, що дозволяє точно регулювати процес обробки. Оптимальна частота забезпечує збалансовану ерозію круга та високу продуктивність зняття матеріалу з деталі.

У четвертому розділі проведено експериментальне дослідження стану робочої поверхні алмазного круга та величини міжелектродного зазору в процесі електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів (рисунок 5). Встановлено, що напруга запалювального імпульсу та амплітуда розрядного струму є основними факторами, що впливають на

величину міжелектродного зазору, який зростає з їх збільшенням, забезпечуючи ефективніше видалення матеріалу. Частота та шпаруватість імпульсів мають менший вплив, зменшуючи зазор при їх зростанні. Міжелектродний зазор при ЕАШ ЗП на 74% менший, ніж при алмазно-іскровому шліфуванні з постійною полярністю, що підвищує продуктивність обробки ($Q = 527-758 \text{ мм}^3/\text{хв}$).

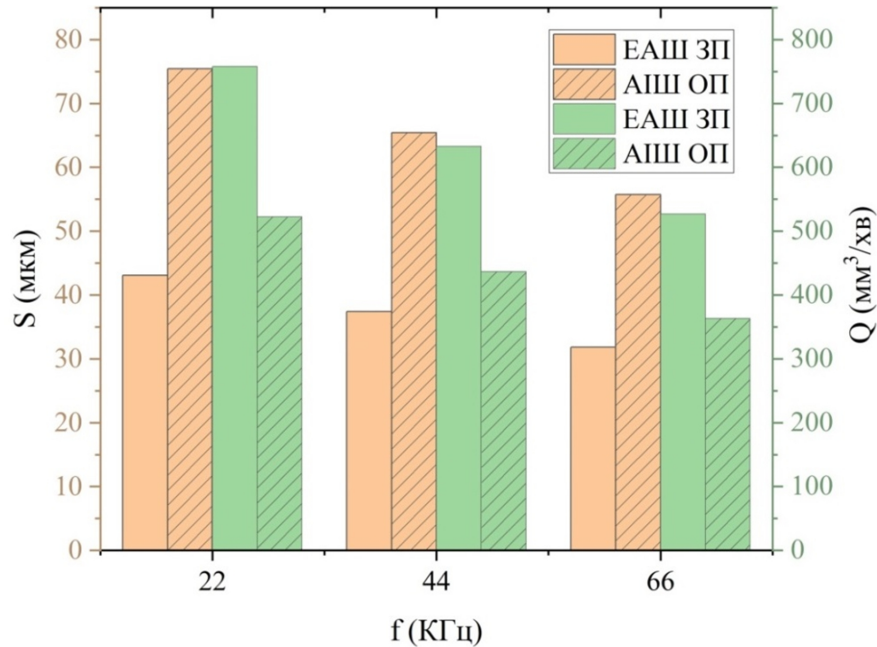


Рисунок 5 – Результати порівняння міжелектродного зазору і продуктивності обробки при різних способах шліфування.

Об'єм лунок, утворених одиничними розрядами, нелінійно залежить від енергії імпульсів ($W=0,01-0,3 \text{ Дж}$) та складу зв'язки, причому зв'язки з вищою електроерозійною стійкістю (наприклад, зв'язка М50) мають менші об'єми лунок. Відстань між зернами залежить від частоти, шпаруватості, зернистості та концентрації алмазів: більша зернистість збільшує відстань, а вища концентрація та частота її зменшують. Процес ЕАШ ЗП формує розвинену ріжучу поверхню з більшим міжзерновим простором порівняно з процесом алмазно-іскрового шліфування, що сприяє ефективній обробці та зниженню зносу інструменту.

У п'ятому розділі досліджено теплові процеси під час електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів, порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням. Для аналізу просторово-часового розподілу температурних полів у зоні обробки використано метод скінченних елементів. Модель базується на розв'язанні тривимірної нестационарної теплової задачі, яка враховує граничні умови, пов'язані з тепловими потоками від електричних розрядів і механічного різання. Рівняння теплопровідності, початкові та граничні умови сформульовано з урахуванням коефіцієнтів теплопровідності, теплоємності та щільності матеріалу. Результати моделювання, виконаного за допомогою програмного комплексу ANSYS Workbench 17.2, показали, що локалізоване нагрівання в зоні контакту призводить до утворення залишкових

напружень і дефектів, таких як мікротріщини та сколи. Ці дефекти суттєво впливають на експлуатаційні характеристики твердосплавних пластин. Порівняння теоретичних даних з експериментальними показало розбіжність у межах 12–17%, що свідчить про достатню точність моделі для якісного опису процесу. Модель також враховує неоднорідність теплового потоку вздовж дуги контакту алмазного круга з пластиною, що дозволяє прогнозувати розподіл температур і напружень у поверхневому шарі.

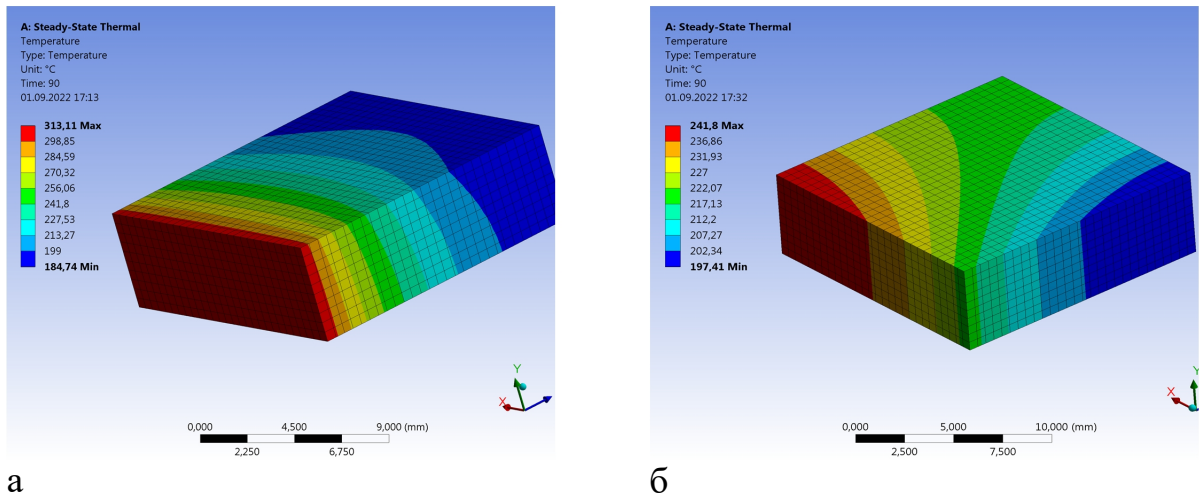


Рисунок 6 – Результати моделювання температури пластини:
а) під час АШ ОП, б) під час ЕАШ ЗП.

Температуру оброблюваної пластини з твердого сплаву ВК6 вимірювали за допомогою інфрачервоного пірметра FLUS IR-833 у безконтактному режимі. Експерименти проводилися з використанням методики багатофакторного планування, що дало змогу отримати математичні моделі залежності температури від технологічних параметрів: розрядного струму (I), нормального тиску (P_n , МПа), швидкості круга (V , м/с) та частоти імпульсів (f , КГц). Результати показали, що розрядний струм і нормальний тиск є ключовими факторами, які впливають на температуру. Збільшення розрядного струму (від 4 до 12 А) призводить до зростання температури на 8–15%, що пов'язано з інтенсивнішим ерозійним впливом на алмазозносний шар круга та погіршенням стану ріжучої поверхні. Нормальний тиск також посилює тепловиділення через більшу ймовірність контакту металеві зв'язки з оброблюваною поверхнею. При підвищенні швидкості круга з 15 до 25 м/с температура зростає до максимуму, близького до температури плавлення матеріалу, але при подальшому збільшенні стабілізується завдяки обмеженому поширенню тепла вглиб пластини. Порівняння ЕАШ ЗП з алмазно-іскровим шліфуванням з обратною полярністю (АШ ОП) виявило, що ЕАШ ЗП характеризується меншою теплонапруженістю. Це пояснюється кращим розкриттям алмазних зерен і зниженням тертя, що зменшує тепловий потік у деталь. Наприклад, при нормальному тиску 2,0 МПа різниця температур між АШ ОП і ЕАШ ЗП зростає в 1,19–1,28 рази, що підтверджує перевагу ЕАШ ЗП для стабільної обробки.

Особливу увагу приділено впливу зміни полярності електродів, яка зменшує сили різання і тертя, знижуючи тепловиділення. Імпульсна дія розрядів створює ефект переривчастості, аналогічний переривчастому шліфуванню, що сприяє зниженню температури. Математична модель для ортотропних матеріалів, таких як швидкорізальна сталь Р6М5, показала, що напрямок максимальної теплопровідності може бути використаний для мінімізації температурних градієнтів (рисунок 7). Досліджено також вплив внутрішніх структурних меж, таких як карбідні чи інтерметалідні сітки, на теплонапруженість. Наявність цих меж призводить до концентрації теплових напружень і утворення тріщин. Для зменшення цього ефекту запропоновано збільшувати період переключення полярності електродів, що еквівалентно перериванню процесу і скорочує глибину проникнення теплового поля. Використання мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ (МОТС) додатково знижує температуру в зоні шліфування, наприклад, з 500°C до 280°C для сплаву ВК6.

