

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

БУДАР МОХАМЕД Р.Ф.



УДК 621.850.67:620.21

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛМАЗНО–АБРАЗИВНОГО
ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ОБРОБКИ ВИСОКОМЦІННИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.03.01 – Процеси механічної обробки,
верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі експлуатації та ремонту машин
Центральноукраїнського національного технічного університету
Міністерства освіти і науки України, м. Кропивницький

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Шепеленко Ігор Віталійович,
Центральноукраїнський національний
технічний університет, м. Кропивницький,
доцент кафедри експлуатації та ремонту машин.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кузнєцов Юрій Миколайович,
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ,
професор кафедри конструювання машин;

доктор технічних наук, професор
Лавріненко Валерій Іванович,
Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля
Національної академії наук України, м. Київ,
завідувач відділу алмазно–абразивної та фізико–технічної
обробки.

Захист відбудеться « 9 » квітня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 23.073.02 при Центральноукраїнському національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

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

Автореферат розіслано « 2 » березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.К. Дідик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Сучасний розвиток наукоємного виробництва вимагає значно більшого використання нових композиційних матеріалів – конструкційних, жаротривких, спеціального призначення та ін., обробка яких, зокрема алмазним інструментом, пов'язана з низкою проблем.

Застосування найпоширеніших скло– та вуглепластиків, карбон–карбонових матеріалів зумовлює труднощі, пов'язані з наявністю в структурі композиту високоміцних армувальних волокон (вуглецевих або високомодульних скляних), які погіршують спроможність інструмента керовано впливати на зону обробки. Особливо важкими є розділові операції, під час яких відокремлюються частини заготовки, значні за розміром (наприклад, розрізання заготовок типу КІМФ на пластини). Оскільки така обробка, як правило, є достатньо тривалою, то алмазний інструмент внаслідок деградації змінює різальні властивості. Така деградація не є однорідною і відбувається переважно в зонах, де умови обробки досить сильно відрізняються від умов усталеного різання. Ця особливість найбільш повно виявляється в нежорстких інструментах (як інструментах із додатковими ступенями вільності) – полотнах реноваторів та алмазних струнах.

Керуючись принципами та засадами функціонально–орієнтованого підходу, забезпечення раціональних умов різання композитів шляхом встановлення відповідності властивостей крайок інструменту особливостям процесу і конкретному типу композиту є дієвим способом, реалізація якого дає змогу покращити якість обробки, досягти більш повного використання масиву алмазних зерен та підвищити ефективність процесу в цілому за рахунок збільшення періоду стійкості інструменту та меншого відходу матеріалу в шлам. При цьому систематизована інформація щодо використання функціонально–орієнтованого підходу до створення інструментів нині відсутня.

Таким чином, розробка принципів та методик застосування функціонального підходу до створення алмазного інструменту є актуальним напрямком підвищення його ефективності, а дослідження й адаптація процесів формування кластерів робочих поверхонь за допомогою універсального методу лазерного термодформаційного спікання (ЛТДС) робить можливим розв'язати важливу народно–господарську задачу сучасного наукоємного виробництва – скорочення витрат при обробці високовартісних композитів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до наукової тематики кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету і пов'язана з тематикою науково–дослідної роботи кафедри «Підвищення ефективності алмазно–абразивного різання карбонових композитів на основі функціонального підходу» (номер державної реєстрації №0120U104288).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності алмазно–абразивного інструменту для різання високоміцних композиційних матеріалів на основі раціонального формування щільності, фракційності елементів алмазовмісного шару робочої поверхні інструменту засобами ЛТДС.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити модель взаємодії інструменту із додатковими ступенями вільності з високоміцним армованим матеріалом, застосувавши механізм контактування алмазних зерен з порожнистим поверхневим шаром; здійснити аналіз відмінностей процесу різання за місцем та з плином часу.

2. Використовуючи морфологічний аналіз, удосконалити функціонально-орієнтований підхід до створення обробного алмазного інструменту (кільцевих свердел, полотен ренованора, алмазних струн), придатного для обробки високоміцних композиційних матеріалів.

3. Здійснити пошук раціональних умов різання на ділянках робочих поверхонь інструменту. Застосувавши поняття кластеру, визначити його параметри для ділянок, що відрізняються умовами різання. Встановити закономірності зміни параметрів шару та характеристик кластерів поверхні інструмента для забезпечення ефективної обробки.

4. Виявити умови та обмеження сполучень окремих кластерів між собою з метою утворення робочих поверхонь різального шару в цілому.

5. Адаптувати метод ЛТДС алмазного шару у вигляді поверхневих кластерів, встановити раціональні параметри кластерів.

6. Провести випробування ефективності пропонованих заходів, а також впровадження технології у діюче виробництво.

Розв'язок поставлених задач дослідження сприятиме не тільки досягненню поставленої мети, а й доведе доцільність використання подібних функціональних технологій при виробництві інструменту, орієнтованого на обробку певної марки композиційного матеріалу.

Об'єкт дослідження – процес обробки карбон–карбонових композицій алмазно–абразивним інструментом із додатковими ступенями вільності.

Предмет дослідження – алмазно–абразивний інструмент, удосконалений за рахунок адаптації сформованих ЛТДС кластерів поверхні до умов їх роботи при різанні високоміцних композитів типу КІМФ.

Методи дослідження. Роботу виконано на основі фундаментальних положень теорії різання, механіки деформованого пружного тіла, теорії тепло–та масообміну, теорії пластичного деформування. Формулювання принципів пошуку раціональних умов роботи окремих ділянок інструментальних поверхонь здійснено з використанням теорії графів та теорії комбінаторики. Залучено сучасні методи експериментальних досліджень поверхонь твердих тіл: електронну растрову мікроскопію та енергодисперсійний рентгенівський мікроаналіз поверхні, засоби відтворення профілю поверхні. Розв'язок системи диференційних рівнянь виконано методом Рунге–Кутта, для опрацювання статистичних вибірок застосовано регресійний та дисперсійний аналізи, спеціальні статистичні програмні пакети. Достовірність теоретичних посилок, розробок, конструкцій інструментів та технологій підтверджена експериментами, виконаними в лабораторних та виробничих умовах. Перевірку працеспроможності та ефективності використання створеного інструменту здійснено при обробці матеріалів типу КІМФ.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. На основі аналізу процесу алмазно–абразивного різання композиційних

матеріалів вперше запропоновано математичну модель, яка враховує особливості взаємодії пружного нежорсткого інструменту із додатковими ступенями вільності з порожнистою структурою композиту, та доведено, що ця взаємодія характеризується відмінностями за локалізацією та часом. Зроблено висновок про доцільність формування робочих поверхонь інструменту у вигляді окремих кластерів.

2. Удосконалено функціонально–орієнтований підхід до створення алмазно–абразивного інструменту шляхом залучення процедур опису умов роботи кластерів та зіставлення із засобами – матеріальними носіями – їх формування. Показано, що відмінність функціональних особливостей кластерів описується поліномами другого порядку; врахування відмінностей дозволяє активізувати інтенсифікуючі та пригнітити стримуючі чинники процесу взаємодії.

3. Удосконалено математичну модель формування кластерів поверхні ЛТДС алмазного шару, яка враховує не тільки теплові процеси і явища в зоні обробки, але й динаміку руху робочих органів; запропоновано залежності для визначення розміру кластеру.

4. Набула подальшого розвитку теорія алмазного мікрорізання композиційних армованих матеріалів шляхом урахування динамічних явищ у зоні різання як наслідку сукупності роботи окремих поверхневих кластерів. Показано, що більш стабільним і ефективним є різання інструментом, крок розміщення кластерів на якому відповідає кроку армування матеріалу джгутами волокон.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Сформульовано вимоги до інструментів, що використовуються для різання високоміцних композитів типу КІМФ, розроблено й апробовано низку нових технічних рішень щодо виготовлення інструментів із нанесеним алмазним шаром, зокрема алмазних струн, полотен реноватора та кільцевих свердел.

