

## ВІДГУК

офіційного опонента щодо дисертаційної роботи  
Бодар Мохамеда Р.Ф. “Підвищення ефективності алмазно-абразивного інструменту для обробки високоміцних композиційних матеріалів”, подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – *процеси механічної обробки, верстати та інструменти*

Дисертація, що була надана до опонування, складається з вступу, п'яти розділів з висновками наприкінці кожного розділу, загальних висновків, списку використаних джерел (з 158 найменувань) та додатків на 10 стор. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 208 стор. і містить 82 рисунки та 14 таблиць.

### ***1. Актуальність роботи та її відповідність планам наукових досліджень.***

Сучасні вироби промислового виробництва характеризуються високою часткою застосування в них нових композиційних матеріалів. Особливою увагою для отримання конструкційних, жаротривких та спеціального призначення виробів користуються такі композиційні матеріали, як скло- та вуглепластики, карбон-карбонові матеріали та їм подібні. Обробка цих матеріалів, насамперед алмазним інструментом, стикається із низкою складнощів, які обумовлюються наявністю в структурі композиту високоміцних армувальних волокон (вуглецевих або високомодульних скляних), що значно погіршує експлуатаційні показники алмазного інструмента. Особливо важкими є технологічні операції розділення, під час яких нежорстким інструментом відокремлюються частини заготовки, наприклад, розрізання вихідних заготовок з композиційних матеріалів на пластини. Враховуючи наведені вище складнощі, така обробка є достатньо тривалою. За час обробки алмазний інструмент внаслідок зношування змінює різальні властивості. Таке зношування не є однорідним і відбувається зазвичай у зонах, в яких умови обробки досить сильно відрізняються від умов усталеного різання. Ця особливість є найбільш характерною для нежорстких інструментів – полотен реноваторів, різальних стрічок та струн.

Сучасні нежорсткі алмазні інструменти, маючи тонкий шар алмазів, забезпечують надійну обробку на операціях розрізання, шліфування, вибірки пазів у випадку, коли машинний час не перевищує кількох десятків секунд. Тривалі операції при обробці матеріалів без водяного або рідинного охолодження, наприклад, при розрізанні вуглець-вуглецевих заготовок, приводять до того, що алмазовмісний шар активно засалюється і поверхня різання втрачає виступання зерен. З-за цього операції розрізання супроводжуються значним виділенням шкідливих речовин у оточуюче середовище, зниженням якості та точності обробки, зростанням товщини деструктивного шару обробного виробу. У низці робіт дослідників, наприклад, українських: О.Ф. Саленка, С.А. Клименка, Ю.М. Кузнецова, було показано, що гібридизація та комбінування може істотно підвищити ефективність обробки, особливо композиційних матеріалів. Такий

підхід може застосовуватися і для алмазно-абразивного інструменту (кругів, пилок реноватора, кільцевих свердел, алмазних полотен).

Приймаючи до уваги, що з точки зору раціонального забезпечення робочих функцій окрайки інструменту мають бути адаптованими до особливостей роботи у різних робочих зонах впродовж обробного циклу, а також зважаючи на попередні дослідження науковців у галузі застосування функціонального підходу, в опонованій роботі зроблено висновок про можливість декомпозиції поверхонь інструменту і переходу до створення окремих функціональних ділянок у вигляді поверхневих кластерів. Подальший аналіз можливості формування таких кластерів дозволив автору роботи висунути припущення про перспективу застосування гібридних точкових процесів, що дозволяють формувати певні параметри поверхні (у тому числі, різальні властивості поверхневого шару). На основі закономірностей формування алмазного шару різними методами зроблено висновок, що лазерне термомодеформаційне спікання (ЛТДС) є найбільш доцільним із точки зору застосування для визначених задач.