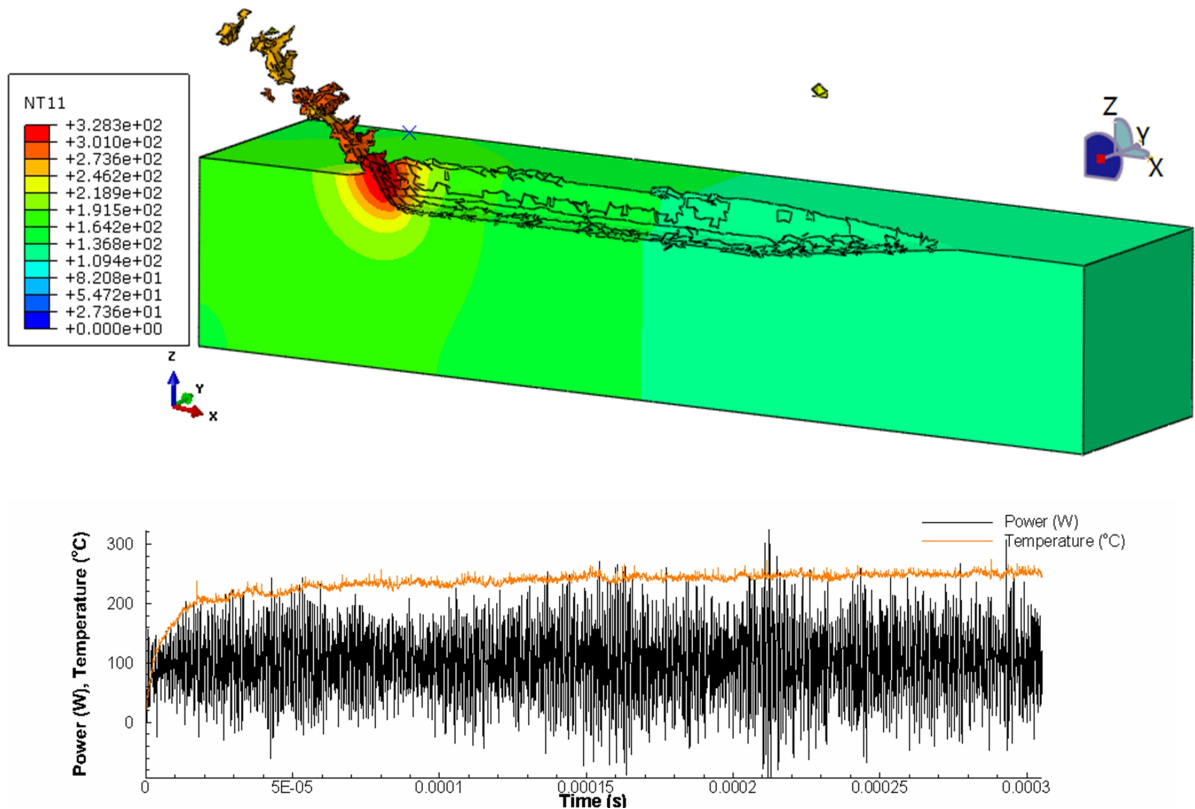


Рисунок 7 – Залежності температури та потужності шліфування. Умови обробки: сталь Р6М5, круг 12А2–45°–150×10×3×32–АС6–100/80 –М1–01–4.

Розділ шостий присвячений комплексному дослідженню якості поверхні твердого сплаву марки ВК6 після ЕАШ ЗП. Дослідження геометричних параметрів ерозійних лунок проводилось на спеціальній установці, яка забезпечувала моделювання одиночного електричного розряду. Установка складалася з механічного пристрою для проведення розрядів та приставки для

виділення одиночного імпульсу. Зразки твердого сплаву ВК6 у формі прямокутного паралелепіпеда ($14 \times 14 \times 5^{\circ}$ мм) оброблялись графітовим електродом сферичної форми (радіус 0,5 мм). Міжелектродний зазор регулювався з точністю 1 мкм за допомогою механізму точного підведення та індикатора годинникового типу. Для аналізу геометричних параметрів лунок (діаметр d , глибина h , об'єм V) застосовували метод профілографування на приладі Hommelwerke T8000. Вимірювання проводились у двох взаємно перпендикулярних напрямках, що забезпечило високу точність оцінки. Експеримент базувався на повному факторному плані типу 2^3 , де незалежними змінними були напруга (U , 5–45 В), амплітуда розрядного струму (I , 2–22 А) та період переключення полярності електродів (t , 1–7 с). Результати оброблялись за допомогою регресійного аналізу, а значущість коефіцієнтів оцінювалась за критерієм Фішера з довірчою ймовірністю 95%. Експерименти показали, що основними факторами, які впливають на геометричні параметри лунок, є амплітуда розрядного струму (I) та період переключення полярності (t). Зі збільшенням цих параметрів зростає діаметр, глибина та об'єм лунок за рахунок розширення розрядного каналу та підвищення щільності теплового потоку (рисунок 8). Наприклад, при $U = 45^{\circ}$ В, $I = 22^{\circ}$ А, $t = 7^{\circ}$ с об'єм лунки досягав $765,8 \text{ мм}^3$, тоді як при $U = 5^{\circ}$ В, $I = 2^{\circ}$ А, $t = 1^{\circ}$ с – лише $16,9 \text{ мм}^3$.

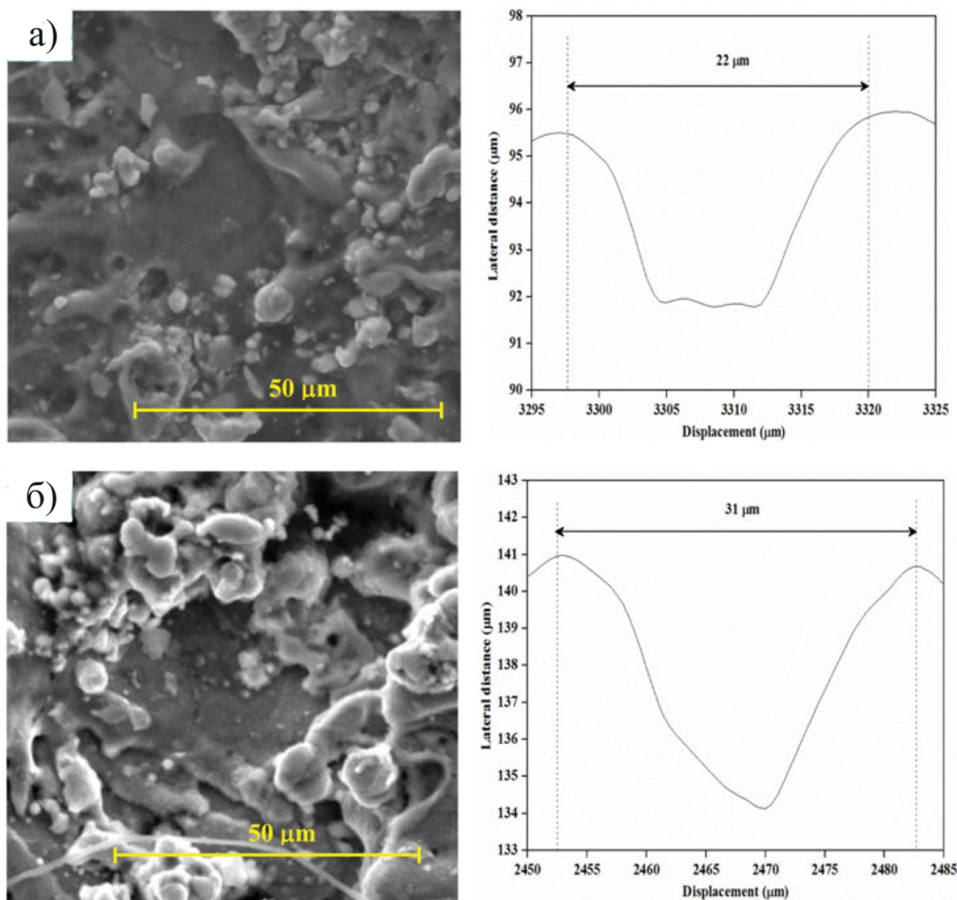


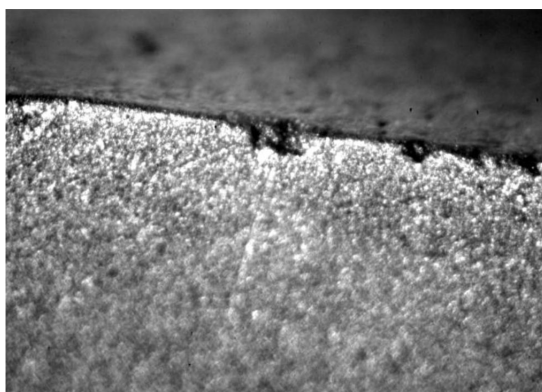
Рисунок 8 – Мікрофотографії і профілограми поверхні ерозійної лунки

- а) період переключення полярності електродів $t=1$ с,
- б) період переключення полярності електродів $t=4$ с.

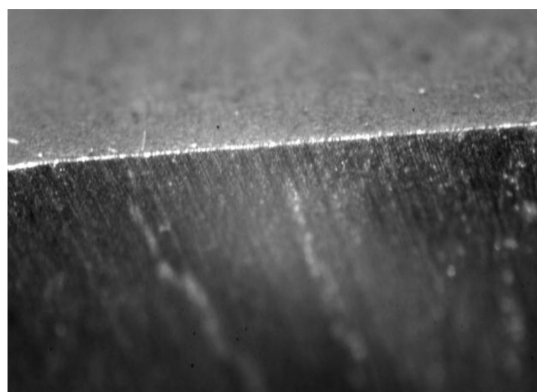
Регресійна модель підтвердила значущість коефіцієнтів для U , I та t , а її адекватність перевірена за критерієм Фішера. Зміна полярності електродів сприяла стабільності процесу та зниженню мікрodefektів на поверхні.

Вивчення залишкових напружень проводилось за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН 2.0 у фільтрованому випромінюванні залізного анода. Аналіз напруженого стану здійснювався методом $\sin^2\psi$, який дозволив оцінити макроскопічні залишкові напруження (першого роду) та розміри областей когерентного розсіювання (ОКР) за формулою Селякова-Шеррера. Для порівняння досліджувались зразки у вихідному стані (після спікання та полірування), після АШ та після ЕАШ ЗП. Режими шліфування включали: нормальний тиск $P_n = 1,2$ МПа, швидкість круга $V = 25$ м/с, амплітуду імпульсу $I = 8$ А, частоту імпульсів $f = 44$ кГц. Рентгенівський аналіз показав, що після ЕАШ ЗП у поверхневому шарі формуються вищі стискаючі макронапруження ($\sigma = -3,8$ ГПа) порівняно з АШ ($\sigma = -1,2$ ГПа). Деформації після ЕАШ ЗП склали $\varepsilon = 0,036$ мм, тоді як після АШ – $\varepsilon = 0,012$ мм. Розміри ОКР після ЕАШ ЗП становили 200 \AA , що більше, ніж після АШ (150 \AA), але менше, ніж у вихідному стані (600 \AA). Вищий рівень стискаючих напружень при ЕАШ ЗП пояснюється переважанням силового фактора над тепловим, що сприяє формуванню більш міцного поверхневого шару.

Стійкість (прошліфованих) різальних пластин ВК6 оцінювалась на токарно-гвинторізному верстаті 16К20 під час точіння сірого чавуну СЧ20 (НВ180) без охолодження. Режими обробки: швидкість різання $V = 100$ м/хв, подача $S = 0,075$ мм/об, глибина різання $t = 0,8$ мм. Критерієм затуплення було прийнято знос по задній поверхні $h_3 = 0,4$ мм, виміряний за допомогою мікроскопа «Мир – 2». Порівняння проводилось між пластинами, обробленими методами ЕАШ ЗП та АШ. Стійкісні випробування продемонстрували перевагу ЕАШ ЗП над АШ. Пластини після ЕАШ ЗП досягли критерію зносу $h_3 = 0,4$ мм за 84 хв роботи, тоді як після АШ – за 55 хв, що на 53% більше. Шорсткість поверхні різальної кромки після ЕАШ ЗП склала $Ra = 0,83$ мкм, що значно нижче, ніж після АШ ($Ra = 2,79$ мкм). Мікрофотографії та профілограми підтвердили кращу якість ріжучої кромки після ЕАШ ЗП, що пояснюється меншою кількістю мікрodefektів та стабільнішим процесом обробки (рисунок 9).