2. Розроблено методику визначення функціональних особливостей жорстких (кільцевих свердел), пружних (полотен реноватора) та гнучких (алмазних струн) інструментів, призначених для обробки матеріалів, армованих скляними та вуглецевими волокнами.

3. Запропоновано емпіричні залежності для визначення режимів ЛТДС при формуванні кластерів робочих поверхонь пропонованих інструментів.

4. Наведено економічне обґрунтування застосування функціонально–орієнтованого підходу до створення алмазовмісного інструменту.

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 в навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологія фізико–технічної обробки матеріалів» і «Технологія і обладнання фізико–технічної обробки матеріалів».

Особистий внесок здобувача полягає у тому, що автором обґрунтовано доцільність використання функціонально–орієнтованого підходу до створення нежорстких інструментів, які застосовуються для обробки сучасних

композиційних матеріалів, зокрема типу КІМФ. Запропоновано математичну модель взаємодії, низку регресійних залежностей, що дають змогу встановити відмінність роботи окремих ділянок поверхні за локацією та часом, визначити параметри різального шару інструменту. Автором доведена необхідність декомпозиції робочих крайок на окремі кластери, розмір яких зумовлюється структурою оброблюваного матеріалу; обґрунтовано доцільність формування таких кластерів методом ЛТДС. Постановка задач дослідження й аналіз отриманих результатів здійснювалися разом з науковим керівником.

Основні наукові результати, наведені в дисертації, були отримані автором самостійно. У наукових статтях, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок автора такий: [1] – запропоновані ймовірнісні моделі настання параметричної відмови роботи алмазовмісного інструменту; [2] – запропоновано використання функціонального підходу при обробці композиційних матеріалів; [3] – встановлені закономірності явищ пило– та шламоутворення при абразивній обробці карбонових композитів; [4] – запропонована технологія свердління композиційних матеріалів карбонової групи; [5] – виконано розрахунок напруженого стану зони різання композиційного матеріалу; [6] – проведені експериментальні дослідження кільцевих свердел, створених на основі функціонального підходу; [7] – запропонована схема формування розміру кластеру при динамічній постановці задачі.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися на конференціях: International Scientific Conference UNITECH–19 (Gabrovo, Bulgaria, 2019); Міжнародній науково–технічній конференції студентів, аспірантів та молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства» (м. Кременчук, 24–24 квітня 2019 р.); XX Міжнародній науково–технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Херсон, 10–13 вересня 2019 р.); X Всеукраїнській науково–технічній конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (м. Житомир, 06–09 листопада 2019 р.); Міжнародній науково–практичній конференції «Підвищення надійності машин і обладнання. Increase of Machine and Equipment Reliability» (м. Кропивницький, 15–17 квітня 2020 р.); XIII Міжнародній науково–технічній конференції молодих учених (м. Мінськ, Білорусія, 15–17 квітня 2020 р.); I Міжнародній науково–практичній конференції «Авіація, промисловість, суспільство» (м. Кременчук, 14 травня 2020 р.); XX Міжнародній науково–технічній конференції «Инженерия поверхности и реновация изделий» (м. Київ, 01–05 червня 2020 р.); науково–технічних конференціях викладачів, аспірантів та співробітників Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький, 2015–2020 р.). У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на розширеному засіданні наукового семінару кафедри технології машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 14 наукових праць, із 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.

Структура і зміст роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку літератури зі 158 джерел та додатків на 10 сторінках. Повний обсяг дисертації складає 208 сторінок, із яких 142 сторінки – основного тексту, 82 рисунки та 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність, сформульовано мету, об'єкт, предмет дослідження і задачі, які автор розв'язує в роботі. Наведено інформацію на підтвердження важливості питання, що розглядається. Окреслено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Подано відомості про апробацію, публікації та структуру дисертаційної роботи.

У **першому розділі** проаналізовано умови застосування алмазного інструменту при обробці новітніх композиційних матеріалів, зокрема карбонової групи.

Алмазні інструменти, які використовуються нині, призначені переважно для обробки широкої гами високоміцних матеріалів, кераміки, граніту тощо. Їх дослідженням займалися G. Mittal, K.Y. Rhee, A.S. Yuanyushkin, D.A. Rychkov, D.V. Lobanov, М.Ф. Семко, Г.В. Шабалін, П.С. Редько, Е.М. Левенберг, А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, В.А. Федорович, Б.А. Перепелиця, В.І. Лавріненко та ін. Інструменти з нанесеним тонким алмазним шаром забезпечують надійну обробку на операціях розрізання, шліфування, вибірки пазів у випадку, коли машинний час не перевищує кількох десятків секунд. Тривала обробка матеріалів без водяного або рідинного охолодження (наприклад, при розрізанні вуглець–вуглецевих заготовок типу КІМФ) призводить до того, що алмазовмісний шар активно засалюється, поверхня різання деструктується; збільшується шламоутворення. Ці процеси є взаємопов'язаними, внаслідок чого операції розрізання супроводжуються значним виділенням шкідливих речовин у повітря, зниженням якості та точності обробки, зростанням товщини деструктивного шару. У цих випадках використання традиційних алмазних полотен є ускладненим.

В окремих роботах Charles W. Vytheway, Є.І. Голібардова, А.М. Кузьміна, О.Ф. Саленка, С.А. Клименка, Ю.М. Кузнєцова було показано, що гібридизація та комбінування впливу може істотно підвищити ефективність обробки, особливо коли йдеться про композиційні матеріали. Такий підхід може застосовуватися і для абразивного інструменту (кругів, полотен реноватора, кільцевих свердел, алмазних струн).

При цьому формування окремих кластерів робочої поверхні, поділ її на зони різного силового, температурного та динамічного навантаження допомагають врахувати ці особливості та здійснювати обробку нежорстким інструментом в умовах, наближених до раціональних.

Приймаючи до уваги, що з точки зору раціонального забезпечення функцій робочі країки інструменту мають бути адаптованими до особливостей роботи в різних робочих зонах упродовж обробного циклу, базуючись на принципі поділу поверхонь на різних рівнях та 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.

Аналіз можливості формування таких кластерів, за роботами Р. М. Harrison, М. Henry, М. Brownell, Т. Shin, D. Lee, Н. Suzuki, Т. Moriwaki, Y. Yamamoto, Y. Goto, S. Hong, М. Akasishi, Н. Kanda, Т. Osawa, S. Yamaoka, O.D. Sibailly, F.R. Wagner, L. Mayor, В. Richerzhagen, дав підстави висунути припущення про перспективу застосування гібридних точкових процесів, що здатні формувати певні параметри поверхні (зокрема різальні властивості поверхневого шару). На основі закономірностей формування алмазного шару різними методами зроблено висновок, що ЛТДС є найбільш доцільним у застосуванні з позицій оцінки визначених задач.

Унаслідок викладеного вибрано предмет і об'єкт дослідження, сформульовано мету та визначено задачі дослідження.

Другий розділ присвячено викладенню методики формування алмазовмісного шару на основі функціонального підходу. Зазвичай силові навантаження алмазного шару при роботі інструменту істотно відрізняються і визначаються схемою взаємодії робочих поверхонь з оброблюваною заготовкою.

