

Міністерство освіти і науки України
Центральноукраїнський національний технічний університет

Аль-Ібрахімі Метак М. А.



УДК 62-231: 621.923.9

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ АБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ
КОМПОЗИЦІЙНИХ КАРБОНОВИХ ВИРОБІВ НА ВЕРСТАТАХ
ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ**

Спеціальність 05.03.01 – Процеси механічної обробки,
верстати та інструменти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі металорізальних верстатів та систем
Центральноукраїнського національного технічного університету
Міністерства освіти і науки України, м. Кропивницький.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кириченко Андрій Миколайович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет, м. Кропивницький,
декан механіко-технологічного факультету.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шевченко Олександр Віталійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», м. Київ,
виконувач обов'язків завідувача кафедри
конструювання верстатів і машин;

доктор технічних наук, професор
Саленко Олександр Федорович,
Кременчуцький національний університет імені
Михайла Остроградського, м. Кременчук,
професор кафедри галузевого машинобудування.

Захист відбудеться « 7 » червня 2019 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К23.073.02 при Центральноукраїнському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету Міністерства освіти і науки України за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Автореферат розіслано « 6 » травня 2019 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. К. Дідик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Стабільне зростання питомої ваги виробів, виконаних із композиційних матеріалів, перед усім, на основі скляних і вуглецевих волокон у сучасних технічних системах і комплексах є однією із головних тенденцій високотехнологічного машинобудування. Цьому сприяє і принципово нова концепція створення виробів із композитів, коли виріб проектується із врахуванням властивостей майбутнього матеріалу, анізотропії його основних характеристик. Володіючи набором унікальних фізико-механічних властивостей, у першу чергу, ортотропією міцності та пружності, малою вагою, стійкістю до дії агресивного середовища, ці матеріали є незамінними для авіаційної, ракетно-космічної техніки, автомобілебудування, виробництва сучасних обробних засобів і інструментів, товарів народного вжитку.

Однак, поруч із задачами створення нових матеріалів, розробки принципів конструювання виробів із композитів, нагальною постає і науково-технічна задача розробки способів і методів оброблення композитів, створення ефективного інструментального забезпечення.

Вуглець-вмісні матеріали, зокрема, карбон-карбонові, знаходять застосування в машинах, що працюють в екстремальних умовах: при високих температурах, в агресивних хімічних середовищах, в умовах високих навантажень. Як правило, карбон-карбонові матеріали створюють у вигляді плетеного 2-D або 3-D каркасу із суцільного вуглецевого волокна, який сполученого чистим вуглецем (переважно піровуглецем). На відміну від карбон-полімерних заготовок і препрегів, що можуть бути викладені на основу перед полімеризацією, початкові заготовки із карбон-карбону отримують у вигляді плит, кругів, або брусків, які потребують подальшого оброблення. Абразивне різання таких матеріалів на пластини або проміжні заготовки за допомогою кругів є одним із найбільш доцільних способів обробки, оскільки отримують вузький проріз із мінімальних пошкодженням матеріалу та задовільною якістю поверхні. У той же час виконання таких операцій на відомих відрізних верстатах ускладнене внаслідок недостатньої жорсткості та малої потужності головного приводу, а також обмежених можливостей стосовно різання заготовки без її переустановлення.

Зважаючи на активний розвиток верстатних систем, що базуються на використанні механізмів паралельної структури, як машин широких технологічних можливостей, адаптація такого обладнання до задач абразивного розрізання карбонових заготовок є актуальною та значимою. Її розв'язання дозволить не лише покращити якість оброблення, підвищити точність виконуваних розмірів, а і значно покращити умови виробництва, зменшити вплив шкідливого пилоутворення на обслуговуючий персонал.

Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно 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» (номер державної реєстрації № 0111U000304).

Мета роботи полягає у підвищенні якості розрізання карбон-карбонівих композиційних виробів на основі встановлення закономірностей формування поверхневого шару при впливі абразивним інструментом за рахунок забезпечення раціональних умов різання маніпуляційною системою верстата паралельної структури.

Задачі дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- виконати аналіз особливостей абразивного різання композиційних матеріалів, встановити вимоги до абразивного інструмента та обробного обладнання, обґрунтувати доцільність використання верстатів паралельної структури для здійснення операцій розрізання;

- розробити фізичну та побудувати математичну модель взаємодії скріплених абразивних частинок із нещільним напівпростором, що відповідає структурі карбон-карбонівих матеріалів;

- ідентифікувати модель, визначити раціональні умови формування плями динамічного контакту, що обумовлює формування показників якості обробки;

- сформулювати вимоги до пружних властивостей несучої системи, виконати аналіз компонок і технологічних можливостей верстатів паралельної структури;

- запропонувати нове технічне рішення маніпуляційної системи верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, виконати теоретичне дослідження його вихідних параметрів;

- розробити методику ідентифікації моделі взаємодії інструменту із заготовкою та провести експериментальні дослідження запропонованого технічного рішення.

Об'єкт дослідження – процес обробки карбон-карбонівих заготовок абразивним інструментом на верстаті паралельної структури.

Предмет дослідження – якість та стабільність процесу обробки карбон-карбонівих заготовок абразивним інструментом на верстаті паралельної структури.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження ґрунтуються на основних положеннях 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.

Наукова новизна отриманих результатів:

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

- вперше доведено, що порушення теплового балансу зони різання при обробці нещільних карбон-карбонівих 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;

– отримала подальший розвиток концепція визначеності умов взаємодії абразивних частинок інструменту із нещільним пружним матеріалом динамічними властивостями верстатної системи, зокрема, паралельної структури, на основі якої доведена ефективність застосування важільних маніпуляційних систем у верстатах для обробки карбон-карбонівих композитів;

– вперше на основі аналізу сформульованих кінематичних залежностей та матриці просторової жорсткості підтверджено переваги запропонованого механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю у порівнянні з повнопаралельними механізмами за характеристиками жорсткості.

Практичне значення отриманих результатів:

– запропоновано принципи обробки карбон-карбонівих композитів алмазовмісним інструментом на верстатах із надлишковими кінематичними ланками, який базується на забезпеченні раціональної плями контакту інструменту із оброблюваною заготовкою;

– запропоновано оригінальну інженерну методику призначення режимів різання матеріалів абразивними кругами, що враховує особливості взаємодії закріплених алмазних зерен із неоднорідним середовищем, впроваджену на ТОВ «Таксі-комфорт», м. Кременчук;

– запропоновано нове технічне рішення багатокординатного верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю для абразивної обробки композитних матеріалів;

– отримано математичну модель для розрахунку довжин штанг верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю під час обробки деталі та визначення характеристик його просторової жорсткості;

– отримані результати, методики та моделі використовуються у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і «Теорія різання».

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, практичні та експериментальні результати досліджень, що містяться у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто.

Статті [2, 5, 7] опубліковані одноосібно. У роботах, опублікованих у співавторстві, особистий внесок автора такий: у [1] автором обґрунтовано фізичну та запропоновано математичну модель для визначення умов взаємодії скріпленого абразиву із нещільним напівпростором, що імітує карбон-карбонівий матеріал, у [3] – виконано дослідження характеристик 5-осьового верстата паралельної структури з надлишковими приводами, у [4] – запропоновано конструкцію та кінематику багатокординатного верстата паралельної структури, у [6] – визначено ефективну схему верстата, обґрунтовано метод оцінки його вихідних характеристик.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на всеукраїнській науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 15–18 вересня 2015 р.), шостій міжнародній науково-практичній конференції

«Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 26–29 квітня 2016 р.), сьомій міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 24–27 квітня 2017 р.), третій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 12–17 вересня 2017 р.), Всеукраїнської науково-практичної конференції пам'яті Нагорняка С. Г. (м. Луцьк, 11–12 травня 2017 р.), четвертій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018» (м. Херсон, 12–16 вересня 2018 р.), науково-технічних конференціях викладачів, аспірантів та співробітників Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький, 2015–2018 р.).

Публікації. За результатами роботи опубліковано 17 наукових праць, з них 7 друкованих праць у фахових виданнях України та зарубіжних збірниках наукових праць (з яких у міжнародній наукометричній базі даних eLIBRARY (РИНЦ) – 3 статті та «Ulrich's Web Global Serials Directory», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services» – 4 статті, «BASE», «MIAR», «AGRIS», «ResearchBib», «USJ» – 1 стаття, «Directory of Indexing and Impact Factor», «General Impact Factor», «International Scientific Indexing» – 1 стаття), 7 публікацій у збірниках матеріалів конференцій та 3 патенти на корисну модель.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку літератури з 210 найменувань та додатків на 25 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 225 сторінок, з яких 154 сторінки основного тексту, 84 рисунки та 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розглянуто актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, поставлена мета та задачі дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну цінність роботи.

У **першому розділі** приведено аналітичний огляд проблеми, охарактеризовано карбоновмісні матеріали, 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, зокрема, залучення засобів боротьби із утворюваним пилом. При цьому існує проблема точної установки матеріалу, оскільки у переважній більшості випадків оброблення має здійснюватися з чітким орієнтуванням напряму різку відносно армувальних волокон.

Зроблено також висновок, що карбон-карбонові матеріали для розв'язання задач механіки можна вважати порожнистим напівпростором, який задовільно описується моделями Бінгама. У той же час показано, що при різанні композитів, незважаючи на значні напрацювання А. Kopleva et al., Т. Kaneeda і Т. Masayuki, D. Arola et al., I. Singh et al., А. Т. Marques, L. M. Durão, L. Lasri, X. M. Wang та L. С. Zhang Komanduri, Zitoune et al, М. В. Везезуба і А. П. Тарасюка, В. І. Дрожжина та ін., питання забезпечення якості, продуктивності та стабільності обробки повною мірою ще не вирішені.

Показано, що для обробки армованих 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 чи в площині робочого органа, потребують доопрацювання, оскільки не мають стабільних характеристик жорсткості у площині обробки, а нежорсткість самого різального інструменту вносить додаткові впливи на процес різання.

Тож саме за рахунок удосконалення просторової системи верстата паралельної структури та використання надлишкових приводів можливе підвищення жорсткості технологічної обробної системи (ТОС), що разом із створенням раціональних умов протікання процесів абразивного руйнування нещільного матеріалу в зоні обробки дозволить підвищити якість обробки, забезпечити її ефективність.