а – після АШ ОП



б – після ЕАШ ЗП

Рисунок 9 – Мікрофотографія ріжучої кромки твердого сплаву ВК6.

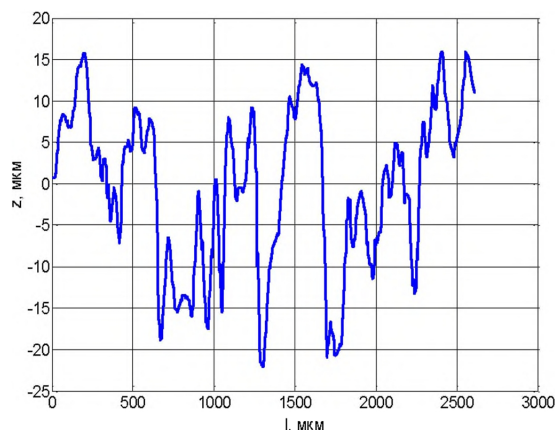
Чисельне моделювання напружено-деформованого стану проводилось у ANSYS® Workbench® 17.2 з використанням моделі Johnson°–Holmquist для пошкодженого середовища. Модель враховувала крихке руйнування матеріалу, розподіл силового та теплового впливу, а також кінематику шліфування. Розрахункова область відповідала пластині ВК6 розмірами 15×15×5 мм. Параметри моделі включали модуль зсуву, критерій пластичності Мізеса та поліноміальне рівняння стану для сплаву ВК6. Моделювання показало, що при ЕАШ ЗП деформації розподіляються більш рівномірно, а зона напружень проникає на глибину до 50°мкм. При підвищенні режимних параметрів ($S_{пов} = 0,015$ °мм/подв.хід, $V = 35$ °м/с) спостерігається концентрація напружень поблизу ріжучої кромки, але без значних руйнувань. На відміну від АШ, де вищі температури в зоні різання (до 500°С) призводять до утворення мікротріщин, ЕАШ ЗП забезпечує стабільніший напружений стан. Відхилення між розрахунковими та експериментальними даними склали 5°–20°%, що підтверджує надійність моделі.

Отримані результати свідчать про переваги ЕАШ ЗП над АШ у формуванні якісної поверхні та підвищенні зносостійкості інструменту. Вищі стискаючі напруження та менша шорсткість різальної кромки після ЕАШ ЗП сприяють зниженню зносу, що пов'язано з оптимізованою дією електричних розрядів та зміною полярності електродів. Силовий фактор домінує в процесі ЕАШ ЗП, що зменшує теплові впливи та сприяє стабільності обробки. Порівняння з літературними даними підтверджує, що стискаючі напруження підвищують міцність твердих сплавів, тоді як теплові фактори, характерні для АШ, можуть викликати розтягувальні напруження та мікропошкодження. Чисельне моделювання дозволило уточнити розподіл напружень і деформацій, що є важливим для прогнозування поведінки інструменту в реальних умовах. Адаптивність розробленої моделі дає змогу застосовувати її до інших композиційних матеріалів, що розширює її практичну цінність.

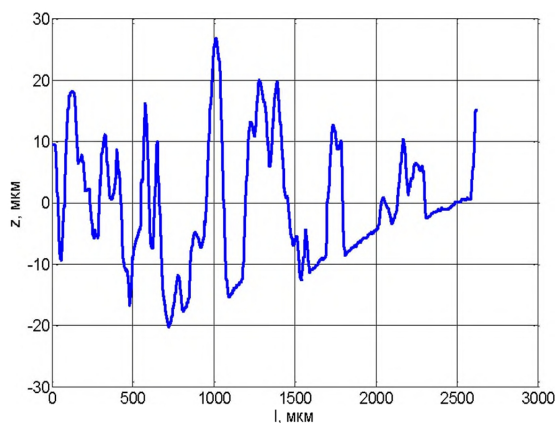
Розділ сьомий присвячений аналізу динаміки процесу електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів та розробці математичних моделей для підвищення ефективності його управління. Процес ЕАШ ЗП характеризується складністю через непередбачувані зміни характеристик зовнішніх впливів, властивостей керованих об'єктів, недостатню повноту інформації про інструмент і параметри режиму обробки, а також вплив випадкових чинників. Ці особливості ускладнюють формалізацію процесу і застосування традиційних систем керування, що налаштовуються лише на етапі проектування. Для подолання цих труднощів запропоновано методику створення трьох типів математичних моделей: моделі зовнішніх збурень, що враховує топологію робочої поверхні круга (РПК); електричної моделі міжелектродного зазору; та електромеханічної моделі процесу ЕАШ ЗП.

Топологічна модель поверхні алмазного шліфувального круга розроблена з використанням методу математичного моделювання, що базується на гіпотезі про стаціонарність та ергодичність випадкового процесу розподілу мікронерівностей робочої поверхні круга (РПК). Експериментально сформовані вибірки профілограм поверхні круга після алмазно-іскрового шліфування (АШ

ОП) та ЕАШ ЗП (рисунок 10). За допомогою методу сингулярного розкладання (SSA) профілограми розкладено на гармонійні та випадкові складові. Для цього використано алгоритм "Гусениця-SSA", який не потребує знання параметричної моделі часового ряду і дозволяє працювати з нестационарними зашумленими даними. Довжину вікна розкладання (L) визначено методом синхронного накопичення, обравши оптимальні значення в межах $800^{\circ}-1300$ мкм (856 мкм для АШ ОП і 876 мкм для ЕАШ ЗП).



а) круг після АШ ОП



б) круг після ЕАШ ЗП

Рисунок 10 – Профілограми РПК із зернистістю 100/80 мкм.

Гармонійні складові профілограм апроксимовано синусоїдальними залежностями, а їхні параметри (амплітуди, періоди, фази) визначено на основі гармонійного аналізу. Наприклад, для круга після АШ ОП виділено 5 пар гармонік (амплітуди від 7,2 до 2,3 мкм, періоди від 460,8 до 91,9 мкм), а для ЕАШ ЗП – 6 пар (амплітуди від 7,3 до 2,1 мкм, періоди від 385,9 до 116,2 мкм). Випадкові складові, отримані шляхом віднімання гармонійних складових від вихідних профілограм, підпорядковуються нормальному закону розподілу, що підтверджено критерієм Колмагорова[°] – Смірнова з імовірністю 99,9%.

Стационарність процесу досліджено за допомогою рекурентних співвідношень для математичного очікування та дисперсії випадкових складових. Для поверхні круга після АШ ОП процес є нестационарним, що проявляється у мінливості дисперсії (рисунок 11), тоді як для ЕАШ ЗП процес стационарний, оскільки математичне очікування та дисперсія залишаються сталими (рисунок 12). Стационарність ЕАШ ЗП забезпечує стабільну якість обробки, високу продуктивність і економічну ефективність, що робить цей метод переважним для отримання деталей із заданими параметрами точності та якості поверхні.

Ідентифікація випадкової складової профілограм проведена за допомогою рекурентного методу найменших квадратів (РМНК). Отримані коефіцієнти моделей використано для розрахунку передавальних функцій формувальних фільтрів, що відтворюють випадкові складові. Спектральні густини потужності, розраховані за цими функціями, добре узгоджуються з емпіричними даними. На основі цих результатів у Matlab Simulink розроблено модель поверхні круга,

яка включає гармонійні складові (синусоїди) та випадкові складові (фільтр із "білим" шумом на вході). Помилка моделювання не перевищує 10%, що свідчить про високу адекватність моделі.

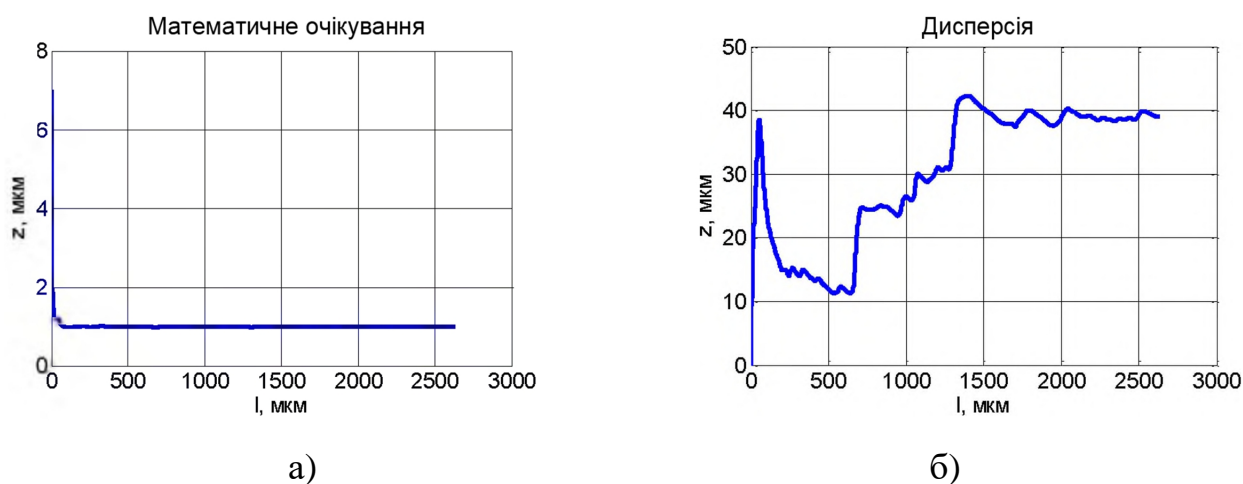


Рисунок 11 – Оцінка математичного очікування (а) і дисперсії (б) випадкової складової РПК після АШ ОП.