Порожниста структура високоміцного матеріалу має суттєвий вплив на умови взаємодії та процеси і явища, що відбуваються в зоні різання нежорстким інструментом. Як правило, високоміцний композиційний карбон–карбонівий матеріал 3–D структури має порожнистість 3–7%; а за трьома ортогональними напрямками волокна сполучені у джгути, діаметр кожного – 1,25–1,8 мм; причому сполучення джгутів та волокон у єдину структуру виконується піровуглецем, отриманим за допомогою гарячого осадження. Тоді для різання матеріалу алмазною струною схема взаємодії відповідатиме рис.1. Нежорстка струна довжиною l_1 під дією робочого навантаження Q_n та сил корисного опору F_n^i вигинається з кутом φ . Рівняння пружної лінії на початковій ділянці для зосередженого та розподіленого навантаження (при зануренні у тіло) має вигляд:

$$\varpi_z = -\frac{Q_n a^2 b^2}{6EJl} \left(2\frac{z}{a} + \frac{z}{b} - \frac{z^3}{a^2 b} \right); \quad \varpi_z = -\frac{qbl^3}{48EJ} \left[8\frac{d}{l} \left(\frac{z}{l} - \frac{z^3}{l^3} \right) - \frac{2ab^2}{l^3} - \frac{b^3}{l^3} + 2\frac{b^2}{l^2} \right], \quad (1)$$

де $q = \frac{\sum_{i=1}^m F_i}{l_k}$ – розподілене навантаження від сил різання з урахуванням

попереднього натягу різального полотна F_H . Для струни, опір якої на згин практично відсутній, натяг між кріпленнями визначиться: $F_H = \frac{ql^2}{8f}$, де f –

максимальний прогин при прикладанні сили різання.

Оскільки зерна алмазів m_i закріплені на струні, яка має значну пружну деформівність, можна вважати, що між нерухомою системою координат XYZ та рухомою, сполученою із центром мас зерен, існує пружний зв'язок з параметром C_i .

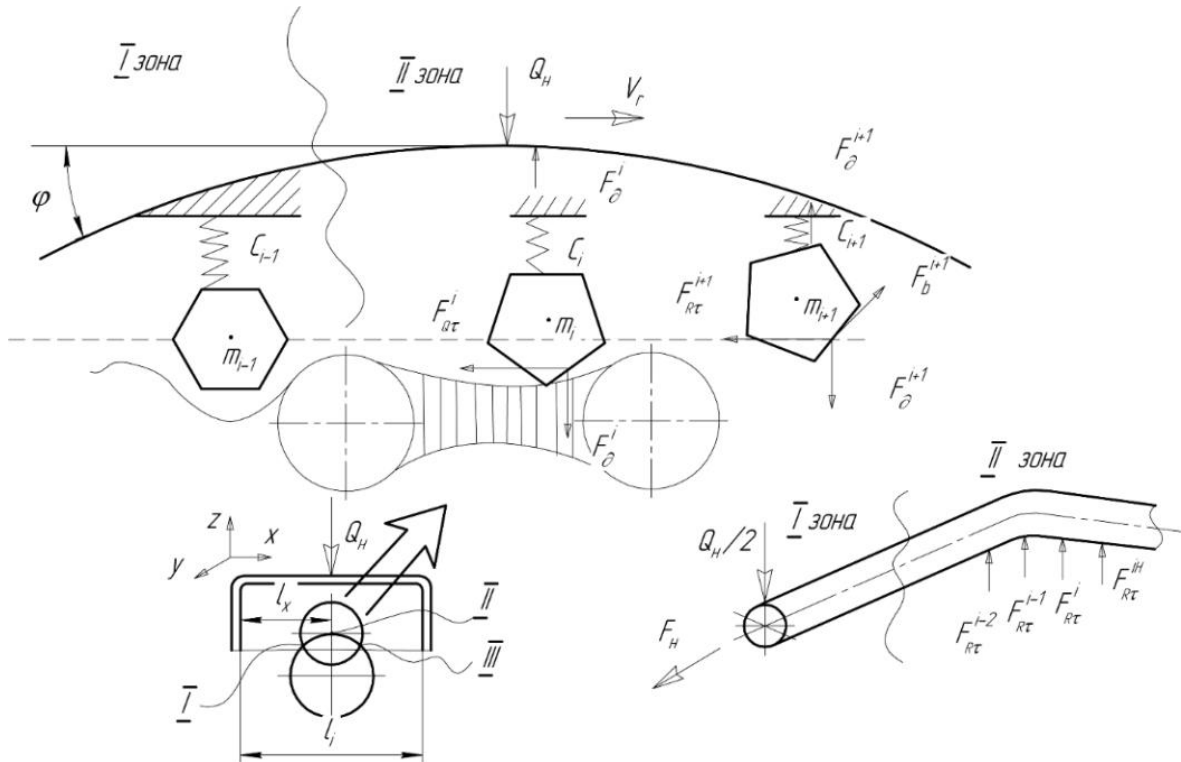


Рис. 1. Схема взаємодії алмазних зерен, розташованих на різальному полотні, з поверхнею заготовки

Вимушені поперечні коливання струни, яку можна уявити у вигляді рухомого нежорсткого прута з постійним перетином, задовільно описуються у змінних Ейлера диференціальними рівняннями у частинних похідних:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2v \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + v^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{F_n(t)}{m} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \beta^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = \varepsilon f(x, t), \quad (2)$$

де $u(x, t)$ – поперечні переміщення носія координатою x у плинний момент часу; ε – параметр малої збурюючої сили у порівнянні із силою дії $\beta^2 = \frac{EI}{m}$; m – маса одиниці довжини алмазної струни; E – модуль пружності матеріалу; $I = \frac{Bs^2}{12}$ – момент інерції перетину струни відносно центральної осі; B, s – ширина та висота перетину пильного полотна; $F_n(t)$ – змінна сила натягу нежорсткого прута, що залежить від умов різання.

Рішення (2) здійснюється для граничних умов, що мають вигляд: $u=0, x=0, x=l$; $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0, l$ – довжина секції, що аналізується.

Збурення визначатимуться чергуванням моментів контакту зерен із оброблюваним джгутом волокон та проміжком $f(x, t) = H \sin(\omega t)$, де H, ω – амплітуда та частота збурень. Зважаючи на те, що змінна сила натягу прута визначається силою опору різання $F_n(t) = N_0 + \varepsilon N_1 \cos(\mu t)$, де N_1 та μ – параметри, що залежать від частоти взаємодії окремого зерна з поверхнею та кількості зерен, що одночасно перебувають у зоні контакту, система диференціальних рівнянь, які описують параметри динамічної системи, набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= -\frac{\varepsilon}{(\omega+0,5\mu)} \left[\frac{\alpha H_2 \omega^2}{2} \sin 2\gamma + H_3 \cos \gamma \right]; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \omega - 0,5\mu - \frac{\varepsilon}{(\omega+0,5\mu)} \left[\frac{H_2 \omega^2}{2} \cos 2\gamma + \frac{H_3}{\alpha} \sin \gamma \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

Нехтуючи багатофазністю руйнування волокон матеріалу при контакті рухомого зерна із джгутом на поверхні, а також вважаючи, що відтиснення зерна не відбувається, під час контакту одиничне зерно, стискуючи джгут волокон діаметром D_v з умовними модулями пружності E_v та G_v , руйнує його, занурюючись під дією сили F_d , $F_d = \frac{Q_n}{N}$, відповідно до задачі Герца на величину

$$\delta^{3/2} = \frac{F_d}{K\sqrt{R}}, \text{ де } R \text{ – приведений радіус джгута волокон, } \frac{1}{K} = \frac{3}{4} \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right),$$

$D_v/2=R$. Обсяг зняття матеріалу, за умови руйнування опуклої частини джгута у вигляді сегменту висотою δ , становить: $w = \pi\delta^2 \left(R - \frac{1}{3}\delta \right)$.