Проаналізовано існуючі схеми та характеристики обладнання з механізмами паралельної структури та показано, що використання надлишкових механізмів дозволяє підвищити вихідні характеристики просторової жорсткості та робочого простору. Поставлено мету та сформульовано задачі досліджень.

Другий розділ присвячено розробці методики визначення ефективності обробки на основі інтенсивності тепловиділення у зоні механічного впливу. Детально наведено опис використовуваного устаткування, а також вимірювальних приладів та інструментального забезпечення. Виміри температури у зоні різання запропоновано виконувати за допомогою пірометра, під'єданого до АЦП із засобами автоматичного зняття даних (побудованих на базі ПЕОМ).

Оскільки у процесі обробки використовуваний інструмент (круг) зазнає деградації, для відтворюваності результатів вимірів запропоноване гідроструменеве очищення поверхневого абразивовмісного шару.

При розробці методики експериментальних досліджень виходили з того, що при абразивному руйнуванні поверхневого шару, яке відбувається за рахунок контакту одиничного зерна із матеріалом, площа безпосереднього контакту визначиться на основі пружної взаємодії елементів технологічної системи, однак в міру зниження продуктивності обробки (визначається обсягом зйому матеріалу за одиницю часу W_r , причому $W_r = t_f b s_r$, s_r – швидкість робочої подачі, b – ширина круга) при попередніх режимах обробки невилучений матеріал збільшить контактний тиск (і площу контакту). Рухаючись в масиві матеріалу, зерно здійснює роботу руйнування на довжині контакту l_p . Вважаючи, що форма штриха відповідає формі виступаючої частини зерна, яку уявлено у вигляді напівсфери висотою ψ , об'ємний зйом матеріалу складе $W_r = \frac{\pi \psi^2}{2} l_p n$, а різниця в об'ємі зменшить t_f у рівнянні $t_f = t_z - (x_k - x_d)$ з одночасним зростанням пружних деформацій (та, відповідно, сили F) у місці контакту. Таким чином, $R_x = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} (x_k - x_d) = F$, що дозволяє за величиною фактично знятого шару визначити умови контакту в зоні різання.

Температура на поверхні диску за умови нехтування складовими відведення тепла при малому часі спостереження визначиться $T_0(t) = \frac{2fFv\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T s}$ і може бути

виміряна пірометром, і $s_i = \frac{2fFv\sqrt{\alpha_T t}}{\tau_0(t)\lambda_T}$, де плинний час t визначається від початку

контакту інструменту із заготовкою, сила F вимірюється за допомогою тензометрів з АЦП.

Сила F являтиме собою сумарну силу, що виникає на периферії та на бічних поверхнях, а площа контакту – сумарну площу по усім трьом поверхням. Теоретична повна площа контакту змінюватиметься з плинном часу, оскільки внаслідок робочої подачі круг занурюватиметься у оброблюване тіло. Іншими словами, $s_s = s_b + S = \frac{R_1^2(\alpha - \sin \alpha)}{2} + bl$.

Якщо б зміни поверхні круга не відбувалося, тобто шлам не змінював профілю поверхні, температура круга відповідала б підведеній потужності, без зростання із зміною площі контакту. При цьому виникаючій шлам обсягом W_s частково потрапляє у пори матеріалу (W_r), частково – на поверхню інструменту (W_i), частково видаляється потоком повітря (W_p): $W_s = W_p + W_r + W_i$ Теоретичний обсяг

$$W_s = f(t) = \left[\frac{R_1^2(\alpha - \sin \alpha)}{4} + vt \right] l \varrho, \quad (1)$$

де ϱ – щільність матеріалу (оскільки вважаємо, що оброблюване середовище не є щільним), у то й час як на поверхню інструменту (при припущенні, що залипання може відбуватися як на торцях, так і на периферії круга) може потрапити

$W_i^{\max} = 3\pi D_k h \delta - \frac{2}{3} \pi r_a^2 N$ шламованої речовини, N – кількість зерен абразиву; r_a – радіус абразивного зерна, який умовно вважатимемо півсферою.

Приведено методику визначення параметрів шорсткості засобами електронної мікроскопії, удосконалено відомі рівняння для визначення параметрів шорсткості (застосовано відповідно до порожнистого матеріалу карбон-карбонної групи).

Топографічного дослідження поверхневого шару за допомогою растрової електронної мікроскопії з детекторами Еверхарта-Торнлі на збільшеннях $\times 150$ (до $\times 250$) дозволяє задовільно визначити параметри шорсткості в діапазоні Ra 1,6 – Rz 80. Для того, щоб за рівнем сигналу $\Delta \bar{F}$ (як незалежного параметру, встановленого з отриманого растру поверхні) визначити рівень шорсткості, нами постульовано залежність виду $y = e^{b_0 + b_1 x}$, де x – контрольований параметр $\Delta \bar{F}$. Отримано розрахункове рівняння $Rz = e^{0,78 + 0,14 \Delta \bar{F}}$.

Наведені відомості щодо конструкції розробленої моделі верстата паралельної структури, методів вимірювання його характеристик тощо.

У **третьому розділі** розглянуто взаємодію алмазовмісного інструменту із нещільним напівпростором, проаналізовані теплові ефекти та явища у зоні контакту, запропоновано фізичну модель взаємодії та представлено математичний опис ТОС,

який дозволяє розглянути термосилове навантаження робочого інструменту. У якості такого інструменту обрано абразивний круг із малою кількістю частинок абразиву, призначений для виконання прямолінійних різів матеріалу карбонової групи. Розглянуто задачу виділення тепла на поверхні контакту (по периферійній і бічним поверхням інструменту) встановлено функціональні взаємозв'язки між прямою динамічного контакту інструмента із поверхнею та термосиловим навантаженням.

Нехай модель матеріалу буде відповідати приведеній на розрахунковій схемі рис.1. Матеріал має регулярне плетіння, яке умовно можна вважати кубічним. Вважаємо, що обробка ведеться диском, який контактує з оброблюваною поверхнею на довжині контакту l . На цій ділянці шириною b знаходяться одночасно N частинок абразиву (алмазних зерен), які виступають з поверхні зв'язки на величину h . Взаємодія відбувається так, що зріз або руйнування волокна можливе тільки у випадку, коли контакт в напрямку дії сили різання відбувається на висоті ψ відносно поверхні, в іншому випадку відбувається пружне деформування із наступним відновленням волокна.

При обробці інструмент контактує із заготовкою периферією, а також торцями. Таким чином, тепловий баланс можна уявити наступним чином:

$$Q_p + Q_{tr} + Q_{tl} = Q_k + Q_i + Q_a, \quad (2)$$

де Q_p – тепловиділення на периферії інструменту; Q_{tr} , Q_{tl} – тепловиділення на правому та лівому торцях відповідно; Q_k – теплопоглинання у матеріал; Q_i – теплопоглинання у інструмент; Q_a – втрата тепла у навколишнє середовище та у шлам.

Інтенсивність тепловиділення складає $q = fpv$, де f – коефіцієнт тертя (для карбону за умови лінеаризації на великих швидкостях $f = 0,18$); p – контактний тиск; v – швидкість ковзання.

Контактний тиск визначається співвідношенням сили нормального навантаження (F) до площадки контакту (s_k). При дії нормальної сили у місці контакту напруження можуть бути визначені за відповідними формулами Герца, які для випадку контакту абразивного зерна (уявленого у вигляді сфери радіусом r_1) та джгута волокон радіусом r_2 становитиме $\sigma = \frac{mF^{1/3}E^{2/3}}{r^{2/3}}$, де $m = 1 + \frac{r_1}{r_2}$, E – приведений модуль пружності, $E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}$, r – приведений радіус контакту,

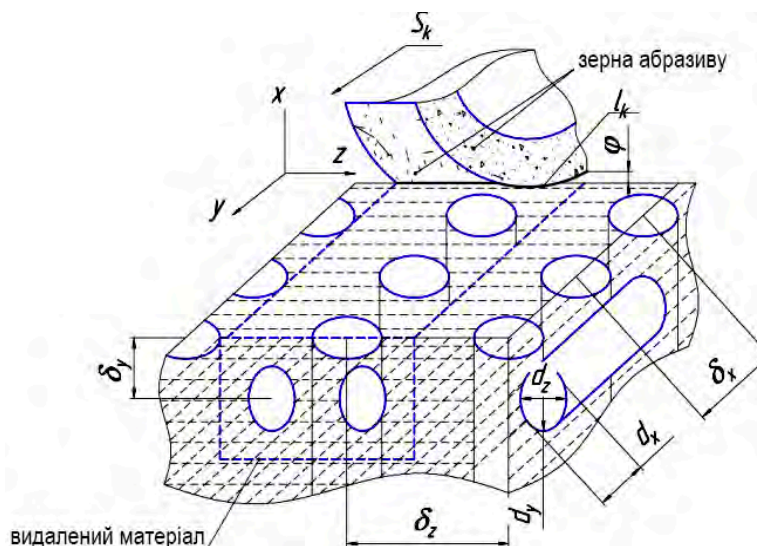


Рис. 1. Розрахункова схема взаємодії інструменту з оброблюваним матеріалом

$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$. Оскільки при обробці композиційного матеріалу пористої структури контакт зерен не є постійним, час контакту (та, відповідно, інтенсивність тепловиділення) визначатиметься щільністю плетіння, щільністю шару, що містить абразив (алмази) та швидкістю відносного руху.