Важливість такого напрямку підтверджує і те, що робота виконувалася у рамках робіт держбюджетної тематики Центральноукраїнського національного технічного університету МОН України (№ держ. реєстр. 0120U104288). Тому дисертаційна робота Будар Мохамеда Р.Ф., у якій отримали подальший розвиток теоретичні та експериментальні обґрунтування технологічних закономірностей процесу алмазно-абразивної обробки високоміцних композиційних матеріалів за рахунок раціонального формування елементів алмазовмісного шару робочої поверхні інструменту засобами ЛТДС, є актуальною та важливою.

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

Наукові положення, які містяться в роботі, базуються на загальнознайомих підходах теорії різання матеріалів, механіки деформованого пружного тіла, теорії тепло- і масообміну, теорії пластичного деформування та методах математичного моделювання. Достовірність отриманих результатів підтверджується обґрунтованістю прийнятих допущень, коректним використанням математичного апарату, експериментальними дослідженнями та даними впровадженень.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, об'єкт, предмет дослідження і задачі, які автор розв'язує в роботі. Наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Подано відомості про апробацію, публікації та структуру дисертаційної роботи. Зазначено особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведений аналіз умов застосування алмазного інструменту при обробці новітніх композиційних матеріалів, зокрема, карбонової групи. Наведені висновки робіт Charles W. Bytheway, Є.І. Голібардова, А.М. Кузьміна, О.Ф. Саленка, С.А. Клименка, Ю.М. Кузнецова, де було показано, що гібридизація та комбінування впливу може істотно підвищити ефективність обробки, особливо коли необхідно обробляти композиційні матеріали. При цьому формування окремих кластерів робочої поверхні, поділ її на зони різного силового, температурного та динамічного навантаження уздовж всієї робочої

поверхні дозволяє врахувати ці особливості та здійснювати обробку в нежорстким інструментом в умовах, наближених до раціональних. Приймаючи до уваги, що з точки зору раціонального забезпечення функцій робочі крайки інструменту мають бути адаптованими до особливостей роботи у різних робочих зонах впродовж обробного циклу, та базуючись на принципі поділу поверхонь на різних рівнях, а також зважаючи на попередні дослідження науковців у галузі застосування функціонального підходу, зроблено висновок про можливість декомпозиції поверхонь інструменту і переходу до створення окремих функціональних ділянок у вигляді поверхневих кластерів. На основі закономірностей формування алмазного шару різними методами зроблено висновок, що саме ЛТДС є найбільш доцільним для досягнення визначених задач. Визначено предмет і об'єкт досліджень, сформульовано напрямки досліджень.

Другий розділ присвячено викладенню методики формування алмазовмісного шару на основі функціонального підходу. Зазвичай силові навантаження алмазного шару при роботі інструменту істотно різняться і визначаються схемою взаємодії робочих поверхонь з оброблюваною заготовкою. Порожниста структура високоміцного матеріалу має істотний вплив на умови взаємодії та на процеси і явища, що відбуваються в зоні різання нежорстким інструментом. Переважно високоміцний композиційний карбон–карбонівий матеріал 3–D структури має порожнистість 3–7%, а за трьома ортогональними напрямками волокна сполучені у джгути, діаметр кожного становить 1,25–1,8 мм, причому сполучення джгутів та волокон у єдину структуру виконується піровуглецем, отримуваним гарячим осадженням. Для пошуку раціонального рішення при удосконаленні інструменту застосовано функціонально–вартісну модель системи з використанням системно–морфологічного підходу. Зроблено висновок, що найбільш доцільним засобом забезпечення властивостей поверхонь і сформульованих вище вимог є саме ЛТДС формування поверхневого шару, який потребує певних удосконалень для отримання закономірностей керування процесом формування елементів поверхні або їх кластерів. В удосконаленій марематичній моделі вперше враховано динаміку руху алмазних зерен та їх фіксацію на поверхні, що дозволяє визначати локалізацію кластерів, встановлювати їх параметри. Врахування динаміки приводів, динаміки руху алмазних зерен, руху робочих органів дозволяє встановити помилку відтворення контуру.

