ВІДГУК
офіційного опонента
д.т.н., професора Шевченка Олександра Віталійовича

на дисертаційну роботу Аль-Ібрахімі Метак М. А. «Забезпечення раціональних умов абразивного різання композиційних карбонових виробів на верстатах паралельної структури», подану до захисту в спеціалізовану вчену раду К23.073.02 при Центральноукраїнському національному технічному університеті на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 - процеси механічної обробки, верстати та інструменти

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1.1. Актуальність. Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної задачі підвищення ефективності обробки вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів на основі встановлення закономірностей формування поверхневого шару при взаємодії з абразивним інструментом шляхом забезпечення раціональних умов різання маніпуляційною системою верстата паралельної структури.

Практично всі деталі, вироби і конструкції з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) після основних методів формування піддаються обов'язковій механічній обробці різанням. Найбільш поширеним видом механічної обробки різанням є обробка абразивним інструментом. Механічна обробка різанням ПКМ викликає серйозні труднощі, а саме: різальні абразивні інструменти зношуються інтенсивніше, ніж при обробці багатьох металів, в зоні різання має місце висока температура, формується дефектний деструктивний поверхневий шар, виділяються газоподібні токсичні речовини - продукти деструкції полімерної матриці, утворюється мілкодисперсний пил. Ці і інші особливості обробки необхідно враховувати при розробці технологічних процесів механічної обробки різанням, виборі раціонального різального інструменту і призначенні оптимальних режимів різання.

Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали мають високу механічну міцність, стійкість до механічних і термічних ударів, хімічну, радіаційну та корозійну стійкість, тривалий термін експлуатації і малу вагу, знаходячи застосування в машинах, що працюють в екстремальних умовах: при високих температурах, в агресивних хімічних середовищах, в умовах високих навантажень. Як правило, вуглець-вуглецеві матеріали створюють у вигляді плетеного 2-D або 3-D каркасу із вуглецевого волокна та вуглецевої матриці.

Початкові заготовки із вуглець-вуглецевого матеріалу отримують у вигляді плит, кругів, або брусків, які потребують подальшого оброблення. Різання таких матеріалів на пластини або проміжні заготовки за допомогою абразивних кругів є одним із найбільш доцільних способів обробки, оскільки є можливість отримати вузький проріз із мінімальними пошкодженнями матеріалу та задовільною якістю поверхні. Разом з тим, для обробки армованих матеріалів велике значення набуває точне орієнтування різального інструменту відносно армувальних волокон, що обмежує використання традиційних відрізних верстатів. Вирішення задачі максимального збільшення продуктивності обробки таких матеріалів можливе при використанні верстатів з паралельними кінематичними ланцюгами. Однак, відомі конструкції верстатів паралельної структури потребують удосконалення важільної системи та використання

надлишкових приводів для підвищення жорсткості технологічної оброблювальної системи, що разом із створенням раціональних умов протікання процесів абразивного руйнування нещільного матеріалу в зоні обробки дозволить підвищити якість обробки та забезпечити її ефективність.

Тому, підвищення якості розрізання вуглець-вуглецевих заготовок на основі встановлення закономірностей формування поверхневого шару при впливі абразивним інструментом за рахунок забезпечення раціональних умов динамічного контакту маніпуляційною системою верстата паралельної структури **є актуальною проблемою** і має велике наукове та практичне значення.

Дисертаційна робота виконувалась у відповідності до наукової тематики кафедри «Металорізальні верстати та системи» Центральноукраїнського національного технічного університету і пов'язана з тематикою науково-дослідної роботи кафедри «Підвищення ефективності технологічного обладнання з механізмами паралельної структури» (державна реєстрація № 0111U000304).

1.2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій та їхня достовірність.

Наукові положення, висновки і пропозиції у достатній мірі обґрунтовані теоретичним аналізом та експериментальними дослідженнями. Достовірність основних наукових положень, отриманих результатів і зроблених у дисертації висновків визначається основним положеннями теорії різання матеріалів, теорії тепло- та масопереносу, теорії пружності та пластичності, теорії проектування металорізального обладнання, кваліметрії, векторної алгебри, теорії ймовірності та математичної статистики. Експериментальні та аналітичні дослідження виконувалися із застосуванням сучасних засобів досліджень – растрової електронної мікроскопії, пірометрії, засобів автоматичної фіксації вимірювальних величин, лазерної інтерферометрії. Достовірність також підтверджена послідовністю висновків, відповідністю теоретичних результатів та експериментальних даних. Таким чином, наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, достовірні, а їх обґрунтування проведено з необхідною повнотою. Результати роботи в повній мірі викладено в опублікованих автором працях.