З геометричних міркувань та за умови, що зрізання частини волокна відбуватиметься лише при виступанні волокна над поверхнею на величину ψ , максимальна довжина контакту становитиме $l_k = 2\sqrt{r_2^2 - (r_2 - \psi)^2}$. Одночасно в зоні обробки буде відбуватися N контактів, отже, приведена довжина контакту складе $l_p = Nl_k$. Тоді час контактної взаємодії, що визначатиме виділення теплоти

$$\tau = \frac{2N\sqrt{r_2^2 - (r_2 - \psi)^2}}{\pi D_k n} \quad (3)$$

Частота виникнення зон тепловиділення визначиться співвідношенням $\varphi = \pi D_k n / l_k$. При обробці виділене тепло передається як в оброблюваний матеріал, так і в інструмент. Відбувається нагрівання його частини, яка безпосередньо контактує з оброблюваною поверхнею. Вплив нерівномірного нагріву периферійної частини дискового інструменту радіусом R_1 можна встановити, записавши відповідні рівняння

$$\begin{cases} \sigma_r - \sigma_\tau - r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0; \\ \varepsilon_r = \varepsilon_\tau + r \frac{d\varepsilon_\tau}{dr}. \end{cases} \quad (4)$$

Виниклі на периферії напруження ведуть до появи радіальних та тангенціальних деформацій, причому останні визначаються як

$\varepsilon_\tau = \frac{1}{E}(\sigma_\tau - \mu\sigma_r) + \alpha T$, що за умови недостатньо нагрітого центра диску викличе

його викривлення убік на величину $\delta = \pi r \sqrt{(1 + \varepsilon_\tau)^2 - 1}$. Для прогину δ зусилля F

складе $F = \frac{16\pi D}{R_1^2} \delta$.

Нагрів поверхні описує одномірне температурне поле для постановки задачі відносно периферії інструменту може бути отримане на основі розв'язку

диференціального рівняння $q = q_0 A = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x}(0, t)$, $T(x, t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right)$.

Після припинення дії імпульсу теплового джерела тривалістю τ на поверхню, що нагрівається, відбувається її остигання за рахунок перерозподілу підведеного тепла. Одномірне температурне поле за умови, що оброблюване тіло являє собою напівнескінченний простір, може бути встановлене так:

$$T(z, t) = \frac{2Aq_0\sqrt{\alpha_T}}{\lambda_T} \left[\sqrt{t} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T t}}\right) - \sqrt{t - \tau} i\Phi\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha_T (t - \tau)}}\right) \right] \quad (5)$$

При цьому температура поверхні складе $T_0(t) = \frac{2q\sqrt{\alpha_T t}}{\lambda_T}$.

Врахування контактних тисків на основі спрощеної розрахункової схеми (рис. 2) дозволяє записати рівняння рівноваги зосереджених мас, які приведені до заготовки m_k та до робочого органа – інструменту m_d – прийме вигляд:

$$m_k \frac{d^2 x_k}{dt^2} - v_k \frac{dx_k}{dt} - c_1 x_k = m_d \frac{d^2 x_d}{dt^2} - v_k \frac{dx_k}{dt} - c_2 x_k, \quad (6)$$

$$m_k \frac{d^2 y_k}{dt^2} - v_k \frac{dy_k}{dt} - c_3 y_k = m_d \frac{d^2 y_d}{dt^2} - v_k \frac{dy_k}{dt} - c_4 y_k. \quad (7)$$

При цьому $R_x = \frac{c_1 c_2}{c_1 + c_2} (x_k + x_d) = F$, $R_y = \frac{c_3 c_4}{c_3 + c_4} (y_k + y_d)$, а величина фактичної

глибини різання t_f внаслідок пружного відтиснення у зоні контакту на величину $(x_k + x_d)$ становитиме $t_f = t_z - (x_k + x_d)$.

Таким чином, встановлено, що надлишок тепла викликати різке зростання температури на периферії інструменту та відповідно вестиме до його деформацій, внаслідок чого якість обробки поверхонь погіршиться, а ширина різку зросте. Зроблено припущення, що погіршення якості оброблюваної поверхні обумовлюється зростанням температури в зоні різання, і безпосередньо визначається забрудненням різального шару; при цьому провідну роль у силовому навантаженні зони обробки відіграє маніпуляційна система верстата. Оскільки силове навантаження при обробці повинне здійснюватися так, щоб запобігти виникненню коливань робочого органа, а з іншого боку, забезпечувати максимально точне розташування різального круга відносно напрямку армування, доцільним технічним рішенням є використання механізму паралельної структури.

Запропоновано структурну схему механізму з кінематичною надлишковістю (рис. 3), який має 6 ступенів вільності, 6 приводів та 5 керованих координат. Розроблено відповідну компоновку маніпуляційної системи верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю та робочим органом із

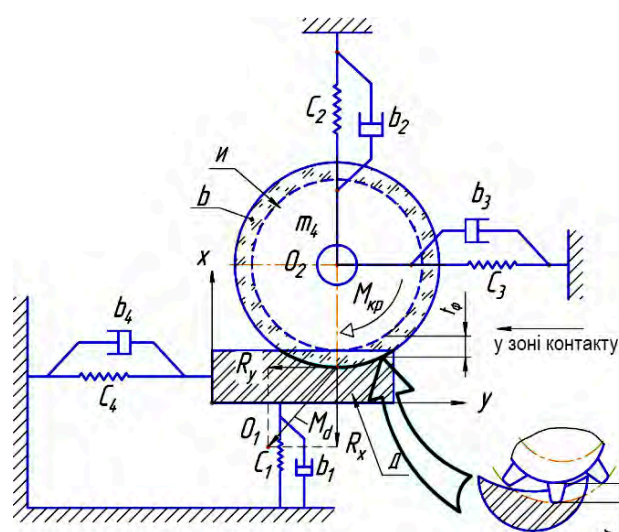


Рис. 2. Спрощена розрахункова схема технологічної системи

система верстата. Оскільки силове

навантаження при обробці повинне здійснюватися так, щоб запобігти виникненню

коливань робочого органа, а з іншого

боку, забезпечувати максимально точне

розташування різального круга відносно

напрямку армування, доцільним

технічним рішенням є використання

механізму паралельної структури.

Запропоновано структурну схему

механізму з кінематичною надлишковістю

(рис. 3), який має 6 ступенів вільності, 6

приводів та 5 керованих координат.

Розроблено відповідну компоновку

маніпуляційної системи верстата

паралельної структури з кінематичною

надлишковістю та робочим органом із

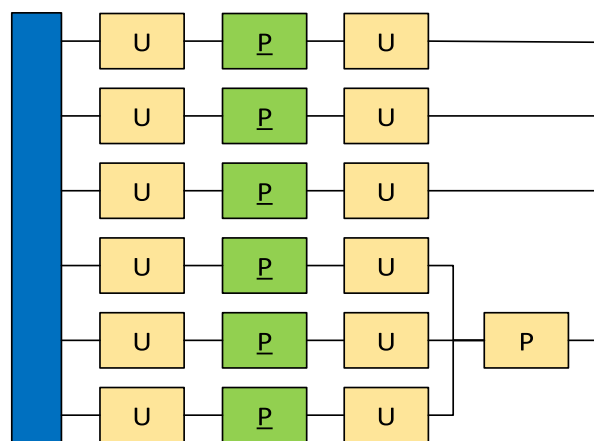


Рис. 3. Структура паралельного механізму з кінематичною надлишковістю

спільною віссю шарнірів (рис. 4, а). Три шарнірно закріплені на основі 1 штанги 2 приєднуються до передньої частини робочого органа 3 (рис. 4, б), яка містить шпindelь верстата, а інші три штанги 4 аналогічно приєднуються до задньої частини, яка має можливість переміщення вздовж спільної осі шарнірів та робочого органа. Механізм з такою конструкцією робочого органа має кінематичну надлишковість, яка виявляється у наявності додаткової координати s – взаємного переміщення частин робочого органа, яке не впливає на його просторове положення та орієнтацію, але дозволяє позбавитись від невизначеності та внутрішніх напружень у просторовій несучій системі приводів механізму.

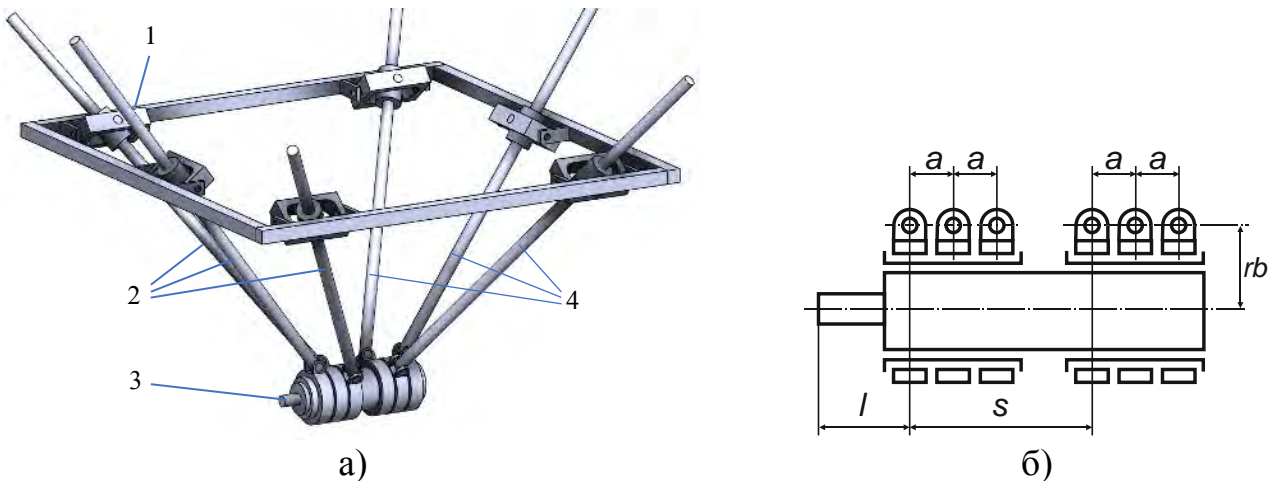


Рис. 4. Механізм паралельної структури з кінематичною надлишковістю:
а) загальна схема; б) схема робочого органа

Кінематичні залежності механізму встановлюють зв'язок між вектором узагальнених координат робочого органа $\mathbf{X} = (x, y, z, s, \psi, \theta)^T$, який задає просторове положення робочого органа (x, y, z) , його кутову орієнтацію (ψ, θ) та переміщення s , та вектором координат приводів $\Theta = (q_1, q_2, \dots, q_n)^T$, який містить положення кожного приводу (довжину штанг механізму).

Довжину ланок ρ_i можна визначити згідно розрахункової схеми (рис. 5, а) як абсолютну величину вектора $\overline{A_i B_i}$, який з'єднує шарніри робочого органа та основи:

$$\rho_i = \left| (r_{OA_i} - r_{OO'}) - R \cdot r_{O'B_i} - \frac{[(R \cdot r_{O'B_i}) \times (r_{OA_i} - r_{OO'})] \times (R \cdot r_{O'B_i})}{\|[(R \cdot r_{O'B_i}) \times (r_{OA_i} - r_{OO'})] \times (R \cdot r_{O'B_i})\|} \cdot rb \right|, \quad (8)$$

де R – матриця повороту, rb – радіус кільцевого шарніру робочого органа.