У третьому розділі наведено опис використовуваного обладнання, а також методик проведення експериментальних і модельних досліджень. Для забезпечення сталого процесу ЛТДС використовувався універсальний лазерно–струминний комплекс ЛСК 400–5, на якому було встановлено допоміжне пристосування у вигляді модулів поздовжнього та обертового переміщення. Нанесення алмазовмісного шару здійснювали на заготовки свердла кільцевого діаметру 18 мм. Наведена методика використання засобів електронно–мікроскопічного дослідження за допомогою мікроскопу РЕМ–106–И, методика підготовки препаратів для визначення деградації поверхні інструменту, а також топографічного дослідження поверхні обробленого зразка з метою встановлення глибини дефектного шару та шорсткості поверхні за параметром  $Rz$ . Запропоновані рівняння для оцінки топографічного контрасту та побудови 3–D зображень поверхонь.

Четвертий розділ присвячений результатам комплексу теоретико-експериментальних досліджень із застосування традиційного та запропонованого інструменту. Так, із використанням розробленої узагальненої математичної моделі виконана симуляція для визначення умов і відмінностей при роботі алмазного свердла, пилки реноватора, алмазної нитки під час різання матеріалу типу КІМФ. На основі моделювання поведінки інструменту встановлено закономірності зміни навантажень частин робочої поверхні, і відповідно, функціональних особливостей кластерів робочих поверхонь інструменту, за якими сформульовано вимоги до параметрів алмазовмісного шару. Це дало змогу також довести твердження про можливість опису функціональних відмінностей математичними закономірностями, поданими у вигляді поліномів другого та третього ступеня. Порівняння результатів модельного і експериментального досліджень щодо властивостей поверхні показали їх відносно високе співпадіння результатів (похибка складає 12–15 %). Порівнюючи із традиційним інструментом, можна констатувати, що пропонується володіє меншою швидкістю розвитку пошкоджень, водночас із тим, що початкове розсіювання параметрів також на 27–32 % менше, що підтверджує його ефективність. Показано, що похибки симуляції та отриманих регресійних моделей не перевищують 10–12 %, а використання інструменту, створеного на основі функціонального підходу, вища на 20–25 % для кільцевих свердел, на 40–50 % для гнучкого інструменту (алмазних струн) та на 15–20 % для пружного інструменту (пилки реноватору). При цьому ефективність застосування інструменту, створеного на основі використання функціонального підходу, є високою.

У п'ятому розділі приведені економічне обґрунтування запропонованих технічних рішень та інженерна методика їх використання. Оскільки ефективність створеного інструменту вбачається не тільки у зростанні періоду стійкості, а і у скороченні обсягу матеріалу, перетворюваного у шлам, показано, що використання інструменту із адаптацією кластерів до процесу різання дозволяє підвищити коефіцієнт використання матеріалу на 18–22 %, отримати економічний ефект до 150 тис. грн. при розрізанні одного блоку КІМФ. Наведено приклади та перспективи застосування підходу при використанні виробів із алмазовмісними шарами в машинобудуванні, зроблено висновок щодо економічної доцільності його використання. Показано, що впровадження даного підходу у вигляді інженерних методик, рекомендацій та алгоритмів вибору умов та режимів різання дозволяє підвищити ефективність обробки та отримати істотний економічний ефект.

Наукові розробки здобувача впроваджені у виробництво ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «Лезо», що є підтверджено актами. Результати наукових досліджень роботи використовуються також у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету МОН України при проведенні лекційних і практичних занять, у процесі викладання дисциплін «Технологія фізико-технічної обробки матеріалів» і «Технологія і обладнання фізико-технічної обробки матеріалів».

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

1. Вперше, на основі аналізу процесу алмазно-абразивного різання композиційних матеріалів, запропоновано узагальнену математичну модель, яка враховує особливості взаємодії пружного нежорсткого інструменту з порожнистою структурою композиту та доведено, що ця взаємодія характеризується відмінністю за локалізацією та за часом, і зроблено висновок про те, що інструмент у цілому слід розглядати як сукупність мікрофрагментів і їх можливо вважати кластерами, сукупність яких утворює алмазний шар.