Тоді виніс шламу, який утворюється при різанні з постійною силою притискання інструменту, визначається, $\text{мм}^3/\text{хв}$:

$$W = w\eta \frac{2l_p N_{dr}}{D_v + t_p} N_a t, \quad (4)$$

де N_a – кількість абразивних частинок, що беруть участь у контакті; l_p – довжина робочого ходу, мм; t – плинний час, с; t_p – крок розташування волокон, мм; N_{dr} – кількість подвійних ходів, хв^{-1} ; η – коефіцієнт, що враховує перерозподіл навантажень між окремими зернами. Останній залежить від умов контакту і коливань (3), що виникають у системі.

Аналіз (3, 4) доводить, що розташовані алмазні зерна по-різному сприйматимуть робоче навантаження залежно від швидкості руху v_r , умов збурення $f(x,t)$, сили Q_n , а також лінії пружного деформування робочої поверхні, у даному випадку l_i . При різанні круглої заготовки неважко виокремити кілька зон рівнянь пружної лінії, наприклад, зону I та зону II (рис. 1). Різальні властивості зерен у цих зонах будуть відрізнятися.

Зміна властивостей поверхні на основі функціональної обумовленості матиме вигляд:

$$V_{ij}^f = f(R_{ij}^{xy}, T_{ij}^{xy}, H_{ij}^a, D_{ij}). \quad (5)$$

Відмінність умов взаємодії інструмента із нещільним міцним композитом дає підстави зробити висновок, що інструмент, у цілому, слід розглядати як сукупність мікрофрагментів, які працюють у конкретних умовах обробки. Кожен такий фрагмент повинен володіти множиною корисних ознак (функцій) F_p , сукупність яких дозволяє досягти екстремуму цільової функції; у випадку із нежорстким алмазовмісним інструментом – максимальної продуктивності q та надійності $F(t)$ роботи. Оскільки фрагменти поверхні можуть мати подібні властивості, їх можна вважати кластерами, сукупність яких утворює алмазний шар.

У пошуку раціонального рішення щодо удосконалення інструменту застосовано функціонально–вартісну модель (ФВМ) системи з використанням системно–морфологічного підходу. ФВМ отримано шляхом поєднання функціональної моделі (ФМ) і робочої моделі об'єкта. Нормуючою умовою для визначення значущості функції є умова $\sum_{j=1}^n r_{ij} = 1$, де r_{ij} – значущість j -ої функції, що належить 1–у рівню ФВМ; n – кількість функцій, розташованих на одному рівні ФМ, які належать до загального об'єкта вищого рівня. Головними функціями, що утворюють множину F , обрано наступні: різальна здатність (f_1); стабільна здатність (f_2); шламонакопичуваність (f_3); сталість температурного режиму (f_4); відповідність умовам контакту (f_5); можливість формування кластеру (f_6); низька чутливість до відхилень оптимальних значень процесу (f_7).

Якісну оцінку варіантів конструктивних рішень виконано за допомогою методу розставлення пріоритетів та побудови графу «турніру» із порівнянням варіантів C_1, C_2, C_3, \dots . Кількісний результат попарного порівняння двох варіантів C_i та C_j відображено умовами, що базуються на положеннях Ю.М. Кузнецова: $i \setminus j; i > j$ $C_i \rightarrow C_j; i \cong j; i = j$ $C_i \leftrightarrow C_j; i \setminus j; i < j$ $C_i \leftarrow C_j$.

Сформульовано основні вимоги до кластерів, а саме: сумісні кластери мають допускати відмінності у сформованих структурах; послідовність сумісних кластерів має наближатися до огинаючої заданого геометричного профіля виробу в цілому; сумісні кластери не повинні мати розривів у структурі; низка сумісних кластерів може утворювати окрему групу зі схожими фізико–механічними характеристиками.

Зроблено висновок, що найбільш доцільним способом забезпечення властивостей поверхонь і сформульованих вище вимог є ЛТДС формування поверхневого шару, який потребує певних удосконалень для отримання закономірностей у керуванні процесом формування елементів поверхні, тобто їх кластерів.

Для визначення можливості локалізації окремого кластеру поверхні розглядали квазістатичну постановку задачі та динамічну. У першому випадку визначали розмір плями нагріву поверхні до температур, достатніх для плавлення присадкового матеріалу і фіксації зерен алмазу. У цьому випадку щільність енергії, яка буде поглинена: $q(x) = q_0 \exp\left(-x^2/r^2\right)$, температура на поверхні напівбезмежного тіла в точці з координатами (x, y, z) , за умови переміщення лазерного променя вздовж поверхні зі швидкістю v та за умови нехтування втратами тепла з поверхні, визначається як:

$$\bar{T} = \frac{16}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{(c'^2 + t'^2)(b'^2 + \bar{t}'^2)}} \exp\left[-\frac{(2\bar{x}'^2 + \bar{v}'t')^2}{4(c'^2 + \bar{t}'^2)} - \frac{\bar{y}'^2}{b'^2 + \bar{t}'^2} - \frac{\bar{z}'^2}{\bar{t}'^2}\right] dt, \quad (6)$$

де $\bar{T} = 16\sqrt{\pi k r T} / PA_0$; $\bar{v} = v_r / 2a$; $\bar{x}' = \frac{x}{r}$; $\bar{y}' = \frac{y}{r}$; $\bar{z}' = \frac{z}{r}$; $\bar{c}' = \frac{c}{r}$; $\bar{b}' = \frac{b}{r}$; $r^2 = cb$.

Процес теплопровідності в об'ємі матеріалу заготовки, яку обмежено областю Ω , з поверхнею $\partial\Omega$, описаний за допомогою скалярного поля температури $T = T(P, t)$, векторного поля потоку тепла $q = q(P, t)$, $P = \{(x, y, z)\} \in \Omega$, скалярного поля з питомою тепловою енергією $e = e(T)$.

Безрозмірна швидкість руху межі розділу фаз у залежності від безрозмірного часу має вигляд:

$$\frac{d\xi}{dt} = \left[1 + \varepsilon \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\tau^{1/2}}{2} \right) - \frac{1}{(\pi\tau)^{1/2}} e^{-\frac{\tau}{4}} \right\} \right] \frac{2}{\pi} \left\{ 1 + \frac{\varepsilon}{\pi\tau^{1/2}} \right\} \arcsin \left\{ \left(1 - \frac{\pi\varepsilon^2}{4\tau} \right)^{1/2} \right\}. \quad (7)$$

Динамічна постановка задачі передбачає рухоме джерело з урахуванням динаміки приводу, а також явищ під час руху алмазних зерен. Врахування динамічних складових системи відображається рис. 2.