1.3. Наукова новизна отриманих результатів.

При вирішенні поставлених в дисертації науково-прикладних задач отримані наступні результати:

– вперше отримано закономірності формування поверхневого шару нещільного матеріалу вуглець-вуглецевої групи 3-D плетіння абразивною обробкою та встановлено функціональні взаємозв'язки між плямою динамічного контакту інструменту з поверхнею та термосиловим навантаженням елементів технологічної оброблювальної системи;

– вперше доведено, що порушення теплового балансу зони різання при обробці нещільних вуглець-вуглецевих матеріалів 3-D плетіння веде до випереджаючого зростання локальних температур на поверхні абразивного інструменту та його деформування зі зміною силового навантаження утворених поверхонь і, як наслідок, погіршення якості і точності обробки;

– визначено умову взаємодії абразивних частинок інструменту із нещільним пружним матеріалом заготовки з врахуванням динамічних властивостей

верстатної системи паралельної структури, на основі якої підтверджена ефективність застосування важільних маніпуляційних систем у верстатах для обробки вуглець-вуглецевих композитів;
– вперше на основі аналізу сформульованих кінематичних залежностей та матриці просторової жорсткості підтверджено переваги запропонованого механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю у порівнянні з повно-паралельними механізмами.

1.3. Практичне значення результатів роботи.

Практичною цінністю дисертаційного дослідження є:
– запропоновані принципи обробки вуглець-вуглецевих композитів алмазовмістким інструментом на верстатах із надлишковими кінематичними ланками, який базується на забезпеченні раціональної плями контакту інструменту із оброблювальною заготовкою;
– оригінальна інженерна методика призначення режимів різання композитних матеріалів абразивними кругами, що враховує особливості взаємодії закріплених алмазних зерен із неоднорідним середовищем і впроваджена на ТОВ «Таксі-комфорт», м. Кременчук;
– нові технічні рішення верстатів паралельної структури з кінематичною надлишковістю для абразивної обробки композитних матеріалів;
– математична модель для розрахунку довжин штанг верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю під час обробки деталі та визначення характеристик його просторової жорсткості;
– методики та математичні моделі, що використовуються у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету при викладання дисциплін «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і «Теорія різання».

2. АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертаційна робота складається із вступу, 5 основних розділів, загальних висновків, бібліографічного списку, додатків.

У вступі автор обґрунтовано доводить актуальність теми дисертаційної роботи, визначає мету та задачі дослідження, теоретичну та практичну цінність одержаних результатів досліджень, рівень їх реалізації та впровадження наукових розробок.

В першому розділі окреслено коло проблем, що виникають при обробці різанням полімерних композиційних матеріалів. Приведено аналітичний огляд проблеми, охарактеризовано ПКМ, що обробляються абразивним методом за допомогою відрізних кругів, спеціальних фрез, свердел тощо, показано, що, попри високу ефективність, ці процеси досить складно реалізуються на діючому обладнанні, оскільки потребують створення спеціальних умов обробки.

Показано, що для обробки армованих вуглець-вуглецевих матеріалів велике значення набуває точне орієнтування різального інструменту відносно армувальних волокон, що найбільш просто реалізовується саме на верстатах паралельної кінематичної структури. Зроблено висновок, що існуючі технічні рішення, призначені для орієнтування у просторі робочого органу верстата потребують доопрацювання, оскільки не мають стабільних характеристик

жорсткості у площині обробки, а недостатня жорсткість самого різального інструменту вносить додатковий вплив на процес різання.

Другий розділ присвячено розробці методики визначення ефективності обробки на основі інтенсивності тепловиділення у зоні механічного впливу. Наведено опис устаткування, вимірювальних приладів та інструментального забезпечення. Для вимірювання температури у зоні різання використано пірометр із засобами автоматичного зняття та реєстрації даних. Оскільки у процесі обробки абразивний інструмент зазнає деградації, для відтворюваності результатів вимірів використане гідроструменеве очищення поверхневого абразивовмістного шару. Приведено методику визначення параметрів шорсткості засобами електронної мікроскопії, удосконалено відомі рівняння для визначення параметрів шорсткості порожнистого матеріалу вуглець-вуглецевої групи. Для встановлення умов використання абразивного інструменту на верстатах із паралельними кінематичними структурами створено дослідний маніпулятор із надлишковими приводами, регульованими штангами та змінними динамічними параметрами. Запропоновано методику прогнозування раціональних умов обробки нещільних вуглець-вуглецевих матеріалів на цьому обладнанні.