2. Сформульовано основні вимоги до кластерів робочих поверхонь, зокрема: сумісні кластери мають допускати відмінності у сформованих структурах, кластери не повинні мати різні механічні характеристики, що дозволяє із таких елементів формувати суцільну робочу поверхню, а послідовність сумісних кластерів має наближатися до огинаючої заданого геометричного профіля виробу в цілому і, при цьому, сумісні кластери не повинні мати розривів у структурі і мати схожі фізико-механічні властивості.

3. Доведено, що найбільш доцільним засобом забезпечення властивостей є лазерно-деформаційний спосіб формування поверхневого шару, а розрахунок очікуваної зони локалізації засвідчив, що за умови нагріву поверхні для здійснення наступного деформаційного ущільнення понад 750 °С діаметр локалізованої плями при нерухомому промені становить від 0,32 до 0,40 мм.

4. Для визначення параметрів поверхневих кластерів запропоновано використання реверсивного інжинірингу поверхні інструменту, при цьому відмінність функціональних особливостей кластерів доцільно описувати поліномами другого порядку та показано, що більш стабільним і ефективним є різання інструментом, крок розміщення кластерів на якому відповідає кроку армування матеріалу джгутами волокон.

### **4. Практична значимість отриманих результатів.**

1. Сформульовано вимоги до інструментів, що використовуються для різання високоміцних композитів типу КІМФ, розроблено, виготовлено і апробовано ряд нових технічних рішень інструментів із нанесеним алмазним шаром, зокрема, різальних струн, занурюваних пилок реноватору та свердел.

2. Розроблено методику визначення функціональних особливостей жорстких (свердел), пружних (пилні полотна реноватору) та гнучких (струни) інструментів, призначених для обробки матеріалів, армованих скляними та вуглецевими волокнами.

3. Запропоновані емпіричні залежності для визначення режимів ЛТДС для формування кластерів робочих поверхонь пропонованих інструментів.

4. Встановлено, що стійкість інструменту, створеного на основі функціонального підходу, вища традиційних на 20–25 % для кільцевих свердел, на 40–50 % для гнучкого інструменту (алмазних струн) та на 15–20 % для пружного інструменту (пилки реноватору). Сходження результатів моделювання та експериментальних даних має похибку не більшу за 10...15 %, і обумовлюється складеністю врахування особливостей взаємодії інструменту на значній довжині поверхні різання (понад 150...300 мм). При обробці КІМФ

матеріалів розмір кластеру відповідає кроку армування матеріалу, і становить 2,8..3,0 мм; виліт зерен зростає з 15 до 90 мкм зі зменшенням щільності нанесення з 60 до 20 %.

5. Розроблені рекомендації щодо виконання операцій різання алмазним інструментом та принципи ведення обробки передано до впровадження на підприємство ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «Лезо». Отримані результати роботи, методики та моделі використовуються у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологія фізико–технічної обробки матеріалів» і «Технологія і обладнання фізико–технічної обробки матеріалів».

### ***5. Повнота викладення основних результатів роботи.***

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 12 наукових працях, з них: 3 статті у фахових виданнях України, 4 у закордонних періодичних наукових журналах, 5 тез доповідей на наукових конференціях, отримано 2 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 10 Міжнародних 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 свідчить про індивідуальний внесок здобувача в науку.

### ***7. Зауваження по змісту і оформленню дисертації.***

1. Метою роботи є підвищення ефективності алмазно-абразивного інструменту для обробки композиційних матеріалів I в роботі є окремі напрацювання у цьому напрямку: є функціонально-вартісна модель, що «...забезпечує кінцеві властивості виробу системою показників якості з мінімальними матеріальними затратами», є висновок у розділі 5 щодо економічної доцільності розробок, але на жаль в дисертації нема кінцевого узагальнення, яке би опукло показало оте саме підвищення ефективності і що мається на увазі під цим.