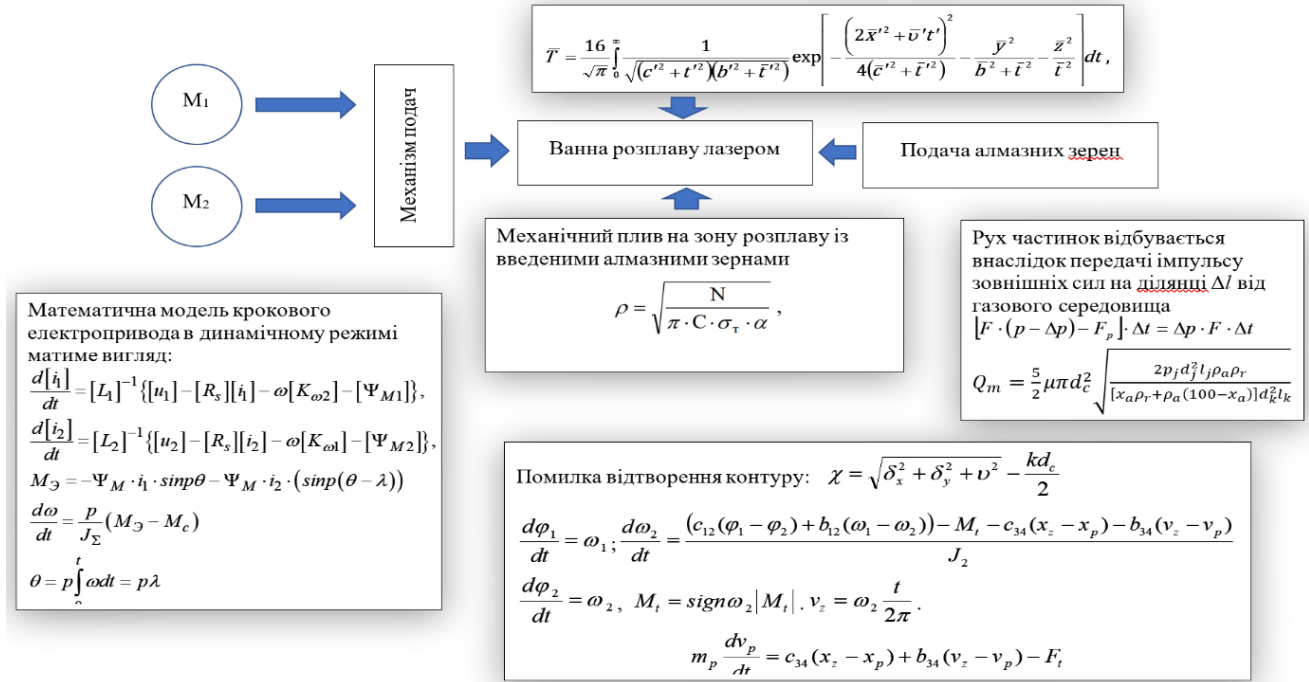


Рис. 2. Схема формування розміру кластера при динамічній постановці задачі

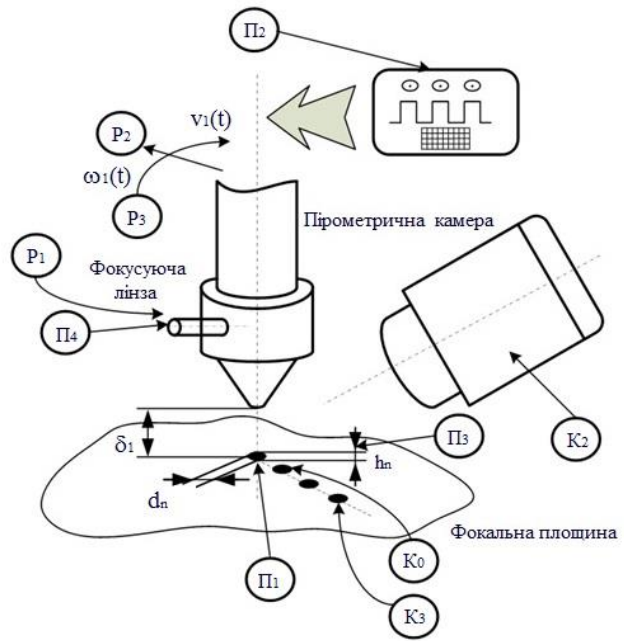
В удосконаленій математичній моделі вперше враховано динаміку руху алмазних зерен та їх фіксацію на поверхні, що дозволяє визначити локалізацію кластерів, встановлювати їх параметри. Опис динаміки приводів (зокрема крокового електродвигуна – лівий блок схеми рис.2), динаміки руху алмазних зерен (правий блок схеми рис. 2), руху робочих органів дає можливість встановити помилку відтворення контуру χ , мкм. Модель враховує також і механічний вплив на ванну розплаву ρ , який здійснюється рухомими алмазними зернами.

У третьому розділі наведено опис використаного обладнання, а також методики проведення експериментальних і модельних досліджень. Для забезпечення сталого процесу ЛТДС застосовується універсальний лазерно-струменевий комплекс ЛСК–400–5 (рис.3, а), на якому встановлено допоміжне пристосування у вигляді модулів поздовжнього та обертового переміщення; заготовку встановлювали у затискний патрон.

Для введення алмазних частинок до робочої зони використовувався газопо-дросельний пристрій транспортування, який дозволяв направляти алмазні зерна та присадковий матеріал (на основі дрібнодисперсного порошку Ni) в робочу зону. Зауважено чинники (рис. 3, б) формування кластеризованої поверхні під час виготовлення інструменту.



а)



б)

Рис. 3. Дослідницький комплекс ЛСК–400–5 (а) та схема контрольованих параметрів, регуляторів і вимірюваних показників (б): P_1 – тиск робочого газу p_0 ; P_2 – лінійна (тангенціальна) швидкість $S_1(t)$; P_3 – обертова швидкість $\omega_1(t)$; P_4 – діаметр плями нагріву d_n ; P_2 – частота виникнення імпульсів; P_3 – товщина заготовки для нанесення; P_4 – використовуваний присадковий матеріал; K_1 – σ_{kr}^* ; K_2 – T_1 ; K_3 – T_2 ; K_4 – v_s ; K_5 – $R(t)$ (функція поверхні); K_6 – $B(t)$

Нанесення алмазовмісного шару здійснювали на заготовки свердла кільцевого $\varnothing 18,0$ мм. Швидкість обертання $0,1 \text{ с}^{-1}$, а швидкість поздовжнього руху – до 3 мм/с . Шар наносили на 10 корпусів. Операцію з нанесення зерен здійснювали для вставки полотен реноватора, а також для струни у вигляді дроту $\varnothing 2,9$ мм. Швидкість обертання заготовки становила $0,9 \text{ с}^{-1}$, радіальне переміщення здійснювалося з перекриттям доріжок на величину $0,3\text{--}0,6$ мм, формування кластеру відбувалося в тангенціальному напрямку зі швидкістю до 5 мм/с . Шар наносили на 10 стрічок.

Наводиться методика використання засобів електронно–мікроскопічного дослідження за допомогою мікроскопа РЕМ–106–И, методика підготовки препаратів для визначення деградації поверхні інструмента, а також топографічного дослідження поверхні обробленого зразка з метою встановлення глибини дефектного шару та шорсткості поверхні R_z . Запропоновані рівняння для оцінки топографічного контрасту та побудови 3–D зображень поверхонь.

Перевірка ефективності застосування інструменту здійснена на випробувальному обладнанні – пильному верстаті з регульованим асинхронним приводом та свердлувальному верстаті мод. JET–12. Контролювали продуктивність процесу W , $\text{мм}^3/\text{с}$, залежно від навантаження Q_n , Н, до його фактичного припинення, а також час безперервної роботи τ , хв.

У четвертому розділі наведено результати комплексу теоретико–експериментальних досліджень застосування традиційного та пропонуваного

інструменту. Так, із використанням розробленої математичної моделі виконана симуляція для визначення умов і відмінностей при роботі кільцевого свердла, полотна реноватора, алмазної струни під час різання матеріалу типу КІМФ.

Розв'язок (2) відповідно до схеми рис. 1 здійснено для наступних умов: розпил круглої заготовки $\varnothing 290$ мм струною довжиною 300 мм, кількість алмазних зерен під час взаємодії – 35...55, діаметр волокон композиту – 1,2 мм, крок порожнин – 2,4, глибина – 0,25...0,45 мм, струна $\varnothing 3,8$ мм (Stanley) та $\varnothing 3,2$ мм (виготовлена). Установлено, що збільшення робочого навантаження Q веде до певного зростання зйому матеріалу, яке з часом уповільнюється, рис. 4. Це підтверджено й експериментальними дослідженнями. Динаміка затухання для типового інструменту та пропонованого зі сформованими поверхневими кластерами різна.

