

ВІДГУК

офіційного опонента щодо дисертаційної роботи
Стрельчука Романа Михайловича “Наукові основи електроерозійного алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів зі змінною полярністю електродів”, подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – *процеси механічної обробки, верстати та інструменти*

Дисертація, що була надана до опонування, складається з вступу, восьми розділів з висновками наприкінці кожного розділу, загальних висновків, списку використаних джерел (з 320 найменувань) та додатків на 80 стор. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 420 стор. (без списку використаних джерел) і містить 187 рисунків та 24 таблиці.

1. Актуальність роботи та її відповідність планам наукових досліджень.

Сучасне машинобудування характеризується постійним зростанням вимог до технічного рівня продукції, що виражається у необхідності забезпечення високої надійності, довговічності та геометричної точності виробів. Досягнення цих показників нерозривно пов'язане із застосуванням матеріалів підвищеної міцності та зносостійкості, таких як тверді сплави, високолеговані та швидкорізальні сталі, титанові сплави, які належать до категорії важкооброблюваних матеріалів.

Традиційні методи механічної обробки виявляються малоефективними при роботі з цими матеріалами через наявність у їхній структурі надтвердих карбідних включень, що призводить до інтенсивного зношування ріжучого інструменту та погіршення якості обробленої поверхні. Шліфування, як один з основних фінішних процесів обробки, забезпечує високу продуктивність і якість поверхні, проте потребує суттєвого удосконалення для ефективної обробки важкооброблюваних матеріалів.

Використання алмазних шліфувальних кругів дозволяє частково розв'язати цю проблему завдяки унікальним властивостям алмазу, твердість якого в 2,8–5 разів перевищує твердість традиційних абразивних матеріалів на основі карбиду кремнію та електрокорунду. Однак ефективність алмазного шліфування значною мірою залежить від стабільності ріжучих властивостей робочої поверхні круга, що вимагає розробки ефективних методів керування цими властивостями.

Аналіз сучасних досліджень показує, що існуючі підходи до управління ріжучими властивостями круга, включаючи електроалмазне та електроерозійне шліфування, базуються на однозначних електрофізичних процесах зі стабільною полярністю електродів в зоні різання. Такі процеси не забезпечують

оптимального співвідношення якісних та кількісних показників обробки при одночасному зниженні питомої витрати інструменту та енерговитрат роцесу.

Тому актуальною є розробка нового комбінованого процесу електроерозійного шліфування з періодичною зміною полярності електродів, що дозволить ефективно керувати станом як робочої поверхні шліфувального круга, так і оброблюваної деталі. Такий підхід має потенціал для досягнення високих технологічних показників при зниженні витратних характеристик процесу, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності машинобудівної продукції на сучасному ринку.

Важливість такого напрямку підтверджує і те, що робота виконувалася у рамках робіт держбюджетної тематики 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 нановуглецевовмісних структур на поверхні металів короткоімпульсними лазерними, мікрохвильовими і плазмовими методами» (ДР № 0124U000481, 2024–2026 рр.), виконаних на кафедрі "Інтегровані технології машинобудування" НТУ "ХПІ", у яких отримали подальший розвиток теоретичні та експериментальні обґрунтування технологічних закономірностей процесу електроерозійної алмазно-абразивної обробки високоміцних композиційних матеріалів. Тобто дана робота є актуальною та важливою.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність.

Основа наукових тверджень, представлених у дослідженні, спирається на визнані принципи та методології з різних галузей науки та техніки. До них належать теоретичні положення різання матеріалів, принципи керування технічними системами, теорії матеріалознавства, основи механіки деформованих тіл, закономірності теплових процесів, методи математичної оптимізації та підходи до техніко-економічного оцінювання алмазно-абразивних технологій. Надійність отриманих висновків підтверджується логічністю прийнятих припущень, правильним застосуванням математичних методів, результатами практичних експериментів та фактичними даними про впровадження розробок.