2. У розділі 2 вказано, що «... визначали розмір плями нагріві поверхні до температур, достатніх для плавлення присадкового матеріалу...». У розділі 4 вказано, що «...нагрів поверхні для здійснення наступного деформаційного ущільнення має бути більшим за 750 °С...». У розділі 3 вказано, що «...присадковий матеріал на основі дрібнодисперсного порошку Ni...». Тобто є певне протиріччя – нікель плавиться приблизно при 1400 °С, а вказано, що нагрів «...має бути більшим за 750 °С...», тобто наприклад 800 °С.

3. В розробленому інструменті застосовуються алмазні зерна. Але на жаль конкретна зернистість та марка алмазів не вказані. Є лише відомості про так звану «...фракційність використаного алмазного порошку 60 та 100 мкм...». Що під цим мається на увазі, опоненту невідомо.

4. У першому висновку (наприклад, автореферат стор. 17) вказано, що «... причиною втрати різальних властивостей інструментів ... є надмірне пиловиділення...». Разом з тим, у четвертому розділі вказано, що «... останнє явище зумовлюється тим, що утворений шлам не виноситься за межі зони різання...». Тобто, знову ж таки є протиріччя – так виноситься чи не виноситься? Напрошується, що все ж таки, що причиною втрати різальних властивостей алмазно-абразивного інструменту є зниження величини виліту зерен, а зовсім не «надмірне пиловиділення».

5. Тепер про виліт зерен (див. наприклад висновок № 5 на стор. 18 автореферату). Там вказано, що виліт зерен зростає з 15 до 90 мкм. Якщо врахувати оту саму незрозумілу фракційність використаного алмазного порошку 60 та 100 мкм, то незрозуміло про який саме такий виліт зерен тут можливо вести мову.

6. У дисертації вказано, що результати роботи, методики та моделі використовуються у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологія фізико-технічної обробки матеріалів» і «Технологія і обладнання фізико-технічної обробки матеріалів». Це безумовно гарно, але незрозуміло чого вказані результати роботи не використовуються у навчальному процесі для викладання дисципліни «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти».

7. У роботі мають місце окремі недоліки редакційного характеру. Деякі малюнки зображені не досить якісно та позначення на них ледь помітно (рис.3.7, стр.136, рис.2.2, стр.73). На рис.1.1 (стр.29), табл.2.2 (стр.83), табл.4.1 (стр.167) використовується англomовна термінологія.

## **8. Висновки по дисертаційній роботі.**

1. Дисертаційна робота Будар Мохамеда Р.Ф. “Підвищення ефективності алмазно-абразивного інструменту для обробки високоміцних композиційних матеріалів” є завершеною науковою роботою і містить нові науково обґрунтовані теоретичні результати, які мають велике практичне значення для вирішення задачі підвищення ефективності алмазно-абразивної обробки нежорстким інструментом композиційних карбон-карбонівих 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 14 наукових публікаціях, що відповідають Постанові "Про мінімальну кількість та обсяг публікацій основного змісту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора і кандидата наук".

4. Зміст автореферату відображає основні положення роботи.

5. На підставі вище викладеного вважаю, що представлена дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти та вимогам п.п. 9, 11 та 12 "Порядку присудження наукових ступенів" затвердженого Постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (із змінами), що надаються до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а її автор Будар Мохамед Р.Ф. заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

Офіційний опонент,  
завідувач відділу  
алмазно-абразивної і фізико-технічної обробки  
Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України, професор, доктор технічних наук

статусів

Лаврінєнко Валерій Іванович

25.03.21 р.

Підпис доктора технічних наук, професора В.І. Лаврінєнка засвідчую :

Вчений секретар  
ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України,  
канд. техн. наук



В.В. Смоквіна