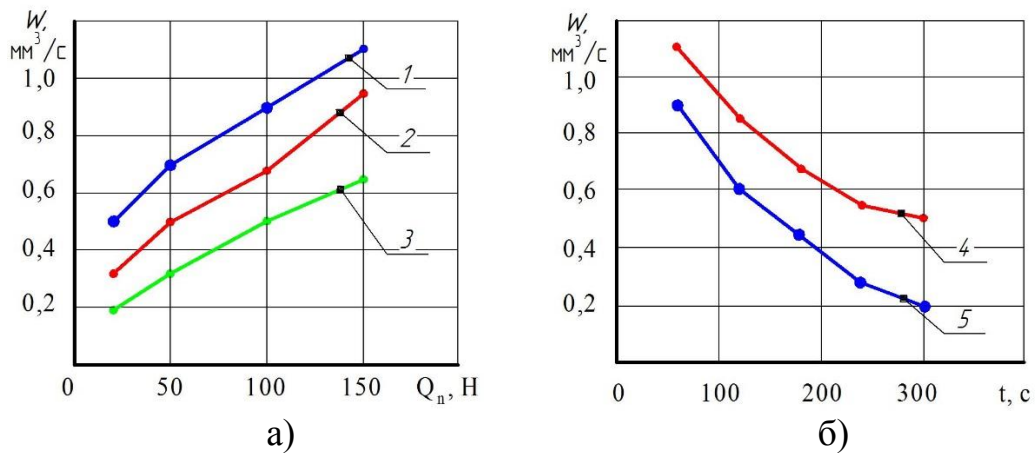


Рис. 4. Зміна продуктивності W , $\text{мм}^3/\text{с}$, для струни залежно від сили робочого навантаження Q_n , Н (а), та часу обробки t , с (б) для різних ділянок (рис. 1): 1, 2 – вихідні ділянки; 3 – центральна ділянка; 4 – пропонований інструмент; 5 – типовий інструмент

Останнє явище зумовлюється тим, що утворений шлам не виноситься за межі зони різання. Також виявлено істотну відмінність в умовах різання вхідної ділянки I, вихідної III та центральної II (рис. 1). Таким чином, зроблено припущення про подолання зазначених недоліків процесу кластеризацією робочих поверхонь інструменту.

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 (табл. 1). Це дало змогу також довести твердження про можливість опису функціональних відмінностей математичними закономірностями, поданими у вигляді поліномів другого та третього ступеня. Для визначення відносного зносу з урахуванням термічно-силового навантаження оброблюваного нещільного (композиційного)

матеріалу застосовано рівняння: $\xi = K \frac{\sigma_N}{Ae^{-\alpha \frac{aP_0 V t}{\sqrt{\pi F \Delta t \lambda}}} 2\sqrt{at}}$ (тут σ_N – нормальний

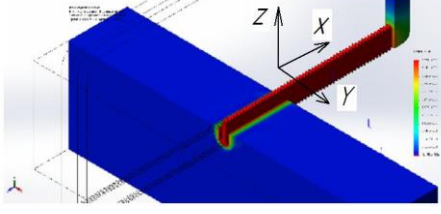
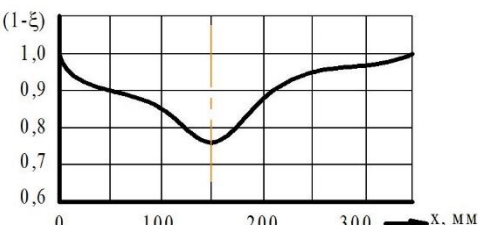
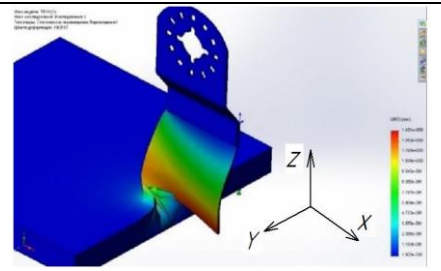
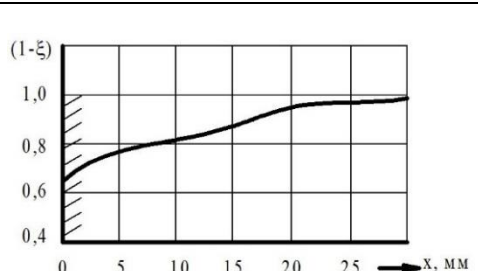
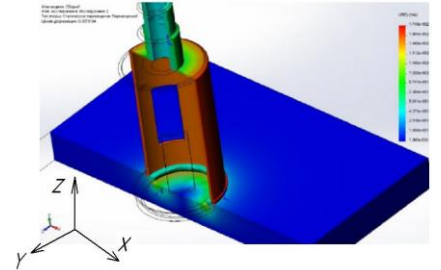
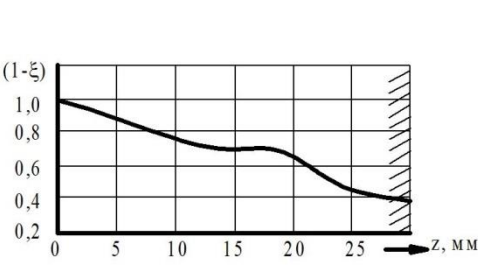
тиск на поверхні контакту; K – коефіцієнт, який залежить від матеріалів

контактних тіл; P_0 – осьова сила різання ($P_0 = Q_n / N_a$); V – швидкість різання; t – час одиничного контакту алмазного зерна).

Наведено результати досліджень процесу ЛТДС на предмет формування надійних поверхневих кластерів мінімально потрібного розміру, властивості яких змінюються за прогнозованими залежностями.

Таблиця 1

Моделювання інтенсивності навантаження робочих поверхонь при обробці

№	Умови моделювання	Модель взаємодії (стат. деформування від Q_n)	Зношування робочої поверхні ξ
1	$V_p = 0,4$ м/м; $P_h = 80$ Н; $n = 60$ подв.х/хв; $d_r = 3,5$ мм		
2	$V_p = 12$ м/с; $P_h = 25$ Н; $n = 3200$ подв.х/хв; $l_r = 5,0$ мм		
3	$V_p = 0,3$ м/с; $P_h = 45$ Н; $n = 1500$ об/хв; $d_r = 18,0$ мм		

На основі методу багатofакторного планування експерименту отримано регресійне рівняння очікуваного розміру кластера F , мм, від умов його формування:

$$F = -1,3319 + 0,00091454 \cdot N + 2,07633 \cdot p + 0,00119545 \cdot \rho + 0,00226548 \cdot T + 26,6801 \cdot v, \quad (8)$$

де N – сила притискання, Н, p – тиск газу, МПа, ρ – розмір частинки, мкм, T – температура у ванні розплаву, К, v – швидкість руху, м/с.

Порівняння результатів модельного і експериментального досліджень щодо властивостей поверхні показали відносно високу збіжність результатів (похибка складає 12–15%). Так, встановлено, що формування кластерів поверхневого шару на експериментальному обладнанні із кроком між зернами 100 мкм та 150 мкм відбувається досить стабільно, без істотних пошкоджень зерен та значного виходу присадкового металу. Розсіювання параметрів викладання зерен ± 35 мкм, більша дисперсія параметру властива більшій фракційності використаного алмазного порошку (60 мкм та 100 мкм).

Мікроелектронне дослідження поверхні інструменту, сформованої з використанням кільцевого сопла та присадкового припою з фракціями частинок 45–100 мкм, а також зерен алмазу показали, що регулювання витратою присадкових матеріалів, які прямують двома каналами, дає можливість отримувати достатньо гомогенні поверхневі алмазовмісні шари.