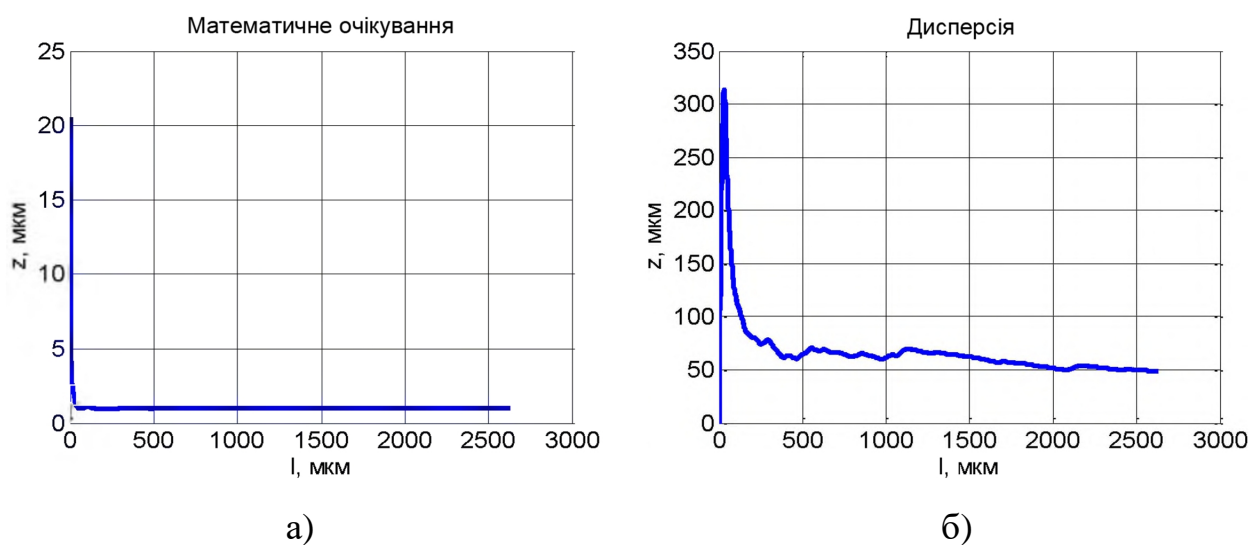


Рисунок 12 – Оцінка математичного очікування (а) і дисперсії (б) випадкової складової РПК після ЕАШ ЗП.

Міжелектродний зазор між поверхнею круга та деталі відіграє ключову роль у процесі шліфування. Його величина залежить від режимів обробки, характеристик круга та матеріалу деталі. Статистичний аналіз профілів поверхні підтвердив нормальний розподіл висот мікронерівностей, що забезпечує стабільність і керованість процесу. Досліджено ймовірність виникнення несприятливих режимів (холостого ходу та короткого замикання) залежно від величини зазору. Встановлено, що оптимальний зазор мінімізує ці режими, а його значення залежить від граничного проміжку (Z_{mo}) та середнього квадратичного відхилення мікронерівностей (σ). Збільшення

шорсткості круга (Ra) призводить до зменшення екстремальної потужності процесу без зміни положення екстремуму ($Z_{гр}/2$).

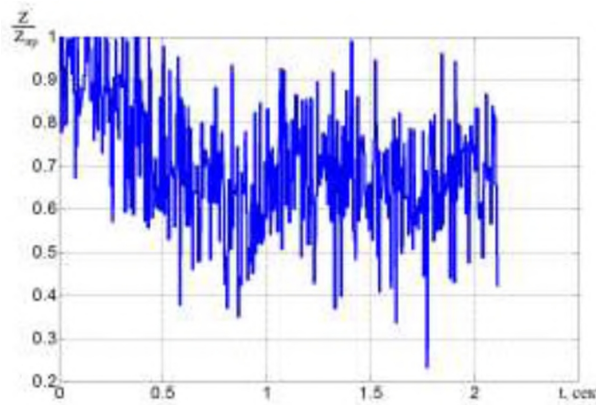
Модель міжелектродного зазору (МЕЗ) розроблено на основі експериментальних осцилограм струмів і напруг, отриманих за допомогою осцилографа С1-101 на верстаті ЗД642Е з генератором імпульсів НО 6506. Використано чашковий алмазний круг (12А2–45°, зернистість 100/80) та твердосплавні пластини ВК6. Електричні режими: амплітуда напруги 50 В, частота 44 кГц, шпаруватість 1. Осцилограми зафіксовано для різних величин МЕЗ (від 0 до 8 мкм), включаючи коротке замикання. Аналіз осцилограм показав коливальний характер електричних процесів у МЕЗ, що дозволило обрати T -подібну схему заміщення з активними опорами (R_1 , R_2), індуктивностями (L_1 , L_2) та ємністю (C). Активні опори визначено за падінням напруги та струму: $R_1 = 4,85$ Ом (стале для генератора), R_2 зростає від 0 (КЗ) до 4,48 Ом (МЕЗ = 8 мкм). Залежність відносного опору ($R_{від} = R_1 / R_2$) від величини МЕЗ апроксимовано нелінійним виразом із коефіцієнтами 0,011 і 2,843, отриманими методом найменших квадратів. Параметри L_1 , L_2 і C визначено шляхом мінімізації квадрату відстані між експериментальними та розрахунковими точками осцилограм перехідного процесу, використовуючи симплекс-метод Нелдера–Міда в Matlab. Усереднені значення: $L_1 = 173$ мкГн, $L_2 = 173$ мкГн, $C = 18$ мкФ. Розроблена Simulink-модель МЕЗ підтвердила збіг розрахункових і експериментальних осцилограм струмів, напруг і потужності з помилкою до 4%, що свідчить про високу точність моделі.

Динамічна модель процесу ЕАШ ЗП створена в Matlab Simulink і включає: привід обертання круга (асинхронний електродвигун), привід подачі (гідропривід верстата ЗД642Е), генератор технологічних імпульсів (ШГІ 40-440А) та пристрій для зміни полярності електродів. Модель відтворює електродинамічні процеси, що виникають під час зменшення МЕЗ до граничного значення, генерації розрядів і знімання матеріалу. Отримані осцилограми зазору, струму, напруги та потужності підтверджують адекватність моделі реальним процесам (помилка до 14%) (рисунок 13). Встановлено екстремальну залежність середньої потужності від величини МЕЗ: різке зростання потужності при збільшенні зазору від нуля до максимуму (зменшення коротких замикань), стабільний максимум при оптимальному зазорі, і спад до нуля при надмірному зазорі (холостий хід). Зміщення екстремуму пов'язане з неузгодженістю опорів генератора та МЕЗ, що коригується регулюванням амплітуди імпульсів.

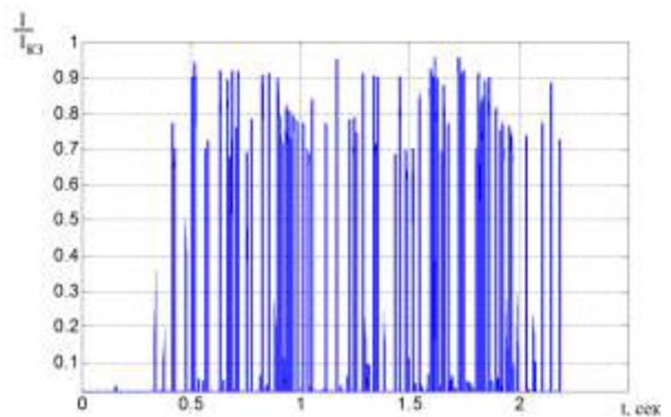
Досліджено залежності потужності від частоти імпульсів, опору МЕЗ і шорсткості круга, що дозволило оцінити енергоспоживання, продуктивність обробки і сталість процесу ЕАШ ЗП. Для автоматичного керування модель апроксимовано моделлю Гаммерштейна з нелінійною статичною характеристикою та лінійною динамічною ланкою. Сталість системи підтверджено критеріями Найквіста та частотними характеристиками (ЛАЧХ, ФЧХ), що забезпечує прогнозованість і керованість процесу.

Розроблені моделі – топологічна поверхні круга, електрична МЕЗ і динамічна процесу шліфування – дозволяють підвищити ефективність

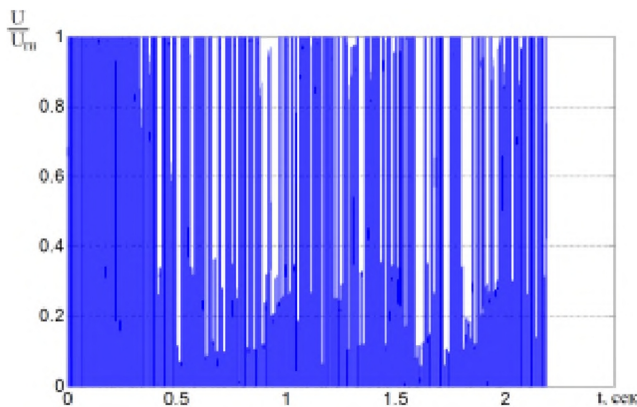
управління ЕАШ ЗП. Топологічна модель підтвердила стабільність ЕАШ ЗП і нормальний розподіл профілю поверхні (помилка до 10%). Модель МЕЗ точно описує електричні процеси (помилка до 4%), а динамічна модель відтворює реальну поведінку процесу (помилка до 14%). Оптимальний МЕЗ (половина граничного значення) і узгодження опорів забезпечують максимальну потужність, продуктивність обробки і зниження енергоспоживання, що створює основу для вдосконалення технології та систем автоматичного керування процесом.



а) міжелектродний проміжок



б) амплітуда розрядного струму;



в) амплітуда імпульсів напруги



г) амплітуда імпульсів потужності

Рисунок 13 – Осцилограми процесу ЕАШ ЗП.

У восьмому розділі розроблено оптимізаційний алгоритм для визначення режимів електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів, що забезпечують мінімальну собівартість обробки деталей при дотриманні вимог до якості. Алгоритм враховує стійкість алмазних кругів, штучний час та період перемикання полярності. Доведено, що процес електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів знижує витрати за рахунок підвищення стійкості інструменту, скорочення машинного часу та оптимізації режимів обробки. На прикладі торцекруглошліфувального верстата ХШ4–12Н показано скорочення штучного часу, збільшення періоду стійкості круга та зниження витрат на інструменти, з річним економічним ефектом 90519 грн. і терміном окупності 0,55 року (на

прикладі одного верстата). Запропонований підхід до оптимізації режимів та оцінки економічної ефективності придатний для адаптації до інших процесів механічної обробки, підтверджуючи перспективність процесу електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів для підвищення продуктивності та економічної ефективності у машинобудуванні.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі одержаних науково обґрунтованих результатів вирішена актуальна для машинобудування проблема підвищення ефективності та розширення технологічних можливостей електроерозійного шліфування важкооброблюваних матеріалів шляхом стабілізації вихідних технологічних показників процесу обробки за рахунок зміни полярності підключення електродів у зоні різання.