Прямі кінематичні залежності розв'язуються методом ітерацій. Аналіз кінематичних залежностей (рис. 6) дозволив встановити діапазони зміни довжини ланок при обробці деталей у заданій робочій зоні.

Матриця жорсткості механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю, який має робочий орган із спільною віссю шарнірів, визначається як сума матриць жорсткості шести ланок, що розглядаються як лінійні пружини, та одної ланки, що розглядається як крутильна пружина (рис. 5, б):

$$K = \sum_{i=6}^n k_n \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ \mathbf{r}_{A_i} \times \mathbf{n}_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{n}_i \\ \mathbf{r}_{A_i} \times \mathbf{n}_i \end{bmatrix}^T + k_k \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{r}_{A_1} \times \mathbf{n}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{r}_{A_1} \times \mathbf{n}_1 \end{bmatrix}^T, \quad (9)$$

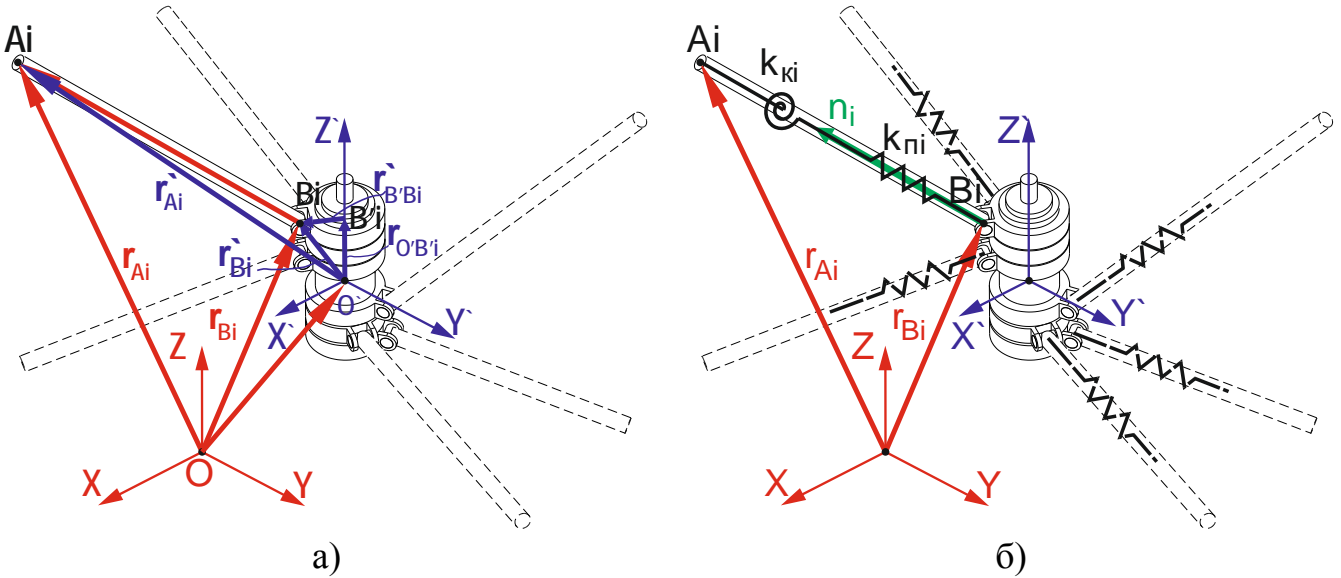


Рис. 5. Розрахункові схеми механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю: а) геометрична; б) до визначення жорсткості

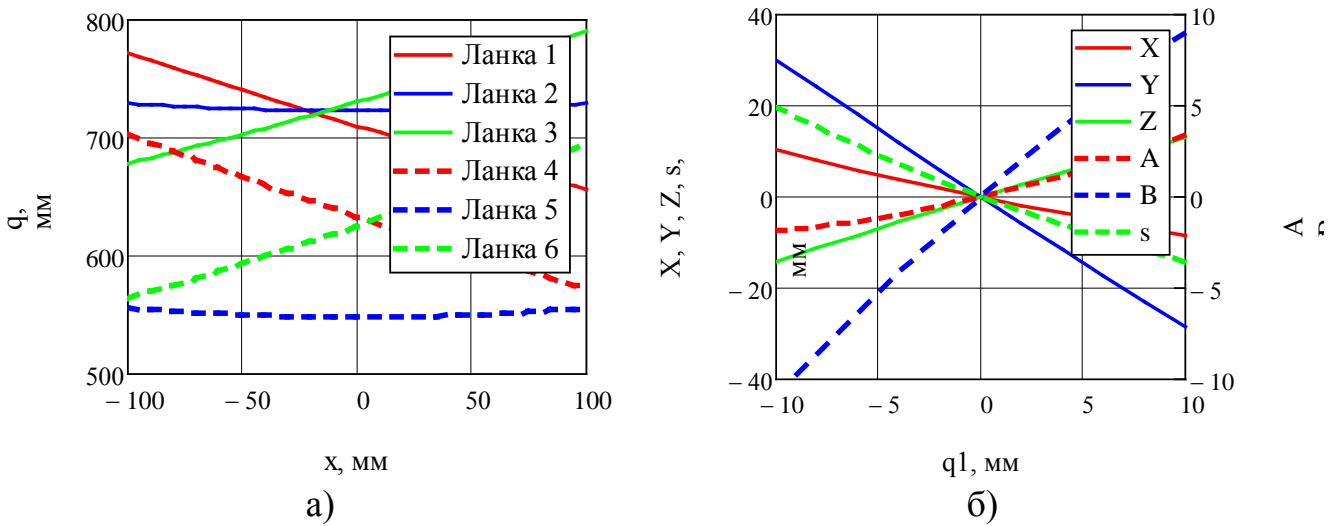


Рис. 6. Приклади зворотної (а) та прямої (б) кінематичних залежностей

де k_{pi} – поступальна жорсткість ланки; k_{ki} – крутильна жорсткість ланки; \mathbf{n}_i – одиничний вектор осі штанги, який визначається наступним чином

$$\mathbf{n}_i = \frac{(r_{OA_i} - r_{OO'}) - R \cdot r_{O'B_i} - \frac{[(R \cdot r_{O'B_i}) \times (r_{OA_i} - r_{OO'})] \times (R \cdot r_{O'B_i})}{|[(R \cdot r_{O'B_i}) \times (r_{OA_i} - r_{OO'})] \times (R \cdot r_{O'B_i})|} \cdot rb}{\left| (r_{OA_i} - r_{OO'}) - R \cdot r_{O'B_i} - \frac{[(R \cdot r_{O'B_i}) \times (r_{OA_i} - r_{OO'})] \times (R \cdot r_{O'B_i})}{|[(R \cdot r_{O'B_i}) \times (r_{OA_i} - r_{OO'})] \times (R \cdot r_{O'B_i})|} \cdot rb \right|} \quad (10)$$

За допомогою отриманих залежностей визначено характеристики жорсткості у робочій зоні (табл. 1). Встановлено, що середня жорсткість у напрямках координатних осей перевищує жорсткість штанги від 1,4 до 2,8 разів. Найбільша середня жорсткість у напрямку осі Y, найменша – у напрямку осі X, причому ці показники приблизно вдвічі більші, ніж у платформи Стюарта. Середня жорсткість у

всіх напрямках дорівнює подвійній жорсткості штанги, що перевищує середню жорсткість платформи Стюарта та пентапода на 25 – 35%.

Таблиця 1

Характеристики жорсткості

№	Параметр	Значення	
1	Робоча зона X×Y×Z, мм	200×200×200	
2	Відношення середньої жорсткості до жорсткості штанги	X	1,471
		Y	2,883
		Z	1,646
3	Відношення загальної середньої жорсткості до жорсткості штанги	2,000	

Виконано оцінку температури у плямі контакту, виходячи з того, що об'ємний зйом матеріалу складе $W_r' = \frac{\pi \psi^2}{2} l_p n$, а різниця в об'ємі зменшить t_f із одночасним зростанням пружних деформацій (і, відповідно, сили F у місці контакту).

Результати обчислень (рис. 7) дозволили зробити висновок, що забезпечення раціонального теплового режиму можливе лише при відповідній зміні режимів ведення обробки, шляхом зміни швидкості переміщень інструменту відносно оброблюваної поверхні.

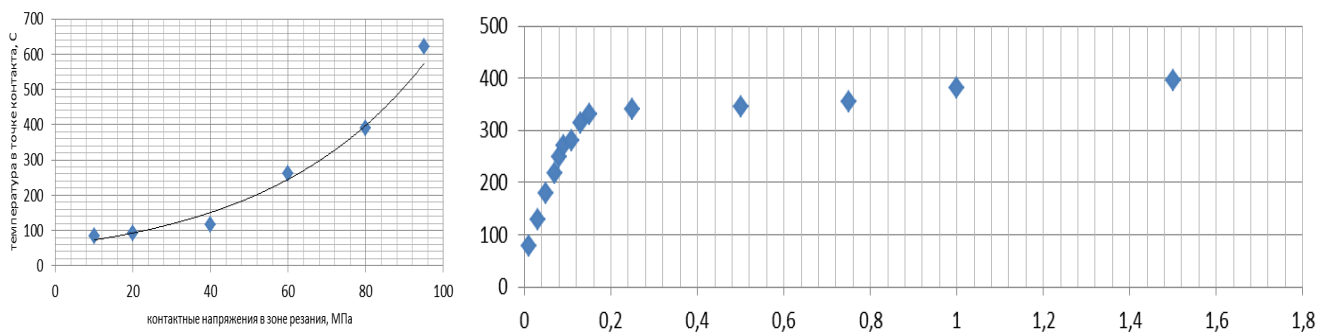


Рис. 7. Очікуване підвищення температури T в зоні різання залежно від контактних напружень δ (а) та зміна температури на поверхні ($^{\circ}\text{C}$) з плином часу (хв) залежно від умов контакту (б)

У четвертому розділі наведені результати досліджень температури у зоні різання, що дозволило ідентифікувати моделі для визначення розподілу температур в процесів оброблення.