Зв'язник виявився повністю розплавленим і вкривав поверхню основи інструмента шаром товщиною 25–40 мкм. Спостерігалися включення бруду, які, очевидно, потрапили в зону обробки внаслідок забруднень каналу підведення робочого газу. Також виявлено на дослідженій поверхні наявність дефектного зерна. Розсіювання параметрів викладання ± 350 мкм (рис. 5).

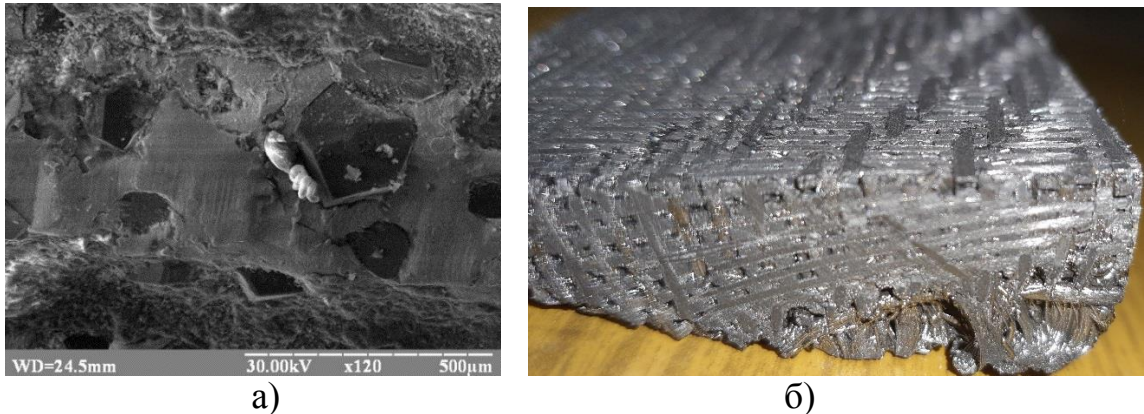


Рис. 5. Мікрофото переходу між кластерами різної фракційності (а) та структура матеріалу КІМФ (б)

Встановлено, що для малої кількості імпульсів лазера відмінність епюр розподілу температур є незначною (не більша за 10%); за умови, що нагрів поверхні для здійснення наступного деформаційного ущільнення має бути більшим за 750 °С, діаметр локалізованої плями при нерухомому промені становить від 0,32 мм до 0,4 мм; для прогнозування ступеня локалізації впливу можна використовувати рівняння розподілу температур на поверхні тіла із обмеженнями за температурою $T_{кр}$. Збільшення локалізації можливе за рахунок зміни методів і способів механічного ущільнювального впливу на зону розплаву.

Зосереджено увагу на особливостях обробки матеріалів типу КІМФ створеним інструментом. Проведені дослідження виконувалися до повного руйнування поверхневого алмазовмісного шару, що дало змогу отримати певну статистичну вибірку для визначення параметрів моделі безвідмовної роботи за формулою:

$$P(T) = \left[0,5 + \Phi \left(\frac{X_{\max} - a_0 - \gamma_{cp} T}{\sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_\gamma^2 T^2}} \right) \right] \cdot e^{-\lambda T}.$$

Достовірність результатів складає 95%. Якщо за параметр X_{\max} прийняти продуктивність процесу (цей параметр є узагальнюючим для (4)), визначену при фіксованій робочій подачі або фіксованому зусиллю різання (у даному випадку 15 Н), то параметричною відмовою вважали зниження продуктивності менше, ніж на $1 \text{ мм}^3/\text{хв}$. Тоді $a_0=0,27$, $\sigma_a=0,045$, $\gamma=0,00037 \text{ мм}^3/\text{с}$, $\sigma_\gamma=0,000012$, а очікуваний потік відмов $\lambda=0,000025$.

Стає очевидним, що запропоновані технічні рішення працюють більш стабільно і сприяють зменшенню забруднень робочих поверхонь. Це засвідчують і мікрофото робочих поверхонь інструмента. Виконання багатофакторного експерименту дало підстави пов'язати прийняті до уваги фактори h, w, v, p із параметром продуктивності обробки $W, \text{мм}^3/\text{с}$. Статистична обробка результатів плану експериментів дозволила побудувати наступну регресійну залежність:

$$W = 1,193 + 1,625 \cdot h + 0,00857143 \cdot p + 0,015625 \cdot v - 0,0017 \cdot w, \quad (9)$$

де h – виліт зерна над поверхнею, мм; w – щільність нанесення зерен на площині поверхні, %; p – зусилля притискання, Н; v – швидкість руху.

При цьому було встановлено, що для КІМФ максимум продуктивності відповідає значенню кроку кластерів $t = 2,8..3,0$ мм, зумовленому кроком армування матеріалу.

Порівнюючи із традиційним інструментом, можна констатувати, що пропонуваній володіє меншою швидкістю розвитку пошкоджень, водночас зменшуючи початкове розсіювання параметрів на 27–32 %, що підтверджує його ефективність.

Показано, що похибки симуляції та отриманих регресійних моделей не перевищують 10–12%, а використання інструменту, створеного на основі функціонального підходу, вище на 20–25% для кільцевих свердел, на 40–50% – для гнучкого інструменту (алмазних струн) та на 15–20% – для пружного інструменту (полотен реноватора). При цьому ефективність інструменту, створеного на основі використання функціонального підходу, є високою (рис. 6). Забруднення поверхні визначено як відношення об'ємного залишку шламу w_z до відкритих пор нового інструмента $w_p, z = w_z/w_p$.

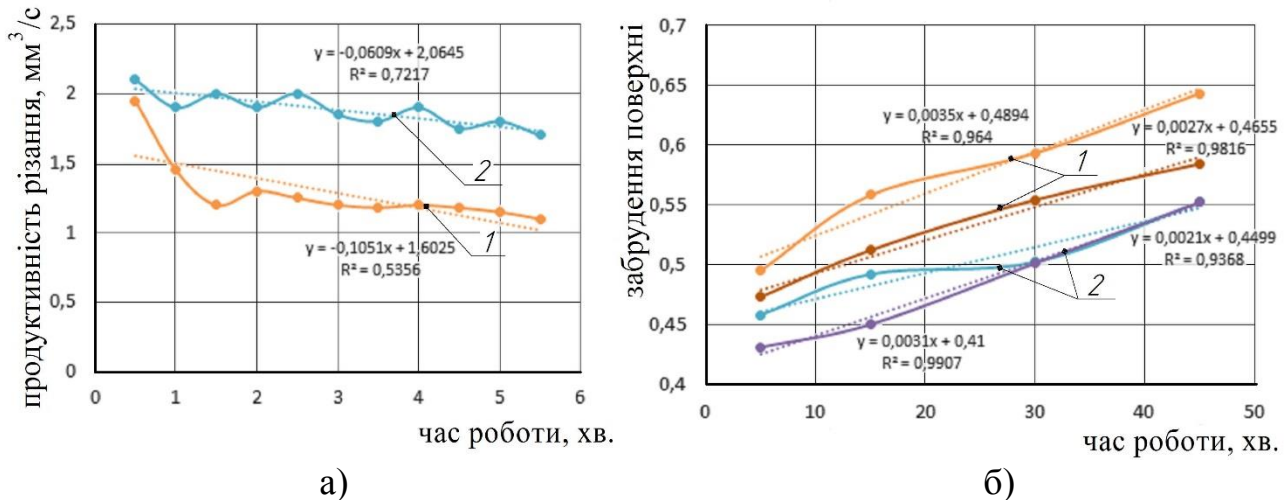

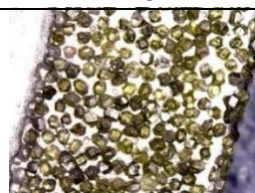
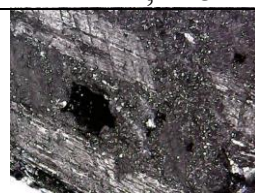



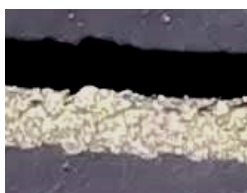
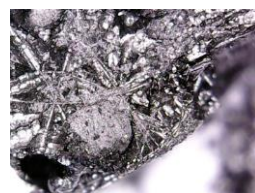


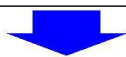
Рис. 6. Зміна продуктивності різання (а) та зростання забрудненості поверхні (б) для інструменту звичайного 1 і пропонуваного 2

Рівняння зміни властивостей кластерів поверхні в радіальному напрямку відповідно (4): 1) щільність нанесення $W: W_1 = \text{const}; W_2 = b_{01} + b_{11} + b_{21}^2$; 2) крок нанесення $t: t_1 = \text{const}; t_2 = b_{02} + b_{12} + b_{22}^2$; 3) профіль нанесення $h: h_1 = \text{const}; h_2 = b_{03} + b_{13} + b_{23}^2$. Для ефективної обробки КІМФ раціональні розміри кластера та режими обробки наведені в табл.2.