Здобуті найбільш важливі наукові та практичні результати:

1. Алмазне шліфування є високоефективним методом фінішної обробки важкооброблюваних матеріалів завдяки високій точності, якості поверхні та продуктивності. Використання синтетичних надтвердих матеріалів, зокрема алмазу, забезпечує обробку міцних і зносостійких матеріалів, однак слабе утримання зерен у зв'язці призводить до їхнього передчасного випадання (до 50% при обробці сталі та 25% при шліфуванні твердого сплаву), що знижує потенційні ріжучі властивості інструменту. Алмазні круги на металевих зв'язках перевищують органічні за міцністю утримання зерен і продуктивністю (у 2–10 разів), але мають недоліки у вигляді зниженої самозаточуваності та засолювання. Розробка оптимального складу металевих зв'язок спрямована на забезпечення рівнозносостійкості зв'язки та зерен, підвищення адгезії (до 240 МПа) за допомогою перехідних металів (Ti, Fe, Co, Ni) і зниження засолювання завдяки антифрикційним наповнювачам, хоча стабільність самозаточування залишається проблемною. Методи правки алмазних кругів (механічні, хімічні, теплові, комбіновані) різняться за продуктивністю (від 265 до 1000 мм³/хв) і точністю (5–20 мкм), але супроводжуються такими недоліками, як руйнування зерен чи графітизація. Комбіновані процеси шліфування, зокрема алмазно-іскрове з електроерозійним впливом і змінною полярністю електродів, підвищують стійкість інструменту в 10 разів і знижують витрату алмазів на 30–50%, хоча нерівномірний знос і засолювання залишаються проблемами. Таким чином, алмазне шліфування потребує подальшого вдосконалення зв'язок, методів правки та комбінованих процесів для забезпечення стабільності й ефективності.

2. Електроерозійне алмазне шліфування є складним комбінованим процесом, що інтегрує механічне мікрорізання з електроерозійними, термічними, електрогідралічними та плазмохімічними впливами, забезпечуючи синергетичний ефект для підвищення продуктивності обробки та стійкості інструменту. Розроблені математичні моделі сил різання (P_z , P_y) та зносу алмазних зерен, які враховують розподіл напружень, температуру та вплив електричних розрядів, характеризуються високою точністю: розбіжність

із експериментальними даними становить 15–25% для сил різання і 7–15% для зносу інструмента. Механізм різання визначається кількістю активних ріжучих зерен, що зростає з подачею (від 2,36 до 26–28 при 0,01–0,06 мм/подв.хід), однак коефіцієнт використання алмазів залишається низьким (22,4%), вказуючи на можливості для оптимізації. Знос зерен спричинений абразивними, адгезійними, дифузійними процесами та графітизацією, при цьому електричні розряди сприяють як формуванню зносу, так і зміцненню закріплення зерен у зв'язці. Модель формування поверхні, заснована на теорії ймовірностей, враховує мікрорізання, крихке руйнування та ерозійне видалення матеріалу, дозволяючи прогнозувати зрізання для різних схем шліфування. Зміна полярності електродів підтримує самозаточування круга, підвищуючи стійкість ріжучого рельєфу, тоді як ймовірність контакту стружки зі зв'язкою залежить від шорсткості та глибини різання.

3. Запропоновано та експериментально обґрунтовано новий метод електроерозійного алмазного шліфування, який базується на періодичній зміні полярності в зоні різання, що забезпечує підтримання ріжучої здатності алмазних кругів на металевій зв'язці та регулювання вихідних показників процесу без зміни електричних і технологічних режимів. Доведено, що змінна полярність перевищує традиційні режими шліфування за такими показниками: максимальна продуктивність обробки ($Q = 962 \text{ мм}^3/\text{хв}$), мінімальний знос круга ($q = 4,47 \text{ мм}^3/\text{хв}$), найвища питома продуктивність (216,3), період стійкості круга (360 хв), найменші сили різання ($P_y = 125 \text{ Н}$, $P_z = 350 \text{ Н}$), найнижчий коефіцієнт шліфування (0,36), мінімальна енергоємність (2157 Дж/мм³) та найкраща шорсткість поверхні ($Ra \text{ } 0,254 \text{ мкм}$). Оптимізація процесу досягається завдяки комбінованому впливу ерозії та мікрорізання, а періодична зміна напрямку електронного та іонного потоків сприяє рівномірному розподілу енергії розряду, зменшуючи знос круга та покращуючи якість поверхні. Встановлено, що зі збільшенням частоти імпульсів зменшуються розміри лунок і ерозійна продуктивність, забезпечуючи збалансовану ерозію круга та високу ефективність обробки деталі. При обробці швидкорізальної сталі Р6М5 та твердого сплаву ВК6 запропонований метод ЕАШ ЗП підвищує продуктивність на 60–72%, знижує питому витрату круга на 65–85% та покращує шорсткість поверхні на 50–54% порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням. Процес ЕАШ ЗП характеризується вищими коефіцієнтами шліфування та нижчою енергоємністю порівняно з традиційними методами, що підтверджує його високу ефективність і практичну цінність.

4. Проведено дослідження впливу електричних параметрів на міжелектродний зазор та об'єм лунки при електроерозійному алмазному шліфуванні (ЕАШ) зі змінною полярністю порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням (АШ) із постійною обратною полярністю. Встановлено, що ключовими факторами, які впливають на величину міжелектродного зазору, є напруга запалювального імпульсу та амплітуда розрядного струму: їх зростання сприяє збільшенню зазору та підвищенню ефективності видалення матеріалу. Частота та шпаруватість імпульсів мають менший вплив, зменшуючи зазор при їх збільшенні через скорочення тривалості імпульсів. При ЕАШ

міжелектродний зазор на 74% менший, ніж при АШ, що забезпечує продуктивність обробки на рівні 527–758 мм³/хв; при цьому зростання частоти імпульсів від 22 до 66 кГц зменшує зазор на 26% для обох методів. Об'єм лунки, утвореної одиничним розрядом на алмазоносному шарі, нелінійно залежить від енергії імпульсу (0,01–0,3 Дж) та складу зв'язки: зв'язки з високою електроерозійною стійкістю (наприклад, М50) характеризуються меншими об'ємами лунок, тоді як менш стійкі (МО4, МО13) – більшими. Відстань між зернами визначається частотою імпульсів, шпаруватістю, зернистістю та концентрацією алмазів у крузі: збільшення частоти та шпаруватості зменшує відстань, більша зернистість її збільшує, а вища концентрація – зменшує. ЕАШ сприяє формуванню розвиненої ріжучої поверхні з більшим міжзерновим простором порівняно з АШ, що підвищує ефективність обробки.

5. Процес ЕАШ ЗП характеризується значними термальними ефектами, зумовленими механічною взаємодією та електричними розрядами. Зміна полярності електродів знижує теплонапруженість процесу завдяки зменшенню сил різання, тертя та створенню пульсуючого теплового ефекту, що стабілізує температуру в зоні обробки. Температура оброблюваної поверхні суттєво залежить від розрядного струму (зростання на 8–15% при його збільшенні) та швидкості круга (стабілізація при $V > 25$ м/с). Порівняно з процесом АШ, процес ЕАШ ЗП забезпечує меншу теплову інтенсивність, краще розташування алмазних зерен і знижену ймовірність дефектів. Розроблена математична модель температурних полів (розбіжність становить у порівнянні з експериментом 12–17%) підтверджує ці спостереження та адаптується до різних матеріалів. Для зменшення теплонапруженості рекомендовано знижувати розрядний струм наприкінці процесу, оптимізувати період переключення полярності та враховувати анізотропію теплопровідності матеріалів.

6. Досліджено вплив параметрів процесу ЕАШ ЗП на геометричні характеристики ерозійних лунок (шорсткість поверхні), залишкові напруження в поверхневому шарі та стійкість різальних пластин (експлуатаційні властивості). Встановлено, що амплітуда розрядного струму та період переключення полярності є визначальними факторами, які впливають на об'єм лунок, при цьому їх зростання спричиняє збільшення об'єму за рахунок розширення розрядного каналу. Процес ЕАШ ЗП забезпечує вищі стискаючі залишкові напруження ($\sigma = -3,8$ ГПа) у поверхневому шарі твердого сплаву ВК6 порівняно з процесом АШ ($\sigma = -1,2$ ГПа), що зумовлено переважним силовим фактором. Стійкісні випробування показали, що ЕАШ ЗП підвищує час працездатності різальних пластин на 53% (84 хв. – для процесу ЕАШ ЗП проти 55. хв – для процесу АШ) за критерієм зносу $h_z = 0,4$ мм завдяки вищим стискаючим напруженням та меншій шорсткості поверхні різальної кромки (Ra 0,83 мкм – для процесу ЕАШ ЗП проти $Ra = 2,79$ мкм – для процесу АШ). Отримані результати підтверджують переваги ЕАШ ЗП для покращення зносостійкості та експлуатаційних властивостей оброблених поверхонь.

7. Розроблено топологічну модель поверхні алмазного круга з використанням сингулярного розкладання та методу формувального фільтра, яка показала, що профіль поверхні підпорядковується нормальному закону розподілу і суттєво впливає на процес шліфування, з помилкою моделювання не більше 10%. На основі аналізу експериментальних осцилограм струмів і напруг у міжелектродному зазорі запропоновано T -подібну схему заміщення з помилкою моделювання до 4%. Динамічна модель процесу ЕАШ ЗП, з точністю до 14%, виявила зміщення екстремуму потужності через небажані режими холостого ходу та короткого замикання, а також визначила ключові характеристики, що впливають на продуктивність, сталість процесу та енергоефективність. Дослідження показали, що збільшення шорсткості алмазного круга зменшує екстремальне значення потужності без зміни її положення (половина граничного зазору), тоді як неузгодженість опорів генератора та зазору знижує потужність у зазорі й зміщує екстремум. Для забезпечення максимальної потужності зазор має підтримуватися на рівні половини граничного значення за умови узгодження опорів генератора і навантаження шляхом регулювання періоду зміни полярності. Нарешті, динамічна модель була апроксимована редукованою інерційною моделлю Гаммерштейна з екстремальною характеристикою, що відкриває перспективи для подальших досліджень автоматичних систем керування процесом.