Для встановлення закономірності зміни температури залежно від стану поверхні диску, напрямку укладки армувальних волокон, а також силового навантаження зони різання, тобто визначення $T_i = f(F_p, \tau, A)$ проведено визначення параметрів сили та температури T_i в автоматичному режимі (рис. 8). Використовувалися зразки, орієнтовані у площині X-Y ($A=1$) та Z-X ($A=2$), що дало змогу отримати кілька діаграм нагрівання диску. Обробку виконували так, щоб забезпечити різання як чистими (незабрудненими) дисками, так і дисками із забрудненням.



Рис. 8. Стенд для вимірювання температури матеріалу

Перед випробуваннями диски (8 шт.) піддали метрологічному контролю, визначивши їх геометричні параметри шляхом вимірювання плинного радіусу r_j^i та ширини h_j^i при встановленні на оправку шпинделя відрізного верстата мод. FDB Maschinen GYQ400B/220, побудували кругові діаграми та встановили висоту вильоту абразивних зерен відносно поверхні круга δ_j^i . Також визначено кількість зерен n та встановлено масу дисків m_k^p .

Обробку виконували з лінійною подачею 20,0 мм/с, частота обертання диску – 5000 хв⁻¹, що відповідає лінійній швидкості різання 30,0 м/с. Глибина різання склала 15,0 мм. Було встановлено, що зростання зусилля різання F_p супроводжує зростання температури T_i ; при цьому для нових дисків (без забруднення поверхневого шару) спостерігається певна стабілізація температурного режиму; зі збільшенням бруду на поверхні і з відповідним зниженням різальної здатності при постійній подачі спостерігає поступове зростання температури. Критичне забруднення веде до стрімкого зростання як сили (практично припиняється процес мікрорізання і спостерігається явище термосилового втиснення диску з його деформуванням практично до повної втрати стійкості (рис. 9)), так і температури в точці контакту, яка може сягати 700-900 °С.

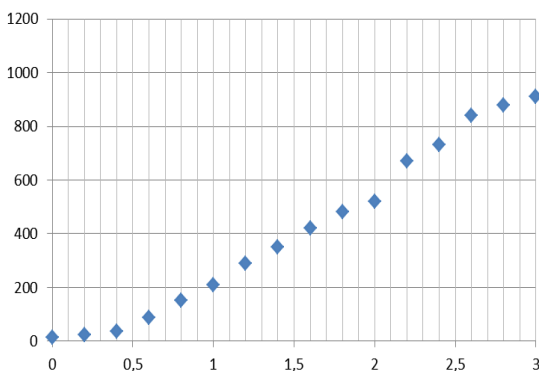


Рис. 9. Стрімке зростання температури T_i , °С, в зоні різання при утворенні на поверхні круга забруднення (час у с) при забрудненні круга

Побудовано залежність величини об'ємного зйому матеріалу та температури в зоні різання у функції глибини занурення круга. З діаграми рис. 10 стає очевидним, що залежно від кількості одночасно працюючих у зоні контакту зерен температура змінюється нерівномірно. Таким чином, існує певне значення кількості частинок, які взаємодіють із оброблюваним матеріалом, для якої максимальна температура внаслідок засалювання поверхні буде найбільшою. Це явище можна пояснити тим, що засалювання міжзереного простору вуглецевим пилом відбувається

нерівномірно: в одному випадку утворюються сталі конгломерати, які практично не видаляються дією на них волокон матеріалу; в іншому випадку відбувається більш інтенсивне очищення поверхні за рахунок пружного відновлення вугільних волокон, які ще певний час знаходяться в контакті з поверхнею круга.

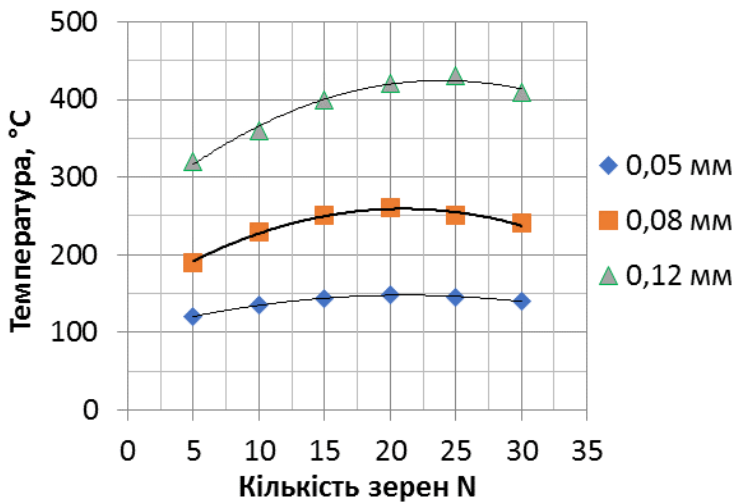


Рис. 10. Зміна температури у зоні контакту залежно від кількості одночасно працюючих зерен, що рухаються з однаковою швидкістю, для різної глибини різання матеріалу

Також дослідженнями було встановлено, що зі збільшенням часу роботи кругом щільність залипання продуктів різання на поверхні круга зростає, а обсяг видалення речовини при різанні – зменшується. Дане зменшення обумовлене пружними відтисненнями у верстатній системі, які зростають при зростанні сил різання. Отже, зміна профілю різального круга веде до зменшення продуктивності процесу, зростання пружних деформацій, зміни параметрів якості оброблених заготовок.

Порівнюючи встановлену експериментально площу контакту із розрахованою теоретичною s_t для випадку різання із поступальною подачею, отримали щільність забруднення поверхні круга ψ_k , $\psi_k = s_t / \bar{s}$.

Вимірювання контрольованих величин і розрахунок параметру ψ_k дозволили побудувати залежність останнього у функції часу. Видно, що дана залежність задовільно описується лінійною регресійною моделлю виду $y = b_0 + b_1 x$:

$$\psi = 0,4894 + 0,0035 \tau. \quad (11)$$

Оскільки явища у зоні контакту інструменту з оброблюваним матеріалом обумовлюються умовами термосилового навантаження, можна припустити, що зміна плями контакту впливатиме також і на показники якості обробки.

З цією метою після закінчення обробки перевіряли: 1) якість поверхневого шару на предмет відсутності розшарувань та спучень, що характеризується відношенням товщини утворених дефектів до товщини оброблюваного матеріалу $R = \frac{\delta_n}{h}$; 2) шорсткість поверхні, оцінену за параметром Ra . Додатково визначали

зусилля різання P , Н при $S = \text{const}$, які відображали умови роботи інструменту; порівнювали також і обсягу зйому матеріалу w_m , отриманому при стабільному зусиллі різання $P = \text{const}$. Виміри здійснювали на основі профілограм поверхні, отриманих електронними засобами на РЕМ-106-И. Випробуванням піддавали нові круги та гідроструменево очищені, з відновленим профілем поверхні.

Результати досліджень представлені на рис. 11. Оскільки було показано, що істотну роль у термосиловому навантаженні поверхні відіграє глибина різання h_p , на приведених діаграмах по осі абсцис зазначено саме цей параметр.

Встановлено, що параметр R незначно нелінійно зростає зі зростанням h , з уповільненням зростання при перевищенні товщини понад 10-12 мм. Залежність може бути визначена поліномом виду $y=b_0+b_1x+b_2x^2$. При цьому розбіжність між результатами обробки матеріалу новим кругом та очищеним неістотна; інша картина спостерігається при аналізі шорсткості поверхні.

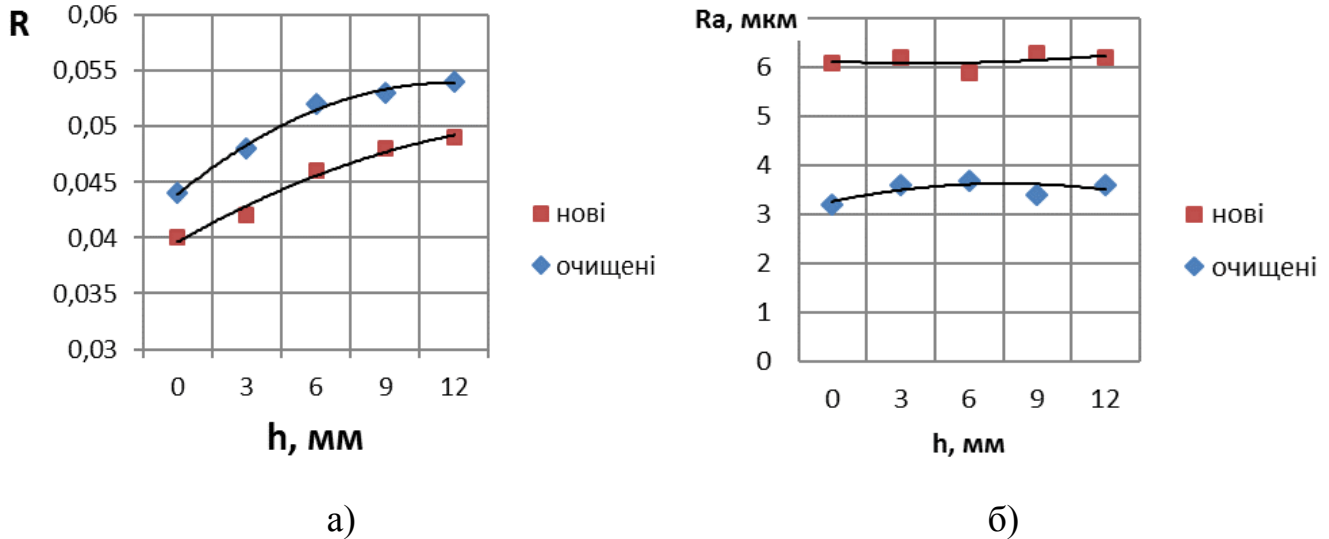


Рис. 11. Зміна якості поверхневого шару залежно від глибини різання (а) та шорсткості поверхневого шару при зміні глибини h (б)

Так, встановлено, що застосування кругів із малою кількістю алмазних зерен дозволяє отримати шорсткість поверхні на рівні 6,3 ... 3,2 мкм за параметром Ra ; більший рівень шорсткості відповідає новим кругам. Дану особливість можна пояснити тим, що круги, будучи у вжитку, мають профіль із меншим вильотом частинок абразиву; більша пляма контакту забезпечуватиме меншу шорсткість за рахунок ефекту вигладжування. При цьому параметр Ra практично не залежить від глибини різання.