Вступна частина містить переконливе обґрунтування важливості обраної тематики, чітко визначає основну мету дослідження, об'єкт і предмет вивчення, а також конкретні завдання, які вирішує дослідник. Представлено інноваційні аспекти роботи та її прикладну цінність, надано інформацію про наукове

обговорення результатів, публікації та логічну побудову дисертації. Особливу увагу приділено персональному вкладу автора в отриманні результати.

Перший розділ представляє ґрунтовний історичний аналіз застосування алмазного інструмента при обробці сучасних композитних матеріалів. Аналіз наукових праць, присвячених керуванню різальними характеристиками шліфувального круга, показав, що найбільш повні рішення цих питань знайшли відображення у роботах провідних дослідників, таких як А.І. Грабченко, В.Д. Дорофєєв, П.І. Ящерицин, а також зарубіжних науковців Koshy P., Yadava V. та інших, які зосереджувались на алмазному шліфуванні важкооброблюваних матеріалів. Фундаментальною основою керування різальними властивостями робочої поверхні при електроалмазному шліфуванні є принцип збалансованості між інтенсивністю примусового видалення зв'язувального матеріалу та розмірним зносом працюючих зерен у режимі руйнування. Це забезпечує підтримання оптимальної висоти виступання зерен над зв'язкою під час процесу шліфування.

Другий розділ розкриває теоретичні основи фізичних явищ при електроерозійному алмазному шліфуванні із змінною полярністю електродів (ЕАШ ЗП). Цей новий метод поєднує механічне мікрорізання алмазними зернами з електроерозійним впливом електричних розрядів, що спрямовано на підвищення ефективності обробки та працездатності інструменту. Дослідження концентрується на зоні різання як на складній інтегрованій системі, де одночасно взаємодіють механічні, електрофізичні та термічні процеси. Особливу увагу приділено впливу параметрів електричних розрядів і зміни полярності на формування різального рельєфу інструменту та продуктивність обробки. Ключовою перевагою періодичної зміни полярності є можливість регулювання інтенсивності правки круга: при зворотній полярності відбувається більш інтенсивне видалення зв'язувального матеріалу, а при прямій полярності цей процес відбувається менш активно. Це надає можливість гнучко контролювати стан робочої поверхні круга відповідно до вимог якості обробки деталі.

Третій розділ описує створення нового процесу ЕАШ ЗП, метою якого є підвищення ефективності обробки матеріалів. Введення електричної енергії в зону різання значно впливає на основні технологічні показники: продуктивність обробки, знос інструменту та якість поверхні. Для спрощення експериментальних досліджень запропоновано використання джерела постійного струму замість складних генераторів імпульсів, що дозволяє контролювати лише основні параметри: напругу, струм та полярність, зменшуючи кількість змінних факторів і підвищуючи достовірність результатів. Переваги змінної полярності пояснюються комбінованим впливом ерозійних процесів та мікрорізання. Періодична зміна напрямку електронних та іонних потоків у контактній зоні сприяє рівномірному розподілу енергії, що зменшує

локальний перегрів і знос круга.

Четвертий розділ присвячений експериментальному вивченню стану робочої поверхні алмазного круга та величини міжелектродного зазору при ЕАШ ЗП. Встановлено, що напруга запалювального імпульсу та амплітуда розрядного струму є головними факторами, що впливають на величину міжелектродного зазору. Важливим результатом є встановлення того факту, що міжелектродний зазор при ЕАШ ЗП на 74% менший порівняно з алмазно-іскровим шліфуванням з постійною полярністю, що суттєво підвищує продуктивність обробки.

П'ятий розділ досліджує теплові явища під час ЕАШ ЗП порівняно з традиційним алмазно-іскровим шліфуванням. Для аналізу просторово-часового розподілу температурних полів використано метод скінченних елементів з моделюванням у програмному комплексі ANSYS Workbench 17.2. Результати показали, що локалізоване нагрівання призводить до утворення залишкових напружень і дефектів поверхні. Порівняння теоретичних і експериментальних даних показало розбіжність у межах 12–17%, що свідчить про достатню точність розробленої моделі.

Шостий розділ містить комплексне дослідження якості поверхні твердого сплаву ВК6 після ЕАШ ЗП. Результати свідчать про переваги цього методу над традиційним алмазно-іскровим шліфуванням у формуванні якісної поверхні та підвищенні зносостійкості інструменту.