8. На основі проведених досліджень розроблено оптимізаційний алгоритм процесу ЕАШ ЗП, який забезпечує мінімальну собівартість обробки деталей при дотриманні вимог до якості за рахунок оптимального вибору режимів обробки (глибини шліфування, подачі, швидкості різання та електричних параметрів). Алгоритм враховує ключові чинники, такі як стійкість алмазних кругів, штучний час і період перемикавання полярності електродів, що сприяє підвищенню продуктивності та зниженню витрат. Практичне впровадження процесу ЕАШ ЗП на торцекруглошліфувальному верстаті ХШ4–12Н продемонструвало скорочення штучного часу обробки, збільшення періоду стійкості інструменту та зниження витрат на нього, забезпечуючи річний економічний ефект у розмірі 90519 грн. із терміном окупності 0,55 року (для одного верста). Запропонований підхід до оптимізації та оцінки економічної ефективності є універсальним і може бути адаптований для інших технологічних процесів механічної обробки, що підтверджує перспективність ЕАШ ЗП для підвищення економічної ефективності та сталого розвитку машинобудівних підприємств.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукометричній базі даних Scopus

1. Strelchuk, R., Trokhymchuk, S., Sofronova, M., Osypova, T.: Revealing patterns in the wear of profile diamond wheels. Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. 3, 30–37 (2020).

<https://www.scopus.com/pages/publications/85092480480>

Здобувачем встановлено функціональну залежність питомої витрати алмазів від технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару,

котра використовувалася в математичному методі планування і аналізу експериментів.

2. Strelchuk, R. M., & Trokhimchuk, S. M. (2021). Mathematical modeling of the surface roughness of the grinding wheel during straightening. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 53–59.

<https://www.scopus.com/pages/publications/85103770686>

Здобувачем встановлено встановлено закономірності впливу умов електроерозійної правки шліфувального круга на стан його робочої поверхні.

3. Strelchuk, R., & Shelkovyi, O. (2021). Optimization of the Interelectrode Gap in Electrical Discharge Grinding with Changing Electrode Polarity. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 143–152.

<https://www.scopus.com/pages/publications/85110621448>

Здобувачем проведено оптимізацію міжелектродного зазора в процесі електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів.

4. Strelchuk, R., Shelkovyi, O.: Determination of the Distance Between Grains During Electrical Discharge Grinding with Changing Polarity of Electrodes. *Lect. Notes Mech. Eng.* 209–218 (2022).

<https://www.scopus.com/pages/publications/85120636070>

Здобувачем побудовано математичну модель величини відстані між алмазними зернами від електричних режимів процесу та характеристик шліфувального круга.

5. Kupriyanov, O., Hrinchenko, H., Strelchuk, R., Kupriyanov, M.: Ensuring the quality of fuel equipment joints in series production conditions by graded kitting. Presented at the AIP Conference Proceedings (2023).

<https://www.scopus.com/pages/publications/85180355306>

Здобувачем проведено вимірювання фактичних параметрів деталей і використання їх для покращення та оптимізації процесу шліфування.

6. Strelchuk, R., Mittsel, M., Stanciu, A.: X-Ray diffraction study of residual stresses in wc-co induced by polarity-switching electrical discharge grinding. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. 1, 153–159 (2025).

<https://www.scopus.com/pages/publications/105008275721>

Здобувачем досліджено вплив електроерозійного шліфування зі змінною в часі полярністю електродів на залишкові напруження в поверхневих шарах різних матеріалів, зокрема, на цементованих карбідів.

Статті в наукових періодичних виданнях інших держав

7. Strelchuk R. Reducing the energy capacity of diamond spark grinding by application of solid lubricant. / Yu. Gutsalenko, C. Iancu, A. Rudnev, and R. Strelchuk // *Fiability & Durability, Romania*, No. 2(26)/2020, pp. 5–10.

https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2020-

[02/01_Yury%20GUTSALENKO,%20C%20C4%83t%C4%83lin%20](https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2020-02/01_Yury%20GUTSALENKO,%20C%20C4%83t%C4%83lin%20)

[IANCU,%20Alexander%20RUDNEV,%20Roman%20STRELCHUK%20-](https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2020-02/01_Yury%20GUTSALENKO,%20C%20C4%83t%C4%83lin%20IANCU,%20Alexander%20RUDNEV,%20Roman%20STRELCHUK%20-)

[%20REDUCING%20THE%20ENERGY%20CAPACITY%20OF%20DIAMOND%20](https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2020-02/01_Yury%20GUTSALENKO,%20C%20C4%83t%C4%83lin%20IANCU,%20Alexander%20RUDNEV,%20Roman%20STRELCHUK%20-%20REDUCING%20THE%20ENERGY%20CAPACITY%20OF%20DIAMOND%20)

[SPARK%20GRINDING%20BY%20APPLICATION%20OF%20SOLID%20LUBRIC](https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2020-02/01_Yury%20GUTSALENKO,%20C%20C4%83t%C4%83lin%20IANCU,%20Alexander%20RUDNEV,%20Roman%20STRELCHUK%20-%20REDUCING%20THE%20ENERGY%20CAPACITY%20OF%20DIAMOND%20SPARK%20GRINDING%20BY%20APPLICATION%20OF%20SOLID%20LUBRIC)

[ANT.pdf](https://www.utgjiu.ro/rev_mec/mecanica/pdf/2020-02/01_Yury%20GUTSALENKO,%20C%20C4%83t%C4%83lin%20IANCU,%20Alexander%20RUDNEV,%20Roman%20STRELCHUK%20-%20REDUCING%20THE%20ENERGY%20CAPACITY%20OF%20DIAMOND%20SPARK%20GRINDING%20BY%20APPLICATION%20OF%20SOLID%20LUBRICANT.pdf)

Здобувачем запропоновано організацію процесу шліфування з використанням

методики мінімального змащування як альтернативу традиційному струменевому поливу зони обробки мастильно–охолоджувальними технологічними рідинами на водній основі.

8. Strelchuk R. Investigation of the removal of the diamond layer of a wheel during ed grinding with chang–ing polarity of elec–trodes. / Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Engineering Series, Iss. 2/2020 [Based on matters of the Nat. Sc. Conf. with Int. Participation “CONFERENG 2020”, Nov. 20–21,2020]: 45–49.

https://www.utgjiu.ro/rev_ing/pdf/2020–2/06_L.pdf

9. Strelchuk, R., Shelkovyi, O., Gutsalenko, Y., Iancu, C., Subbotina, V., Knyazev, S., Volkov, O.: Research of the dependence of geometric parameters of holes on electroerosive grinding modes with a changing polarity of electrodes. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1235, 012023 (2021).

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757–899X/1235/1/012023>

Здобувачем побудовано математичну модель об’єму ерозійних лунок від електричних режимів процесу електроерозійного алмазного шліфування.

10. Strelchuk R. Experimental study of the effect of polarity of electrodes during electric discharge grinding / R. Strelchuk // Annals of the „Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Romania, Engineering Series, Iss. 2/2022. – pp. 197–201.

https://www.utgjiu.ro/rev_ing/pdf/2022–2/29_Strelchuck.pdf

Публікації у наукових фахових виданнях України

11. Стрельчук Р.М. Повышение эффективности процесса плоского шлифования на основе анализа влияния динамических факторов / Стрельчук Р.М. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії – Харків: НТУ «ХПІ».– 2014.–№ 5 (1048). – С. 94–99.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI–Press/12205>

12. Стрельчук Р.М. Математическое моделирование тепловыделения в контактной зоне заготовки и шлифовального круга с учетом его изнашивания / Стрельчук Р.М. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. №37, 2015. – С. 71–76.

http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/reliability_instrument/archieve/%E2%84%9637.pdf

13. Стрельчук Р.М. Чувствительность эксплуатационных свойств шлифовального круга к изменению параметров его стандартной характеристики / Стрельчук Р.М. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.–техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПІ», 2015. – Вып. 85. – С. 263–268.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI–Press/22004>

14. Стрельчук Р.М. Математическая модель определения шероховатости поверхности при алмазном шлифовании / Стрельчук Р.М. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун–т "ХАИ", 2015. – Вып. 68. – С. 48–55.

<https://nti.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/OIKIT/2015/OIKIT68/p48–55.pdf>

15. Стрельчук Р.М. Физическое моделирование напряженно–деформированного состояния твердосплавных инструментов из наноразмерных

зерен монокарбида вольфрама при шлифовании / Стрельчук Р.М. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.–техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2016. – Вып. 86. – С. 160–169.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/24182>

16. Стрельчук Р.М. Повышение эффективности финишной механической обработки деталей машин / Стрельчук Р.М. // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2016. – Вып. 72 – С.97–104.

<https://nti.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/OIKIT/2016/OIKIT72/p97-104.pdf>

17. Стрельчук Р.М. Анализ параметров обработки при плоском шлифовании / Стрельчук Р.М. // Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.20. – Харків, УПА, 2017. – С.48–54.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/213>

18. Стрельчук Р.М. Анализ себестоимости механической обработки и экономическое обоснование технологических процессов шлифования / Стрельчук Р.М.// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, Харків, НАУ “ХАИ”, 2017. – Вып. 76 – С.79–84.

<https://nti.khai.edu/csp/nauchportal/Arhiv/OIKIT/2017/OIKIT76/p79-85.pdf>

19. Стрельчук Р.М. Исследование съема алмазоносного слоя круга под воздействием единичных электрических разрядов / Стрельчук Р.М. // Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.22. – Харків, УПА, 2018. – С.41–48.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/142>

20. Стрельчук Р.М. Распределение теплового потока при электроэрозионном алмазном шлифовании / Стрельчук Р.М // Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.23. – Харків, УПА, 2019. – С.41–48.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/172/110>

21. Стрельчук Р.М. Математичне моделювання робочої поверхні круга в умовах електроерозійного алмазного шліфування / Стрельчук Р.М, Шелковий О.М.// Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.24. – Харків, УПА, 2019. – С.33–39.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/193/123>

Здобувачем проведено аналіз і розрахунок зерен, котрі утримуються на робочій поверхні круга при найменшій глибині закладення в зв'язі в умовах електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю.

22. Стрельчук Р.М. Виявлення закономірностей електроерозійного алмазного шліфування на основі температурного фактору / Стрельчук Р.М, Шелковий О.М.// Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.25. – Харків, УПА, 2020. – С.89–98.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/233/166>

Здобувачем теоретично визначено основні умови зменшення температури шліфування.

23. Стрельчук Р.М. Дослідження зносу кругів при електроерозійному алмазному шліфуванні зі змінною полярністю електродів в зоні різання / Стрельчук Р.М // Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.26. – Харків,

УПА, 2020. – С.33–44.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/253/179>

24. Strelchuk R. EDM gap modeling at electrical discharge grinding with change of electric polarity / R. Strelchuk, O. Shelkovi // Резание и инструменты в технологических системах = Cutting & tools in technological systems : междунар. науч.–техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2020. – Вып. 93. – С. 95–102. – DOI: 10.20998/2078–7405.2020.93.11.

<http://rits.khpi.edu.ua/article/view/2078–7405.2020.93.11>

Здобувачем проведено експериментальне дослідження та моделювання в графічному середовищі Simulink межелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів важкооброблюваних матеріалів.