Перевірка рівня зусиль при постійній подачі $S=\text{const}$ показала, що існує істотна відмінність у силі різання кругів нового та такого, що попрацював певний час (навіть очищеного), що вимагає обов'язкового врахування ефекту зростання сили різання який більше проявляється при обробці матеріалів із суттєвими глибинами різання h .

Для більш точного уявлення щодо механізмів руйнування нещільного матеріалу виконаний аналіз дисперсності та виду отриманого при абразивній обробці шламу (рис. 12). Розміри частинок шламу порівняні із розмірами абразивних зерен і приблизно дорівнюють величині пружного відновлення матеріалу після зняття зусиль від інструменту.

Дослідженнями також підтверджено, що погіршення якості поверхневого шару при обробці карбон-карбонівих нещільних матеріалів пов'язане перш за все зі зростанням температури в зоні різання. При цьому зернистість круга та його щільність однозначно визначають розміри частинок шламу, а також формують структуру поверхні (рис. 13). Отже, для забезпечення високої якості поверхневого шару оброблюваних заготовок слід використовувати круги, в яких застосовуються дрібніші алмазні зерна.

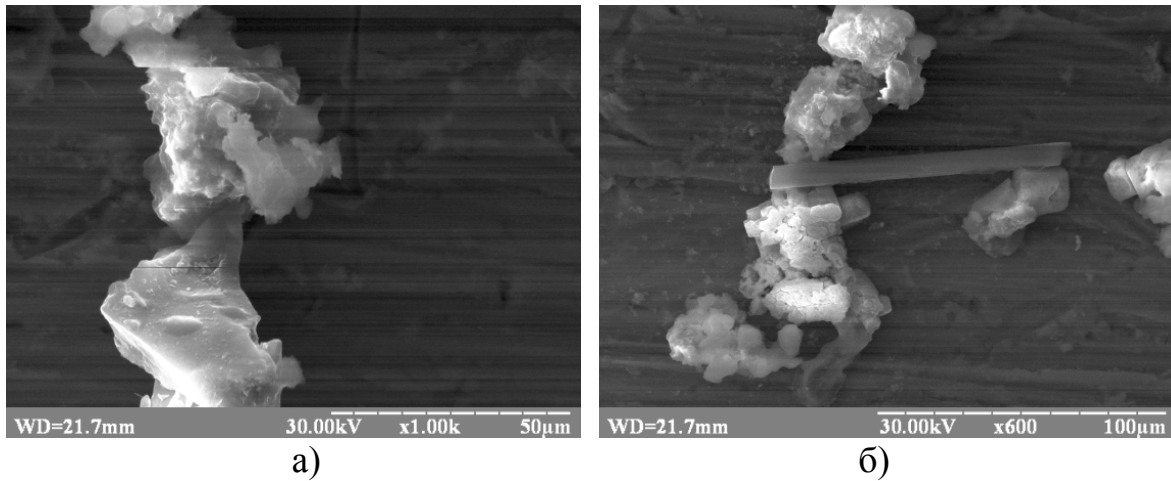


Рис. 12. Шлам, утворений при обробці карбон-карбонівих заготовок: а) частинки піролітичного вуглецю; б) фрагменти карбонівих волокон

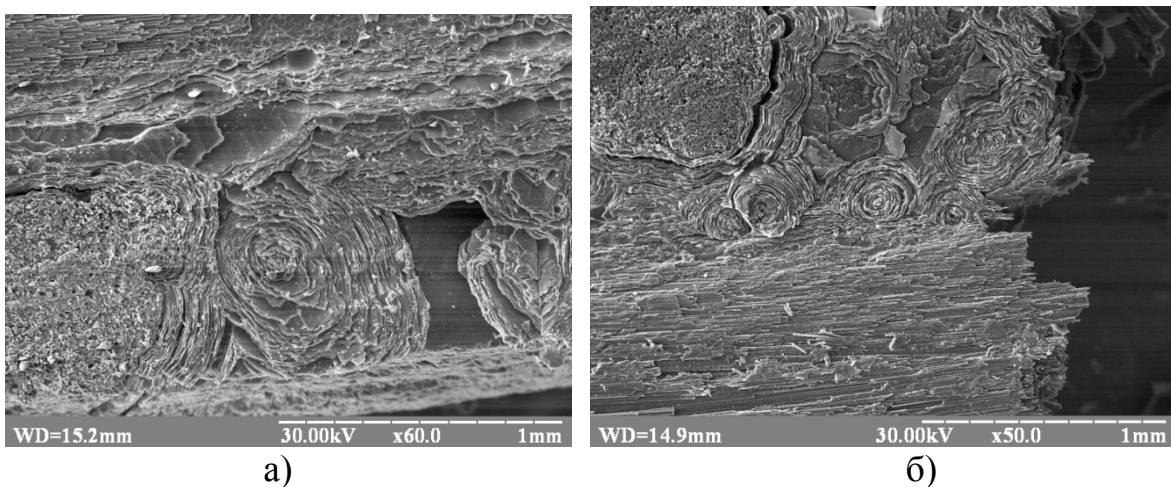


Рис. 13. Структура поверхневого шару: а) при обробці інструментом із точковим контактом з поверхнею; б) при обробці інструментом із підвищеною площею контакту (спостерігаються розшарування та поверхневі дефекти)

Досліджено вплив зміни жорсткості верстатної системи на динамічні характеристики процесу мікрорізання. Встановлено, що із зменшенням жорсткості спостерігається зростання динамічних складових за амплітудою на 50–120% та зростання тривалості перехідного процесу до 0,3–1,2 с (рис. 14).

Експериментальне вимірювання жорсткості дослідної моделі (рис. 15, а) проводились при навантаженні у напрямку осей X, Y та Z величиною 100 Н, пружні деформації вимірювались індикаторами (рис. 15, б). Для порівняння додатково проведено вимірювання жорсткості моделі за схемою «пентапод» з 5 штангами.

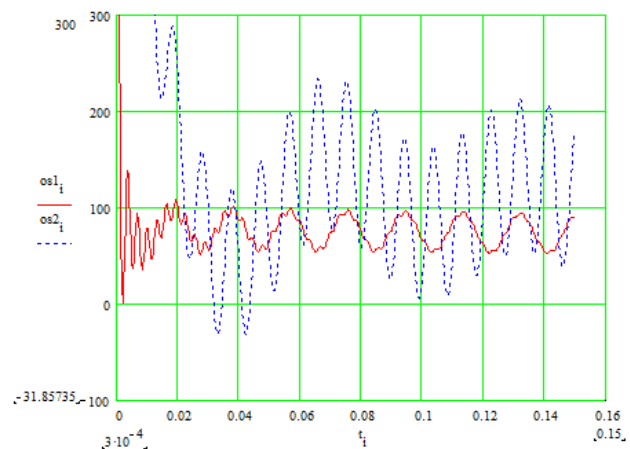


Рис. 14. Порівняння перехідних процесів несучої системи з підвищеною (а) та нормальною жорсткістю (б)

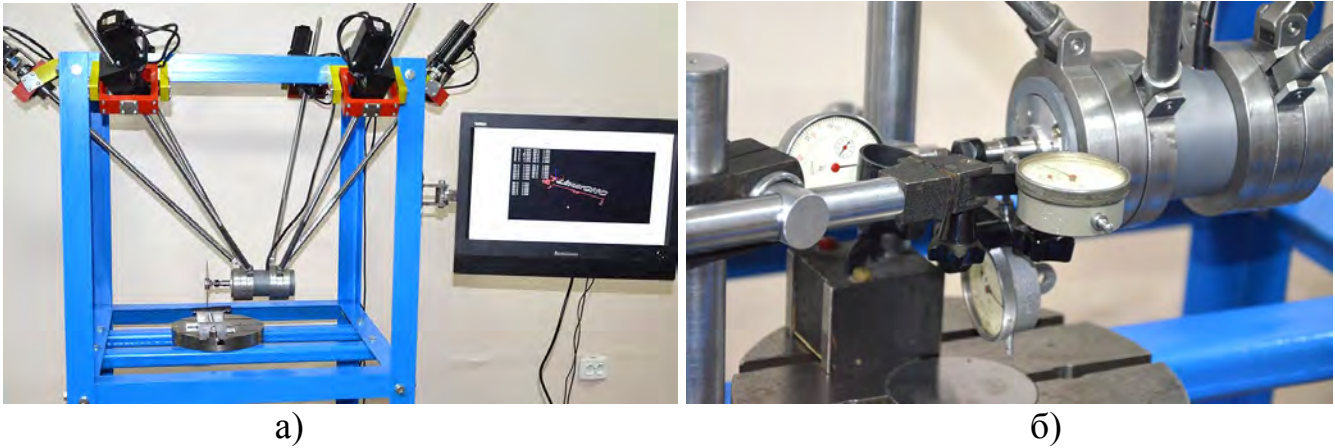


Рис. 15. Дослідна модель верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю: а) загальний вигляд; б) вимірювання жорсткості

Результати вимірювання показали, що жорсткість запропонованого надлишкового механізму на 16 – 28% більша, ніж механізму за схемою «пентапод» з 5 штангами.

П'ятий розділ присвячено практичній реалізації результатів роботи. Розроблено інженерну методику визначення швидкості робочої подачі (як залежного фактору) від умов виконання обробки, використуваного круга, схеми технологічного налагодження.

Зазвичай при призначенні режимів обробки матеріалу головну увагу зосереджують на встановленні допустимої швидкості об'ємного зйому матеріалу W , яка безпосередньо визначається маркою застосовуваного абразивного круга, його товщиною b та густиною абразивних частинок на периферії n , висотою виступу частинки над поверхнею δ , потужністю двигуна головного приводу N , глибиною пазу h (або товщиною оброблюваного матеріалу), а також швидкістю робочої подачі s . Як правило, потужність приводу N є лише обмежуючим параметром, у той час як швидкість подачі задається. Отже, можна вважати, що саме s має функціонально визначатися іншими прийнятими до уваги факторами:

- глибина різання, або товщина оброблюваного матеріалу h ;
- товщина круга b ;
- марка круга, яка відображає густину абразивних частинок n ;
- виступ частинок над поверхнею δ ;
- жорсткість важільної системи c ;
- швидкість різання v_p , яка залежить від діаметра круга D_k та частоти обертання шпинделя;
- параметр матеріалу K .