В третьому розділі розглянуто взаємодію алмазовмістного інструменту із нещільним напівпростором, проаналізовані теплові ефекти та явища у зоні контакту, запропоновано фізичну модель взаємодії та представлено математичний опис технологічної оброблювальної системи, який дозволяє розглянути термосилове навантаження робочого інструменту. Розглянуто задачу виділення тепла на поверхні контакту, встановлено функціональні взаємозв'язки між плямою динамічного контакту інструмента з поверхнею деталі та термосиловим навантаженням. Запропоноване нове технічне рішення верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, проведений аналіз кінематичних залежностей та показана доцільність його застосування для маніпулювання шпинделем із абразивним інструментом. Отримано систему рівнянь, яка пов'язує узагальнені координати робочого органу з довжиною приводів штанг змінної довжини. Отримано залежності для визначення матриці жорсткості робочого органу та проаналізовано зміну жорсткості у заданій робочій зоні верстата. Зроблено висновок про більшу жорсткість механізму з кінематичною надлишковістю порівняно із повнопаралельними механізмами паралельної структури. Встановлено, що зменшення динамічних навантажень плями контакту інструмента із оброблюваною поверхнею можливе за умови, що механічна робота руху різального шару максимально витрачається на роботу мікрорізання. При цьому шлам і мікростружка надійно видаляються із зони різання і не сприяють зменшенню фактичної глибини різання та зростанню температури.

В четвертому розділі наведені результати досліджень температури в зоні різання, що дозволило ідентифікувати моделі для визначення розподілу температур в процесі оброблення. Результатами мікроелектронного дослідження поверхні різання та шламу встановлено, що погіршення якості поверхневого шару при обробці вуглець-вуглецевих нещільних матеріалів пов'язане перш за все зі зростанням температури в зоні різання. Оскільки зернистість кругу та його щільність визначають розміри частинок шламу та формують структуру поверхні, то для забезпечення високої якості поверхневого шару оброблюваних заготовок

рекомендовано використовувати круги з дрібними алмазними зернами. Виконано детальний аналіз деградації та пошкодження кругів і показано, що для забезпечення надійності процесу різання круги мають очищатися, зокрема, гідроабразивним методом. Встановлено, що зі збільшенням часу обробки кругом щільність налипання продуктів різання на поверхні кругу зростає, обсяг видалення шламу зменшується, зростають сили різання та деформації пружної системи верстата, падає продуктивність процесу оброблення і погіршується якість оброблених заготовок. Тому, запропоноване використання надлишкового механізму в конструкції верстата паралельної структури дозволяє підвищити жорсткість технологічної системи і точність обробки, зменшити пляму контакту між інструментом і деталлю та тепловиділення в зоні різання.

П'ятий розділ присвячено практичній реалізації результатів роботи. Запропоноване нове технічне рішення верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, який має більш широкі можливості орієнтації робочого органа та більшу жорсткість у порівнянні з відомими верстатами із спільною віссю шарнірів робочого органу. Розроблено інженерну методику визначення швидкості робочої подачі залежного від умов обробки, типу абразивного інструменту, схеми технологічного налагодження. На основі багатофакторного експерименту отримано регресійні рівняння, на основі яких запропонована послідовність інженерних розрахунків контрольованих параметрів процесу. Приведене економічне обґрунтування прийнятих технічних рішень та показано, що використання розробок дозволяє скоротити витрати на обробку до 30%.

3. ПОВНОТА ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

Основні результати дисертації опубліковано в 17 наукових працях, з них 7 друкованих праць у фахових виданнях України та зарубіжних збірниках наукових праць, 7 публікацій у збірниках матеріалів конференцій та 3 патенти на корисну модель. Основні теоретичні, практичні та експериментальні результати досліджень, що містяться у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Постановка задач дослідження, формулювання основних положень роботи, опрацювання структури та змісту роботи виконані разом з науковим керівником. Все викладене вище доводить відповідність дисертації Аль-Ібрахімі Метак М. А. вимогам за ознакою «повнота опублікованих результатів».