25. Стрельчук Р.М. Моделювання взаємодії інструменту з деталлю при електроерозійному алмазному шліфуванні зі змінною полярністю електродів в зоні різання / Стрельчук Р.М // Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.27. – Харків, УПА, 2021. – С.50–57.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/265/190>

26. Strelchuk R. Surface roughness modeling in variable polarity electric discharge grinding / R. Strelchuk // Cutting & Tools in Technological System: Междунар. науч.–техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2021. – Вып. 94. – С. 77–84. – DOI: 10.20998/2078–7405.2021.94.09.

<http://rits.khpi.edu.ua/article/view/233862>

27. Стрельчук Р.М. Математичне моделювання стану інструменту при електроерозійному алмазному шліфуванні / Стрельчук Р.М.// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, Харків, НАУ «ХАІ», 2021. – Вып. 92 – С.113–122.

<https://doi.org/10.32620/oikit.2021.92.10>

28. Стрельчук Р.М. Формування поверхні в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р.М // Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.28. – Харків, УПА, 2021. – С.26–36.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/276/200>

29. Strelchuk R. Research of the cutting mechanism at electrical discharge grinding / R. Strelchuk, O. Shelkovi // Cutting & Tools in Technological System: Междунар. науч.–техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2021. – Вып. 95. – С. 37–44. – DOI: 10.20998/2078–7405.2021.94.09.

<http://rits.khpi.edu.ua/article/view/248628/245929>

Здобувачем досліджено механізм різання в процесі електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів.

30. Стрельчук Р.М. Покращення екологічності процесу алмазного шліфування при виготовленні осердь куль бронебійних патронів / О. В. Титаренко, О. В. Руднев, Р. М. Стрельчук // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. 2021. Вип. 2 (38). – С.65–74.

<http://znp.nangu.edu.ua/article/view/252139/249477>

Здобувачем досліджено ефективність використання стеарину та себацінової кислоти як твердих мастильних матеріалів для шліфування зі

швидкістю від 15 м/с до 35 м/с.

31. Стрельчук Р.М. Моделювання міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні зі зміною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук, О.М. Шелковий // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Techniques in a machine industry : col. of sci. papers. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 2 (6) – С. 88–95. DOI: 10.20998/2079–004X.2022.2(6).12.

<http://tm.khpi.edu.ua/article/view/265271>

Здобувачем проведено оптимізацію міжелектродного зазора в процесі електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів.

32. Стрельчук Р.М. Аналіз якості обробки в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р.М // Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.29. – Харків, УПА, 2022. – С.5–14.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/282/206>

33. Стрельчук Р.М. Аналіз формоутворення поверхні при електроерозійному алмазному шліфуванні зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р.М.// Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, Харків, НАУ "ХАІ", 2022. – Вып. 95 – С.45–55. – DOI:10.32620/oikit.2022.95.04.

<https://nti.khai.edu/ojs/index.php/oikit/article/view/1833/1921>

34. Стрельчук Р.М. Аналіз сил різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів / Стрельчук Р.М // Машинобудування. Збірник наукових праць. Вип.31. – Харків, УПА, 2023. – С.12–20. – DOI:10.32820/2079–1747–2023–31–12–20.

<https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/301>

35. Стрельчук Р. М. Регулювання тепловими процесами під час електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Techniques in a machine industry : col. of sci. papers. – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – № 2 (10). – С. 41–49.

<http://tm.khpi.edu.ua/article/view/318965>

Патенти

36. Пат. UA 131894 U УКРАЇНА, МПК В24В 1/00 / Р.М. Стрельчук, М.Д. Узунян (UA); Укр. інж. пед. акад. Спосіб електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів – № u201806851; Заявл. 18.06.2018; Опубл. 11.02.2019. Бюл. №3.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1088975/>

Здобувачем запропоновано ідею створення винаходу.

37. Пат. UA 138656 U УКРАЇНА, МПК В24В 1/00 / Р.М. Стрельчук (UA); Укр. інж. пед. акад. Пристрій для здійснення способу електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів – № u201904791; Заявл. 06.05.2019; Опубл. 10.12.2019. Бюл. № 23.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1396268/>

38. Пат. UA 138657 U УКРАЇНА, МПК В24В 1/00 / Р.М. Стрельчук (UA); Укр. інж. пед. акад. Мاستильно–охолоджуючий технологічний засіб для електроерозійного алмазного шліфування – № u201904794 Заявл. 06.05.2019; Опубл. 10.12.2019. Бюл. № 23.

<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1396029/>

Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

39. Стрельчук Р.М. Технологические возможности алмазно–искрового шлифования / С.А. Дитиненко, А.Г. Крюк, Р.М. Стрельчук // Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии: труды IV научно–технической конференции, 7–9 ноября 2012, г. Харьков. – Х.: НТУ “ХПИ”, 2012. – С. 55–59.

<http://www.repository.hneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/11513>

Здобувачем досліджено технологію електроерозійного шліфування відновлених наплавленням моделей валків прокатних станів, запропоновано заміну алмазного круга на зв'язці M2–01 таким самим, але на менш зносостійкий зв'язці M1–01.

40. Стрельчук Р.М. Пристрій оптимізації процесу правки шліфувального круга на металевій зв'язці / Р.М. Стрельчук // Физические и компьютерные технологии: Тр. 20–й междунар. науч.–практ. конф., 23–24 декабря 2014 г. – Харьков : ГП ХМЗ «ФЭД». – С. 121–124.

<https://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/13371>

41. Стрельчук Р.М. Математическое моделирование тепловыделения в контактной зоне заготовки и шлифовального круга с учетом его изнашивания / Р.М. Стрельчук // Високі технології : тенденції розвитку. Матеріали ХХІІІ міжнародного науково–технічного семінару, 7–12 вересня 2015 р., м. Одеса – Х.: НТУ «ХП», 2015. – С. 153.

https://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2015/08/IP-2015_Matters.pdf

42. Стрельчук Р.М. Управление поверхностным слоем деталей при абразивной обработке / Р.М. Стрельчук // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей ХХІV міжнародної науково–практичної конференції MicroCAD–2016, 16–19 травня 2016 р. – Харків: НТУ «ХП». – С. 91.

43. Стрельчук Р.М. Особенности алмазно–искрового шлифования твердых сплавов с минимальным применением сухих углеводородных смазок / Р.М. Стрельчук // Физические и компьютерные технологии: Тр. 22–й междунар. науч.–практ. конф., 7–9 декабря 2016 г. – Харьков : ГП ХМЗ «ФЭД». – С. 222–225.

44. Стрельчук Р.М. Влияние диффузии на образование засаленного слоя шлифовального инструмента / Р.М. Стрельчук // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо– и энергосбережении: материалы междунар. науч.–техн. конф., 26–29 сент. 2018 г. – Одесса: ОНПУ, 2018. – С 183–184.

<http://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/21474/1Новиков%20Ф.%20В.%20С%20Яровой%20Ю.%20В.%20%20Новые%20и%20нетрадиционные%20технологии%20в%20ресурсо–%20и%20энергосбережении.pdf>

45. Стрельчук Р.М. Размерная стойкость алмазно–абразивных инструментов

и пути ее повышения / Р.М. Стрельчук // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо– и энергосбережении: материалы междунар. науч.–техн. конф., 16–18 мая. 2019 – Одесса: ОНПУ, 2019. – С 171–173.

<https://atmu.net.ua/downloads/archive/N19.pdf>

46. Стрельчук Р.М. Пристрій для здійснення електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів / Р.М. Стрельчук // Високі технології : тенденції розвитку. Матеріали XXVIII міжнародного науково–технічного семінару, 3–5 листопада 2020 р. – Х.: НТУ «ХПІ», 2020. – С 162–163.

https://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/IP-2020_Matters_TextOnline.pdf

47. Стрельчук Р.М. Разработка технологии электроэрозионного алмазного шлифования с изменяющейся полярностью электродов / Р.М. Стрельчук, А.Н. Шелковой // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо– и энергосбережении: материалы междунар. науч.–техн. конф., 23–25 сент.2020 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2020. – С 163–166.

https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/26780/1/Конференция_Одесса_2020.pdf

Здобувачем запропоновано технологію електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів, котора полягає в тому, що робочий зазор між струмопровідними поверхнями – інструменту і заготовки залишається в процесі обробки практично постійним.

48. Стрельчук Р. М. Розробка технології електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 29–ї міжнар. наук.–практ. конф. MicroCAD–2021, [18–20 травня 2021 р.] : у 5 ч. Ч. 1 / ред. Є. І. Сокол. – Харків : Планета–Прінт, 2021. – С. 120.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/54327>

49. Стрельчук Р.М. Дослідження зносу зв'язки кругів при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів / О.М. Шелковий, Р. М. Стрельчук // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021) : матеріали тез доповідей XI Міжнародної науково–практичної конференції (м. Чернігів, 26–27 травня 2021 р.) – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – Т. 1. – С. 163.

<https://drive.google.com/file/d/1DJQ7obOsqiuP7nBVzk7Kjp1xZ0joHklO/view>

Здобувачем досліджено особливості формування лунок на поверхні зв'язки шліфувальних кругів.

50. Стрельчук Р.М. Исследование влияния технологических режимов электроэрозионного алмазного шлифования на удельный расход круга /О.М.Шелковий, Р.М. Стрельчук // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково–технічної конференції (м. Краматорськ, 01 – 04 червня 2021 року) – Краматорськ: ДДМА, 2021. – С. 127–128.

http://www.dgma.donetsk.ua/docs/nauka/vaz_mas/Матеріали%20Важке%20машинобудування%202021.pdf

51. Стрельчук Р.М. Моделювання міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні з змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук // Матеріали тридцять першої міжнародної конференції «Нові технології в машинобудуванні (м. Харків, 3–6 вересня 2021 р.) – Харків : НАУ «ХАІ», 2021. – С. 30–31.

52. Стрельчук Р.М. Моделирование шероховатости поверхности при электроэрозионном шлифовании с изменяющейся полярностью электродов / Р.М. Стрельчук // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо– и энергосбережении: материалы междунар. науч.–техн. конф., 22–24 сент.2021 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2021. – С 177–179.

<http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/26754>

53. Стрельчук Р.М. Моделювання шорсткості поверхні при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів / Р.М. Стрельчук // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2022) : матеріали тез доповідей XII Міжнародної науково–практичної конференції (м. Чернігів, 26–27 травня 2022 р.) – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – Т. 1. – С. 100–101.