Узагальнюючим параметром виступатиме швидкість подачі s . Проведений у подальшому регресійний багатофакторний аналіз дозволив отримати регресійне рівняння, рівень значимості якого складає 88,67%:

$$s = 21,0015 - 1,91667b - 0,00625c + 1,96429\delta - 0,4125h - 0,0208333n. \quad (12)$$

Головні ефекти дії кожного фактору подані на рис. 16, а, порівняння ступеня впливу на результативний параметр s – на рис. 16, б.

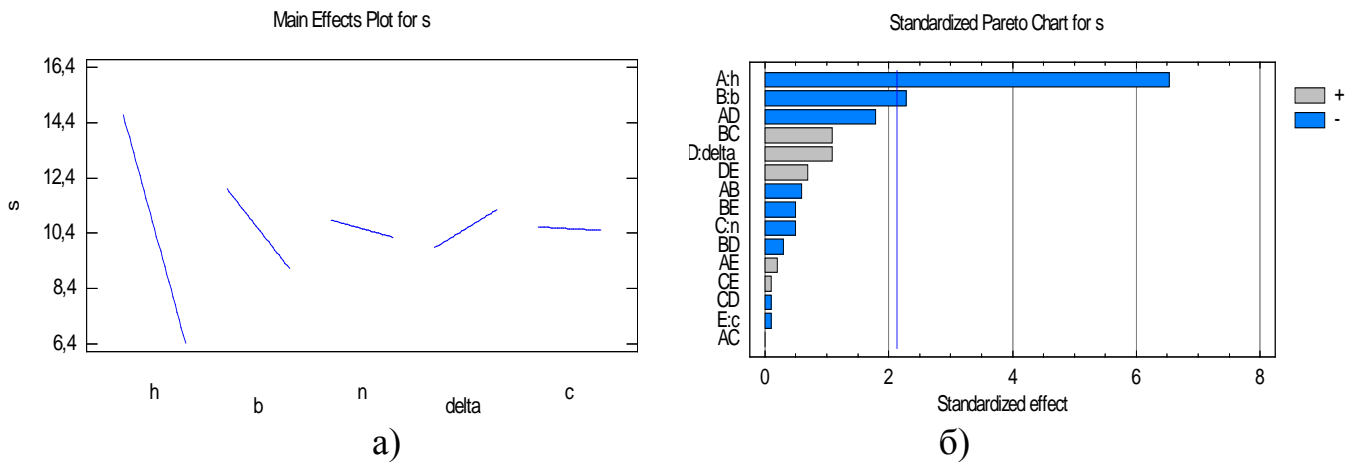


Рис. 16. Головні ефекти дії факторів (а) та порівняння ступеня дії факторів на результативний параметр s

Запропоноване нове технічне рішення верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, який має підвищену жорсткість у порівнянні з відомими верстатами із спільною віссю шарнірів робочого органа. Наведено його конструктивне виконання та передбачувані технічні характеристики. Запропоновано ряд перспективних схем багатокординатних верстатів паралельної структури.

Приведене економічне обґрунтування прийнятих технічних рішень показало, що використання розробок дозволяє скоротити витрати на обробку на 25-30%.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведено вирішення науково-прикладної задачі підвищення якості розрізання карбон-карбонових композиційних виробів на основі встановлення закономірностей формування поверхневого шару при впливі абразивним інструментом за рахунок забезпечення раціональних умов різання маніпуляційною системою верстата паралельної структури.

1. Розроблено фізичну модель взаємодії та запропоновано математичний опис теплових явищ у зоні різання, при яких інструмент отримує деформування. У якості інструменту розглянуто алмазовмісний відрізний круг малої щільності. Показано, що нерівномірне тепловиділення, яке може призвести до локального нагріву інструменту до температур 1050-1250 К, пов'язане зі зміною динамічної плями контакту поверхні інструменту, забрудненої частинками видаленого матеріалу (шламом), та поверхні обробки і обумовлене динамічними властивостями верстата, веде до зміни продуктивності обробки та до зростання деструкції поверхневого шару за рахунок зміни термосилового навантаження.

2. Запропоноване нове технічне рішення верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю, який має робочий орган із спільною віссю шарнірних опор, розділений на дві частини, які можуть рухатись відносно спільної осі шпинделя та шарнірних опор. Показана доцільність його застосування для маніпулювання шпинделем із відрізним кругом на верстаті для обробки карбонів композиційних виробів. На основі встановлених кінематичних залежностей визначено матрицю просторової жорсткості 6×6 , яка характеризує жорсткість ТОС.

3. Встановлено, що запропонованому механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю властива підвищена жорсткість у порівнянні з повнопаралельними багатокоординатними механізмами, в тому числі із спільною віссю шарнірів робочого органа. Експериментальними вимірюванням на розробленій та виготовленій моделі верстата паралельної структури з кінематичною надлишковістю підтверджено, що величина жорсткості надлишкового механізму на 16 – 28% більша у порівнянні з схемою «пентапод».

4. Дослідженням впливу зміни жорсткості верстатної системи на динамічні характеристики процесу мікрорізання встановлено, що із зменшенням жорсткості спостерігається зростання динамічних складових за амплітудою на 50–120% та зростання тривалості перехідного процесу до 0,3–1,2 с. Таким чином, підвищення характеристик жорсткості технологічної системи дозволяє не лише покращити точність різання, але й зменшити пляму контакту і тепловиділення в зоні різання.

5. На основі ідентифікації моделі взаємодії інструменту із композиційним карбоновим матеріалом отримано ряд регресійних залежностей для встановлення раціональних умов обробки, розроблено інженерну методику прогнозування якості отриманого поверхневого шару. Наведено конструктивне виконання та передбачувані технічні характеристики верстата паралельної структури для обробки карбових композитних виробів.

6. Запропоновані методики, математичні моделі і технічні рішення впроваджено на ТОВ «Таксі-комфорт», м. Кременчук, а також використано у навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологічне обладнання з паралельною кінематикою» і «Теорія різання».

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Кириченко А. Н., Метак Аль Ибрахими, Щетинин В. Т., Ченчевая О. А. Повышение качества абразивной резки карбон-карбонových композитов за счет обеспечения рациональных условий динамического контакта. *Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського*. Кременчук, 2018. Вип. 5 (112). С. 94–102. (включено до наукометричних баз даних «Ulrich's Web Global Serials Directory», eLIBRARY, «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor», «Scientific Indexing Services»).

2. Аль Ібрахімі Метак М. А. Возможности расширения ориентационных возможностей многокомпонентных верстатов. *Наукові нотатки* : міжвуз. збірник. Луцьк, 2018. Вип. № 63. С. 8–13. (включено до наукометричної бази даних РИИЦ).

3. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М. А. Робочий простір та особливості 5-осьового паралельного верстата з надлишковими приводами. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво* : наук. журнал, Луцьк, 2018. Вип. 30–31. С. 196–200. (включено до наукометричних баз даних РИИЦ, «Universal Impact Factor», «Open Academic Journals Index»).

4. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак. Багатокоординатний верстат з надлишковим механізмом паралельної структури та спеціальним робочим органом. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* : збірн. наук. праць КНТУ. Кропивницький, 2017. Вип. 30. С. 57–64.

5. Аль Ібрахімі Метак М. А. Математична модель узагальнених координат робочого органа багатокоординатного верстату паралельної структури з надлишковим приводом. *Наукові доповіді НУБІП України* : електронне видання. – Вип. 4(74), вересень 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2018.04.020>. (стаття включена до наукометричних баз даних «Ulrich's Web Global Serials Directory», «Google Scholar», «Scientific Indexing Services», «BASE», «MIAR», «AGRIS», «ResearchBib», «USJ», «Index Copernicus»).

6. Kyrychenko A., Al-Ibraheemi Metak Muhammad. Practical application of criteria for the evaluation of the properties of the layouts of multi-axis machines. *Sciences of Europe*. 2018. Vol.1, No. 27. P. 64–69. (включено до наукометричних баз даних «Directory of Indexing and Impact Factor», eLIBRARY, «General Impact Factor», «International Scientific Indexing»).

7. Аль Ібрахімі Метак М.А. Возможности повышения продуктивности обработки деталей за счет использования станков параллельной структуры с избыточными приводами и специальным рабочим органом. *Modern Science – Moderní věda*. Česká republika, Nemoros, 2018. № 4. P.160–167. (включено до наукометричних баз даних eLIBRARY, «Google Scholar», «Index Copernicus»).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Метак Мохамед Аль Ібрахімі, Кириченко А. М. Вдосконалення багатокоординатних верстатів паралельної структури введенням надлишкових приводів. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2016)*: матеріали VI міжнар. наук.-практ. конф. (26–29 квіт. 2016 р.). Чернігів, 2016. С. 126.

9. Метак Мохамед Аль Ібрахімі, Кириченко А. М. Особливості кінематики багатокоординатних верстатів паралельної структури з надлишковими приводами. *Прогресивні напрямки розвитку технологічних комплексів* : збірник наук. праць IV міжнар. наук.-техніч. конф. ТК–2016, 26–28 трав. 2016 р. Луцьк, 2016. С. 55–57.

10. Кириченко А. М., Гречка А. І., Аль-Ібрахімі Метак М. А. Визначення ефективної схеми верстата комбінованої структури. *Сучасні технології промислового комплексу* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., вип. 2. Херсон, 2016. С. 57–60.

11. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М. А. Верстат паралельної структури з надлишковими приводами та спеціальним робочим органом. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2017)* : матеріали тез доповідей VII міжнар. наук.-практ. конф. (24–27 квіт. 2017 р.) : у 2-х т. Чернігів, 2017. Т. 1. С. 136–137.

12. Кириченко А. М., Аль Ібрахімі Метак М. А. Компоновка верстата паралельної структури із спеціальним робочим органом. *Обладнання і технології сучасного машинобудування* : матеріали всеукр. наук.-практ. конф. пам'яті Нагорняка С. Г., 11–12 травня 2017 р. Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2017. С. 85.