Сьомий розділ аналізує динамічні характеристики процесу ЕАШ ЗП та розробляє математичні моделі для підвищення ефективності управління. Запропоновано методику створення трьох типів математичних моделей: моделі зовнішніх збурень, електричної моделі міжелектродного зазору та електромеханічної моделі процесу.

Восьмий розділ представляє оптимізаційний алгоритм для визначення режимів ЕАШ ЗП, що забезпечують мінімальну собівартість обробки при дотриманні вимог до якості. На практичному прикладі показано річний економічний ефект на одному верстаті у 90519 грн з терміном окупності 0,55 року.

Наукові розробки знайшли практичне застосування у виробництві Акціонерного товариства "Українські енергетичні машини" та Акціонерного товариства "FED". Результати також використовуються в навчальному процесі провідних технічних закладів освіти України при підготовці фахівців машинобудівних спеціальностей.

3. Наукова новизна роботи на погляд опонента полягає у наступному:

1. Вперше доведено, що періодична зміна полярності електродів може взаємовиключно впливати на теплонапруженість процесу, збільшуючи її, внаслідок появи додаткових теплових імпульсів від електричних розрядів, та

знижуючи її, внаслідок зменшення сили різання та тертя, завдяки формуванню розвинутого рельєфу ріжучої поверхні алмазного інструменту, що дає можливість віднайти умови зниження загальної теплонапруженості процесу порівняно зі шліфуванням з постійної полярністю.

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

3. Одержали подальший розвиток і поліпшення комплекс математичних моделей, які описують 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'язуюче алмазного інструмента;

– динамічна модель процесу електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів, яка апроксимована нелінійною моделлю Гаммерштейна, що забезпечило стійкість автоматичного керування і виявлення 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, що дозволяє підвищити точність керування процесом.

4. Практична значимість отриманих результатів.

1. Запропоновано нові технічні рішення щодо виконання наступних задач: комплексного 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.

2. Розроблені математичні моделі міжелектродного зазору, відстань між зернами та параметрів ерозійних лунок дають змогу оптимізувати електричні режими та характеристики алмазного інструменту, 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.

3. 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.

4. Розробки захищені трьома патентами України на корисну модель (Пат. UA 131894 U УКРАЇНА, Пат. UA 138656 U УКРАЇНА, Пат. UA 138657 U УКРАЇНА)

5. Розроблені практичні рекомендації щодо реалізації одержаних результатів впроваджено 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)»

5. Повнота викладення основних результатів роботи.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 61 науковій праці, з них: 6 статей, що входять до міжнародної бази даних Scopus, 25 статей у фахових виданнях України, 4 у закордонних періодичних наукових журналах, 23 тез доповідей на наукових конференціях, отримано 3 патенти України на винахід. Визначено особистий внесок здобувача в роботах, надрукованих у співавторстві. Опубліковані роботи досить повно відбивають основні положення дисертації і не суперечать її головним висновкам. Участь автора у 23 Міжнародних і українських науково-технічних конференціях і семінарах є достатньою для апробації роботи.

6. Оцінка змісту дисертації та її завершеність в цілому.

Дисертація представляє завершену наукову роботу, яка має внутрішню єдність, сукупність наукових теоретичних положень і експериментальних результатів, що свідчать про суттєвий індивідуальний внесок здобувача в науку.

7. Зауваження по змісту і оформленню дисертації.

1. У підрозділі 4.1 автор обирає чотири фактори (U, I, f, q) для побудови математичної моделі граничного міжелектродного зазору, однак відсутнє достатнє теоретичне обґрунтування цього вибору. Не розглядається вплив інших важливих параметрів, таких як склад робочого середовища, швидкість різання, тип зв'язки круга, які також можуть істотно впливати на величину міжелектродного зазору.

2. У підрозділі 4.2 при дослідженні впливу одиничних електричних розрядів автор згадує про проведення статистичної обробки (50 лунок для кожної енергії імпульсів), але не наводить детальної інформації про розподіл результатів, довірчі інтервали, оцінку похибок вимірювань. Відсутні дані про відтворюваність експериментів та статистичну значущість отриманих результатів.