4. ЗАУВАЖЕННЯ ПО ЗМІСТУ І ОФОРМЛЕННЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **В розділі 2, п.2.1, стор. 72 дисертації** наведено загальний вигляд стенду для вимірювання пружних деформацій просторової несучої системи верстата паралельної структури з метою визначення жорсткості його пружної системи. Разом з тим, показана кількість індикаторів дозволяє реєструвати тільки лінійні деформації пружної системи в напрямках узагальнених координат x, y і z від зовнішнього навантаження. Однак, під дією сил різання вісь шпинделя буде не тільки зміщуватись паралельно, але мати і кутові деформації. Тому, для реєстрації кутових зміщень вісі шпинделя від сил різання бажано використовувати пару індикаторів по кожній із координат x, y і z, розміщених паралельно на відповідній дистанції. Це дасть змогу визначити додаткові шляхи підвищення жорсткості пружної системи верстата.

2. **В розділі 3, п.3.2, стор. 94 дисертації** наведено методику визначення впливу динамічних властивостей пружної системи верстата на явища в зоні різання. Однак, в системі рівнянь (3.7), що описує рівновагу зосереджених мас двомасової замкненої динамічної системи верстата в двох координатах не враховано вплив навантаження пружної системи верстата процесом різання. В класичній літературі з динаміки верстатів замкнена динамічна система верстата складається з пружної системи, процесів в самій пружній системі та робочих процесів різання, тертя, процесів в проводах та ін. Перевагою дослідження замкненої динамічної системи верстата є можливість визначення характеру взаємодії пружної системи верстата з робочими процесами та сталості системи.
3. **В розділі 3, п.3.3, стор. 99-100, ри.3.6 дисертації** наведено опис компоновок багатокоординатного верстата з надлишковим приводом. Із наведеного опису та рисунку не зрозуміло, яким чином утримується шпиндельний вузол від провороту відносно штанг змінної довжини, або як забезпечується достатня крутильна жорсткість шпиндельного вузла при різанні.
4. **В розділі 4, п.4.4, стор. 145-148** наведено модель динамічної системи запропонованої конструкції верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю та результати розрахунків. Із наведених матеріалів розділу не зрозуміло (немає посилань), чи в основі комп'ютерної реалізації моделі використана наведена в п.3.2 дисертації модель динамічної системи. Які висновки можна отримати із аналізу результатів розрахунків рис. 4.17.
5. **В розділі 4, п.4.5, рис. 4.20** наведено результати вимірювання пружних переміщень штанги з шарнірами внаслідок осьового навантаження. Оскільки вказані штанги працюють як на стискання, так і на розтяг, то на графіку треба було б навести картину навантаження-розвантаження при стисканні та розтягу. Такий експеримент дозволив би визначити жорсткість штанги при зміні напрямку навантаження, наявність і величину зазорів в з'єднаннях та уточнити висновок п.6 розділу 4.
6. В роботі і авторефераті є ряд неточностей редакційного характеру, а саме, ряд рисунків дисертації не мають розмірностей на осях графіків (рис. 4.1, 4.17, 4.18 та ін.), рис. 5.2 повторює рис.3.6,б, рис. 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 та табл. 5.4, 5.5, 5.6 мають англомовні терміни без україномовної транскрипції, що утруднює їх сприйняття.

Вказані дискусійні моменти та зауваження щодо представленого дослідження не знижують вагомості отриманих в роботі наукових та практичних результатів.

5. ВИСНОВОК ЩОДО ВІДПОВІДНОСТІ ВСТАНОВЛЕНИМ ВИМОГАМ

Дисертація відповідає спеціальності 05.03.01 - процеси механічної обробки, верстати та інструменти, написана і оформлена згідно з вимогами, які пред'являються до дисертаційних робіт. Автореферат в повній мірі відображає зміст дисертації.

6. ОЦІНКА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ЇЇ ЗАВЕРШЕНОСТІ

Дисертація Аль-Ібрахімі Метак М. А. є завершеною науковою працею, що характеризується актуальністю, науковою новизною, практичним значенням одержаних результатів. Дисертація містить науково обґрунтовані положення, що підтверджені експериментально і забезпечують розв'язання важливої науково-практичної проблеми машинобудування - підвищення ефективності обробки композиційних виробів за рахунок забезпечення раціональних умов різання маніпуляційною системою верстата паралельної структури.

Дисертаційна робота «Забезпечення раціональних умов абразивного різання композиційних карбонових виробів на верстатах паралельної структури» відповідає вимогам пунктів 9, 11, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор – Аль-Ібрахімі Метак М. А. заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

Офіційний опонент
виконувач обов'язків завідувача кафедри
конструювання верстатів та машин
КПІ імені Ігоря Сікорського
д.т.н., професор Шевченко О.В.

Підпис д.т.н., проф. Шевченко О.В. завіряю,
Вчений секретар
КПІ імені Ігоря Сікорського Мельниченко А.А.