13. Кириченко А. М., Аль-Ібрахімі Метак. Збільшення діапазону кутів орієнтації робочого органа багатокоординатного верстата паралельної структури. *Сучасні технології промислового комплексу – 2017* : матеріали III-ої міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, 12 – 17 вересня 2017 р.). Херсон : ХНТУ, 2017. С. 143–144.

14. Кириченко А. М., Аль-Ібрахімі Метак М. Нова конструкція робочого органа надлишкового верстата паралельної структури. *Сучасні технології промислового комплексу: базові процесні інновації – 2018* : матеріали IV-ої міжнар. наук.-практ. конф., вип. 4. Херсон, 2018. С. 99.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

15. Привід переміщення вихідного органа верстата з шістьма штангами: Пат. 112828 Україна: МПК В23Q 5/00. № 201607885; заявл. 15.07.16; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. 4 с.

16. Привід переміщення вихідного органа верстата з п'ятьма штангами: Пат. 114304 Україна : МПК В23Q 5/00. № 201607831; заявл. 15.07.16; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5. 4 с.

17. Привід переміщення вихідного органа верстата з чотирма штангами: Пат. 114306 Україна: МПК В23G 5/02. № 201607833; заявл. 15.07.16; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5. 4 с.

АНОТАЦІЯ

Аль-Ібрахімі Метак М. А. Забезпечення раціональних умов абразивного різання композиційних карбонових виробів на верстатах паралельної структури. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної задачі підвищення якості розрізання карбон-карбонових композиційних виробів на основі встановлення закономірностей формування поверхневого шару при впливі абразивним інструментом за рахунок забезпечення раціональних умов різання маніпуляційною системою верстата паралельної структури.

У роботі розроблено фізичну модель взаємодії та запропоновано математичний опис теплових явищ, які викликають деформацію інструмента. Показано, що надлишок тепла викликатиме різке зростання температури на периферії інструменту та відповідно вестиме до його деформацій, внаслідок чого якість обробки поверхонь погіршується, а ширина різку зростає. Встановлено, що зі збільшенням часу роботи кругом щільність залипання продуктів різання на поверхні круга зростає, а обсяг видалення речовини при різанні зменшується. Дане зменшення обумовлене пружними деформаціями у верстатній системі, які зростають при зростанні сил різання. Зміна профілю різального круга веде до зменшення продуктивності процесу, зростання пружних деформацій, погіршення якості оброблених заготовок. Доведено, що для підвищення якості обробки необхідно підвищувати жорсткість, забезпечуючи її раціональне значення при зміні стану інструменту.

Запропоновано нове технічне рішення верстата на основі механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю, сформульовано його кінематичні залежності та визначено матрицю просторової жорсткості. Встановлено, що запропонованому механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю властива підвищена жорсткість у порівнянні з повнопаралельними механізмами, та показана доцільність його застосування у верстаті для абразивної обробки, що дозволяє не лише підвищити точність різання, а і зменшити пляму контакту і тепловиділення в зоні різання. Експериментальними вимірюванням на розробленій та виготовленій моделі верстата підтверджено, що жорсткість механізму паралельної структури з кінематичною надлишковістю на 16–28% більша у порівнянні з відомими.

Показано, що використання запропонованих розробок та методик визначення режимів абразивного різання дозволяє скоротити витрати на обробку на 25–30%.

Ключові слова: карбоновмісні композиційні матеріали, абразивне різання, якість обробки, абразивний диск, тепловиділення, верстат паралельної структури, кінематична надлишковість, робочий орган, жорсткість.

АННОТАЦІЯ

Аль-Ибрахими Метак М. А. Обеспечение рациональных условий абразивной резки композиционных карбоновых изделий на станках параллельной структуры. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты». – Центральноукраинский национальный технический университет, Кропивницкий, 2019.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной задачи повышения качества резки карбон-карбоновых композиционных изделий на основе установления закономерностей формирования поверхностного слоя при воздействии абразивным инструментом за счет обеспечения рациональных условий резки манипуляционной системы станка параллельной структуры.

В работе разработана модель взаимодействия и предложены математическое описание тепловых явлений, которые вызывают деформацию инструмента. Показано, что избыток тепла будет вызывать резкое повышение температуры на периферии инструмента и соответственно приведет к его деформации, вследствие чего качество обработки поверхностей ухудшается, а ширина реза возрастет. Установлено, что с увеличением времени работы вокруг плотность залипания продуктов резания на поверхности круга растет, а объем удаления вещества уменьшается. Данное уменьшение обусловлено упругими деформациями в станочной системе, которые растут при росте сил резания. Изменение профиля режущего круга ведет к уменьшению производительности процесса, росту упругих деформаций, ухудшение качества обработанных заготовок. Доказано, что для повышения качества обработки необходимо повышать жесткость, обеспечивая ее рациональное значение при изменении состояния инструмента.

Предложено новое техническое решение станка на основе механизма параллельной структуры с кинематической избыточностью, сформулированы его кинематические зависимости и определена матрица пространственной жесткости. Установлено, что предложенному механизму параллельной структуры с кинематической избыточностью свойственна повышенная жесткость по сравнению с полнопараллельными механизмами, и показана целесообразность его применения в станке для абразивной обработки, что позволяет не только повысить точность резки, а и уменьшить пятно контакта и тепловыделение в зоне резания. Экспериментальными измерениями на разработанной и изготовленной модели станка подтверждено, что жесткость механизма параллельной структуры с кинематической избыточностью на 16–28% больше по сравнению с известными.

Показано, что использование предложенных разработок и методик определения режимов абразивного резания позволяет сократить затраты на обработку на 25–30%.

Ключевые слова: карбонсодержащие композиционные материалы, абразивная резка, абразивный диск, качество обработки, тепловыделение, станок параллельной структуры, кинематическая избыточность, рабочий орган, жесткость.

ABSTRACT

Alibraheemi Methaq M. A. Providing rational conditions for abrasive cutting of composite carbon pieces on parallel kinematic machines. – Qualifying scientific work as manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.03.01 "Processes of machining, machines and tools". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2019.

The dissertation is dedicated to the solution of the scientific and applied task of improving the quality of cutting of carbon-carbon composite pieces on the basis of the establishment of regularities of the formation of the surface layer under the influence of an abrasive tool due to ensuring rational conditions of abrasive cutting by a manipulative system of a parallel kinematic machine.

In this work a physical model of interaction was developed and a mathematical description of the thermal phenomena that caused deformation of the instrument was proposed. It is shown that uneven heat dissipation is associated with a change in the dynamic contact spot of the tool surface, which is contaminated by particles of the removed material (sludge), and the surface of the treatment. Considered instrument is an abrasive wheel, mounted in a spindle of the proposed parallel kinematic machine.

The problem of heat allocation on the contact surface (peripheral and lateral surfaces of the instrument) is considered. The functional interconnections between the spot of the dynamic contact of the tool with the surface and the thermosensitive load are established. It is established that excess heat will cause a drastic temperature increase on the periphery of the instrument and, accordingly, will lead to its deformation, resulting in a deterioration in the quality of machined surface, and the width of the cutting will increase. Provision of a rational thermal conditions is possible only with a corresponding change in machining conditions, by changing the tool feed rate relative to the surface. The leading

role in the force load of the machining zone is played by the manipulation system of the machine, and the most effective in terms of controllability are parallel manipulators.

A new technical solution of parallel manipulator with kinematic redundancy was proposed, an analysis of its kinematics was carried out and the utility of application for abrasive machining was shown. It has been theoretically established that the proposed parallel manipulator possesses with increased rigidity as compared to fully parallel manipulators, including those with the common axle of the end effector joints.

The results of temperature probing in the cutting zone are presented, which allowed to identify models for determining the temperature distribution in the process of abrasive machining. A detailed analysis of degradation and damage to the wheels has been carried out and it has been shown that the wheels must be cleaned to ensure the reliability of the machining, in particular, by hydroabrasive method. This allows to stabilize the conditions of the interaction of abrasive-free tool with a loose-to-half-space, to obtain high quality indices. It is shown that there is a certain value of the number of particles that interact with the material being processed, for which the maximum temperature due to the salination of the surface will be greatest.

It has been established that with increasing time of machining, the density of sticking of cutting products on the surface of the wheel is increasing, and the removal volume of material decreases. This reduction is due to elastic deformations in the technological system, which increases with the growth of cutting forces. Thus, changing the profile of the abrasive wheel leads to a decrease in the productivity of machining, growth of elastic deformations, changes in the quality of the machined surface. The influence of the change of the machine stiffness upon the dynamic characteristics of the cutting process is investigated. It was established that with decreasing stiffness there is an increase in dynamic components in amplitude and increase in the duration of the transition process.

This made it possible to prove the assertion that in order to overcome these negative phenomena it is necessary to increase the stiffness, ensuring its rational value when the state of the abrasive wheel is being changed. It is shown that the proposed machine essentially changes the stiffness characteristics of the technological system, which allows not only to improve the accuracy of cutting, but also reduce the contact spot and heat dissipation in the cutting zone. Measurements on the manufactured model of the machine experimentally confirmed that the stiffness of the proposed parallel manipulator is 16–28% higher as compared to pentapod manipulator.

New layouts and technical solutions of multi-axis parallel machines with kinematic redundancy for abrasive machining of carbon composite pieces are offered. The engineering method of determination of machining conditions, abrasive wheel, machining setup is developed. The implemented multifactor experiment allowed to obtain simple regression equations, on the basis of which a sequence of engineering calculations of controlled parameters of the process is proposed.

The economic validation has confirmed, that the use of the proposed technical decisions allows to reduce machining costs by 25–30%.

Key words: carbon-carbon composite materials, abrasive cutting, parallel kinematic machine, abrasive wheel, machining quality, heat generation, kinematic redundancy, end effector, kinematics, stiffness.

Підписано до друку 26.04.2019 р. Формат 60x90^{1/16}.

Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9

Наклад 100 прим. Замовлення № 490.

Віддруковано на ризографі в видавничому центрі «Принт-центр»

04053, м.Київ, вул. Січових Стрільців, 26А

Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16

<http://www.printc.kiev.ua>; E-mail: printcentr@ukr.net