<https://conference-chernihiv-polytechnik.com/wpcontent/uploads/2023/03/Tezy-2022-Part-1-100-101.pdf>

54. Стрельчук Р.М. Дослідження механізму різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук // Матеріали тридцять другої міжнародної конференції «Нові технології в машинобудуванні (м. Харків, 3–6 вересня 2022 р.) – Харків : НАУ «ХАІ», 2022. – С. 65–66.

[https://khai.edu/assets/documents/3205/Матеріали%20конференції%20Новітехнології%20у%20машинобудуванні_2022%20\(1\).pdf](https://khai.edu/assets/documents/3205/Матеріали%20конференції%20Новітехнології%20у%20машинобудуванні_2022%20(1).pdf)

55. Стрельчук Р.М. Дослідження залишкових напруг після електроерозійного шліфування / Р.М. Стрельчук // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково–технічної конференції (м. Краматорськ–Тернопіль, 01 – 03 вересня 2022 року) – Краматорськ–Тернопіль: ДДМА, 2022. – С. 188–189.

http://www.dgma.donetsk.ua/docs/наука/vaz_mas_22_23/Матеріали_XX_Міжнародної_науково_технічної_конференції_2022.pdf

56. Стрельчук Р. М. Виявлення закономірностей при зміні полярності електродів в умовах електроерозійного шліфування / Р. М. Стрельчук // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 31–ї Міжнар. наук.–практ. конф. MicroCAD–2023, 17–20 травня 2023 р. / ред. Є. І. Сокол ; уклад. Г. В. Лісачук. – Харків : НТУ "ХПІ", 2023. – С. 209.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/68797>

57. Стрельчук Р.М. Моделювання міжелектродного зазору при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів / Р.М. Стрельчук // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково–практичної конференції (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.) – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – Т. 1. – С. 151–152.

<https://ir.stu.cn.ua/handle/123456789/27983>

58. Стрельчук Р.М. Аналіз сил різання при електроерозійному шліфуванні зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук // Матеріали тридцять третьої всеукраїнської конференції «Нові технології в машинобудуванні». – Харків НАУ «ХАІ», 2023. – С.53–54.

https://khai.edu/assets/documents/3205/Матеріали%20конференції%20Нові%20Технології%20у%20машинобудуванні_2023.pdf

59. Стрельчук Р.М. Дослідження зносу кругів при електроерозійному алмазному шліфуванні зі змінною полярністю електродів в зоні різання / Р. М. Стрельчук // Фізичне виховання, безпека життєдіяльності і сучасні технології виробництва : матеріали I Всеукраїнської науково–практичної конференції, 21 березня 2024 р. : тези допов. – Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2024. – С. 396–400.

<http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/32361>

60. Стрельчук Р. М. Регулювання тепловими процесами під час електроерозійного шліфування при зміні полярності електродів / Р. М. Стрельчук // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 32-ї міжнар. наук.–практ. конф. MicroCAD–2024, [22–25 травня 2024 р.] / ред. Є. І. Сокол. – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – С. 221.

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/87242>

61. Стрельчук Р.М. Порівняльний аналіз теплонапруженості процесів електроерозійного шліфування / Р. М. Стрельчук // Матеріали тридцять четвертої всеукраїнської конференції «Нові технології в машинобудуванні». – Харків НАУ «ХАІ», 2024. – С.55–56.

https://khai.edu/assets/documents/3205/34_Матеріали_конференції_Нові_технології_у_машинобудуванні_2024.pdf

АНОТАЦІЇ

Стрельчук Р.М. Наукові основи електроерозійного алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів зі змінною полярністю електродів. ° – °Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – Харків, 2025°р.

Дисертаційне дослідження присвячене розробці та теоретичному обґрунтуванню методу електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів для підвищення ефективності фінішної обробки важкооброблюваних матеріалів. Основна проблема полягає у технічній суперечності між необхідністю міцного утримання алмазних зерен у металевій зв'язці та забезпеченням самозаточування інструменту. Дослідження ключових аспектів алмазного шліфування виявило недоліки існуючих методів, зокрема алмазно-іскрового шліфування, яке не забезпечує стабільність ріжучих властивостей і підвищує питому витрату алмазів на 50°–70%.

Розроблено комплексну теоретичну базу процесу електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів, що поєднують мікрорізання, електроерозійний вплив та термічні явища для забезпечення синергетичного ефекту. Створено математичну модель сил різання (P_z і P_y) з точністю розрахунків 75° – $85^\circ\%$ та модель зносу зерен з розбіжністю 7° – $15^\circ\%$. Розроблено топологічну модель поверхні алмазного круга з помилкою моделювання до $10^\circ\%$, T -подібну схему заміщення міжелектродного зазору з помилкою до $4^\circ\%$ та динамічну модель процесу з помилкою до $14^\circ\%$. Розроблено та експериментально обґрунтовано метод електроерозійного алмазного шліфування зі змінною полярністю електродів, який забезпечує підтримання ріжучої здатності алмазних кругів шляхом періодичної зміни полярності в зоні різання. Створено та запатентовано відповідний пристрій. Порівняльний аналіз показав переваги змінної полярності: найвища продуктивність обробки $Q^\circ = 962^\circ \text{мм}^3/\text{хв}$, мінімальний знос круга $q^\circ = 4,47^\circ \text{мм}^3/\text{хв}$, високий період стійкості $T = 360^\circ \text{хв}$, низькі сили різання ($P_y = 125^\circ \text{Н}$, $P_z = 350^\circ \text{Н}$), менший коефіцієнт шліфування $K_{ш} = 0,36$ та низька шорсткість поверхні Ra $0,25$ мкм. При обробці швидкорізальної сталі Р6М5 та твердого сплаву ВК6 запропонований метод підвищує продуктивність на 60° – $72^\circ\%$, знижує питому витрату круга на 65 – $85^\circ\%$ та покращує шорсткість поверхні на 50° – $54^\circ\%$ порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням. Встановлено, що міжелектродний зазор при електроерозійному алмазному шліфуванні зі змінною полярністю на $74^\circ\%$ менший, ніж при алмазно-іскровому шліфуванні, що підвищує продуктивність обробки ($Q^\circ = 527^\circ$ – $758^\circ \text{мм}^3/\text{хв}$). Досліджено теплові процеси, встановивши, що змінна полярність знижує теплонапруженість за рахунок зменшення сил різання та ефекту переривчастості теплових імпульсів. Математична модель температурних полів підтверджена з розбіжністю 12° – $17^\circ\%$. Процес забезпечує вищі стискаючі залишкові напруження ($\sigma^\circ = -3,8^\circ \text{ГПа}$) порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням ($\sigma^\circ = -1,2^\circ \text{ГПа}$), підвищуючи зносостійкість різальних пластин на $53^\circ\%$. Розроблено оптимізаційний алгоритм для визначення режимів обробки, що забезпечують мінімальну собівартість при дотриманні вимог до якості. Встановлено, що для максимальної потужності міжелектродний зазор має становити половину граничного значення за умови узгодження опорів. На прикладі торцекруглошліфувального верстата ХШ4–12Н доведено ефективність методу з річним економічним ефектом 90519 грн та терміном окупності 0,55 року для одного верстата.

Ключові слова: процес електроерозійного шліфування, змінна полярність електродів, важкооброблювані матеріали, продуктивність обробки, знос інструменту, якість поверхневого шару.

Strelchuk R.M. Scientific bases of electroerosion diamond grinding of hard-to-machine materials with variable polarity of electrodes.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in speciality 05.03.01 – machining processes, machine tools and instruments – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”. – Kharkiv, 2025.

The process provides higher compressive residual stresses ($\sigma^{\circ} = -3.8^{\circ}$ GPa) compared to diamond spark grinding ($\sigma^{\circ} = -1.2^{\circ}$ GPa), increasing the wear resistance of the cutting inserts by 53%. An optimisation algorithm was developed to determine the machining modes that ensure minimum cost while meeting quality requirements. It was found that for maximum power, the inter-electrode gap should be half the limit value, provided that the resistances are matched. On the example of the KhSh4-12N face grinding machine, the effectiveness of the method with an annual economic effect of UAH 90519 and a payback period of 0.55 years for one machine is proved. This dissertation study is devoted to the development and theoretical substantiation of the method of electrical discharge diamond grinding with variable electrode polarity to improve the efficiency of finishing hard-to-machine materials. The main problem lies in the technical contradiction between the need for a strong hold of diamond grains in the metal bond and ensuring self-sharpening of the tool. The study of key aspects of diamond grinding revealed the shortcomings of existing methods, in particular diamond spark grinding, which does not ensure the stability of cutting properties and increases the specific consumption of diamonds by 50%–70%.

A comprehensive theoretical framework for the process of electro-erosion diamond grinding with variable electrode polarity has been developed, combining microcutting, electro-erosion impact and thermal phenomena to ensure a synergistic effect. A mathematical model of cutting forces (P_z and P_y) with a calculation accuracy of 75%–85% and a model of grain wear with a discrepancy of 7%–15% were created. A topological model of the diamond wheel surface was developed with a modelling error of up to 10%, a T -shaped scheme for replacing the interelectrode gap with an error of up to 4%, and a dynamic process model with an error of up to 14%. A method of electrical discharge diamond grinding with variable electrode polarity was developed and experimentally substantiated, which ensures the maintenance of the cutting ability of diamond wheels by periodically changing the polarity in the cutting zone. A corresponding device was created and patented. Comparative analysis showed the advantages of reversible polarity: the highest machining performance $Q^{\circ} = 962^{\circ}$ mm³/min, minimum wear of the wheel $q^{\circ} = 4.47^{\circ}$ mm³/min, high stability period $T = 360^{\circ}$ min, low cutting forces ($P_y = 125^{\circ}$ N, $P_z = 350^{\circ}$ N), lower grinding coefficient $K_{sh} = 0.36$ and low surface roughness $Ra^{\circ} = 0.25^{\circ}$ μ m. When machining high-speed steel R6M5 and hard alloy VK6, the proposed method increases productivity by 60%–72%, reduces specific wheel consumption by 65%–85%, and improves surface roughness by 50%–54% compared to diamond spark grinding. It was found that the interelectrode gap during alternating polarity diamond EDM grinding is 74% smaller than during diamond spark grinding, which increases machining performance ($Q^{\circ} = 527^{\circ}$ – 758° mm³/min). The thermal processes were studied and it was found that the reversed polarity reduces thermal stress by reducing cutting forces and the effect of intermittent thermal pulses. The mathematical model of temperature fields was confirmed with a discrepancy of 12%–17%.

Keywords: electrical discharge grinding process, alternating electrode polarity, hard-to-machine materials, machining performance, tool wear, surface layer quality.