3. Хоча автор наводить експериментальні результати та математичні моделі у підрозділі 4.3, фізична інтерпретація отриманих закономірностей є поверхневою. Зокрема, не розкрито механізм впливу зміни полярності електродів на формування робочої поверхні круга, недостатньо пояснено причини нелінійної залежності об'єму лунки від енергії імпульсів, не обґрунтовано фізичні процеси, що відбуваються при різних електричних режимах.

4. Недостатнє обґрунтування вибору методу скінченних елементів (МСЕ). На сторінці 235 розділу зазначено, що для моделювання теплонапруженості використано метод скінченних елементів (МСЕ), який описано як "ефективний чисельний метод". Проте не надано порівняння з іншими методами (наприклад, аналітичними чи методом скінченних різниць) і не пояснено, чому саме МСЕ був обраний для цієї задачі. Це може викликати сумніви у читачів щодо доцільності вибору методу та його переваг у контексті дослідження. У тексті (наприклад, на сторінці 243) стверджується, що розроблена математична модель "може бути адаптована для інших матеріалів", але не вказано конкретних припущень чи обмежень, на яких вона базується. Наприклад, на сторінці 233 згадується припущення про рівномірний розподіл теплового потоку по дузі контакту, але його вплив на точність моделі не обговорюється. Це може створити враження надмірної універсальності моделі, хоча кожна модель має свої межі застосовності.

5. В підрозділі 7.1 автор зазначає використання методу "Гусениця-SSA" для ідентифікації робочої поверхні круга (РПК), однак не надають достатнього теоретичного обґрунтування переваг цього методу порівняно з іншими методами аналізу часових рядів.

6. В підрозділі 7.2 представлена T -подібна схема заміщення міжелектродного зазору з параметрами $L_1=173\text{мкГн}$, $L_2=173\text{мкГн}$, $C=18\text{мкФ}$, однак валідація моделі обмежується лише порівнянням з осцилограмами для конкретних умов експерименту.

8. Висновки по дисертаційній роботі.

1. Дисертаційна робота Стрельчука Романа Михайловича "Наукові основи електроерозійного алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів зі змінною полярністю електродів", є завершеною науковою роботою і містить нові науково обґрунтовані теоретичні результати, які мають

велике практичне значення для вирішення задачі підвищення ефективності алмазно-абразивної обробки сучасних важкооброблюваних матеріалів.

2. Наукові положення, отримані в роботі, достовірні і достатні для обґрунтування зроблених висновків. Незважаючи на наведені вище недоліки, дисертація у цілому виконана на достатньо високому науковому рівні. Її нові теоретичні і практичні розробки актуальні, цікаві та достовірні. Оформлення, стиль і мова викладення роботи, хоча і мають певні недоліки, але в цілому достатні.

3. Основний зміст роботи достатньо повно викладено в 58 наукових публікаціях, що відповідають Постанові "Про мінімальну кількість та обсяг публікацій основного змісту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата наук".

4. Матеріали кандидатської дисертації Стрельчука Р.М. «Визначення особливостей і раціональних умов алмазно-іскрового шліфування твердих сплавів з нанорозмірних зерен монокарбиду вольфрама», захищеної у 2011 році, в докторській дисертації не застосовувалися.

5. Зміст реферату відображає основні положення роботи.

6. На підставі вище викладеного вважаю, що представлена дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти та вимогам "Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук" затвердженого Постановою Кабінету міністрів України № 1197 від 17.11.2021 р., що надаються до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а її автор Стрельчук Роман Михайлович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

Офіційний опонент,
проректор з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Чернігівська політехніка»,
професор, доктор технічних наук


Володимир КАЛЬЧЕНКО

19.08.25 р.

Підпис доктора технічних наук, професора В.В. Кальченка засвідчую:

Вчений секретар
Національного університету
«Чернігівська політехніка»
канд. екон. наук, доц.




Олександр СИДОРЕНКО