Результати досліджень якості обробки поверхонь

№	Модель і параметри інструмента	Мікрофото поверхні, $\times 25$	Оброблена поверхня КІМФ, $\times 25$
1	$t=3,0$ мм; $h=0,015$ мм; $w=20\dots 50\%$; $p = 120$ Н; $v = 2,5$ м/с; рух обертовий 		
2	$t=3,0$ мм; $h=0,025$ мм; $w=20\dots 40\%$; $p = 25$ Н; $v = 7,5$ м/с; $l=10,0$ мм; $\delta=0,8$ мм; рух зворотно-поступальний 		
3	$t=2,8$ мм; $h=0,015\dots 0,09$ мм; $w=20\dots 60\%$; $p = 80$ Н; $v = 1,2$ м/с; $d= 3,2$ мм; рух зворотно-поступальний 		

Проводиться аналіз умов роботи інструмента, визначається потік відмов та схема руйнування робочої крайки



На основі аналізу умов роботи та пошкоджень будується таблиця ознак створюваного інструмента (стосовно до обробки композитів)



Встановлюються закономірності формування алмазного шару відповідно до можливостей обраного обладнання



Виготовляється інструмент



Виконується перевірка різальних властивостей інструмента, оцінюються його безвідмовність при виконанні обробки

У п'ятому розділі наголошено економічне обґрунтування пропонуваніх технічних рішень та інженерна методика їх використання. Оскільки ефективність створеного інструмента вбачається не тільки у зростанні періоду стійкості τ , а й у скороченні обсягу матеріалу, що перетворюється у шлам, показано, що використання інструмента із адаптацією кластерів до процесу різання дає можливість підвищити коефіцієнт використання матеріалу на 18–22%, отримати економічний ефект до 150 тис. грн. при розрізанні одного блока КІМФ.

Для забезпечення відповідності умов формування кластерів поверхні умовам подальшої роботи інструменту запропоновано виконувати реверсивний інжиніринг, що базується на принципі аналізу зношування інструменту після роботи. Його алгоритм наведений на рис. 7.

Рис. 7. Схема реверсивного інжинірингу поверхні інструменту для формування відмінних кластерів

Сформульовано вимоги до інструментів, що використовуються для різання матеріалів типу КІМФ, розроблено, виготовлено й апробовано низку нових технічних рішень інструментів із нанесеним алмазним шаром, зокрема алмазних струн, полотен реноватора та кільцевих свердел.

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

Наведено приклади та перспективи застосування запропонованого підходу при використанні виробів з алмазовмісними шарами у 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 дає змогу підвищити ефективність обробки та отримати істотний економічний ефект.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За результатами дисертаційної роботи сформульовано наступні висновки:

1. Розроблено модель взаємодії нежорсткого інструменту із додатковими ступенями вільності (зокрема алмазної струни, полотен реноватора) з композитом типу КІМФ. Отримано закономірності взаємодії абразивних зерен із нещільною поверхнею та показано, що збільшення робочого навантаження Q веде до непропорційного зростання зйому матеріалу та затухання різання з плином часу. Встановлено, що причиною втрати різальних властивостей інструментів при обробці спеціальних карбон-карбонівих матеріалів та вуглецевих пластиків типу КІМФ є надмірне пиловиділення, внаслідок чого змінюються умови взаємодії алмазних зерен із матеріалом, а температура зростає до критичних 1100...1200 К. Зроблено припущення про подолання зазначених недоліків процесу трансформацією робочих поверхонь інструменту.

2. Виконано адаптацію методики пошуку раціональних матеріальних носіїв функцій до задач удосконалення виробів із алмазним шаром, причому для пошуку оптимальних носіїв функцій – нових технічних рішень аналізованих виробів – запропоновано застосовувати метод розрахунку питомої вартості корисної функції. Доведено, що додаткові ступені вільності інструменту зумовлюють відмінність умов роботи за локалізацією на 20–40%, збільшуючи таку відмінність за часом (при обробці понад 5...8 хв.). Це пов'язано зі зміною різальних властивостей внаслідок активного виділення шламу та зростанням температури на робочих поверхнях.

3. На основі застосування морфологічного аналізу визначено принципи декомпозиції робочих поверхонь, доведено доцільність її кластеризації. Сформульовано основні вимоги до кластерів, зокрема: сумісні кластери мають допускати відмінності у сформованих структурах; кластери не повинні мати різні механічні характеристики, зокрема КЛТР, σ_a та ін., що сприяє формуванню з таких елементів суцільної робочої поверхні; послідовність сумісних кластерів має наближатися до огинаючої заданого геометричного профіля виробу в цілому; сумісні кластери не повинні мати розривів у

структурі, а отже, мусять мати схожі фізико–механічні характеристики.

4. Доведено, що найбільш доцільним засобом забезпечення властивостей є лазерний деформаційний спосіб формування поверхневого шару, який потребує певних удосконалень для отримання закономірностей керування процесом формування елементів поверхні або їх кластерів. Розрахунок очікуваної зони локалізації показав, що за умови нагріву поверхні для здійснення наступного деформаційного ущільнення понад 750 °С діаметр локалізованої плями при нерухомому промені становить від 0,32 мм до 0,4 мм.

5. Встановлено, що стійкість інструменту, створеного на основі функціонального підходу, вища традиційної на 20–25% для кільцевих свердел, на 40–50% – для гнучкого інструменту (алмазних струн) та на 15–20% – для пружного інструменту (полотен реноватора). Порівняння результатів моделювання та експериментальних даних має похибку не більшу за 10...15% і зумовлюється складністю врахування особливостей взаємодії інструменту на значній довжині поверхні різання (понад 150...300 мм). При обробці КІМФ матеріалів розмір кластера відповідає кроку армування матеріалу і складає 2,8..3,0 мм; виліт зерен зростає з 15 до 90 мкм зі зменшенням щільності нанесення з 60 до 20%.

6. Для визначення параметрів поверхневих кластерів запропоновано використання реверсивного інжинірингу поверхні інструменту, що дає змогу за рівнем зношування формулювати вимоги до окремих кластерів робочої поверхні. При цьому відмінність функціональних особливостей кластерів доцільно описувати поліномами другого порядку.

7. Результати досліджень впроваджено у виробництво та в навчальний процес. Запропоновані методики, моделі і технічні рішення передано до впровадження на підприємство ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «Лезо»», а також використано в навчальному процесі Центральноукраїнського національного технічного університету для викладання дисциплін «Технологія фізико–технічної обробки матеріалів» і «Технологія і обладнання фізико–технічної обробки матеріалів».

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Саленко О.Ф., Щетинін В.Т., Глухова В.І., Лашко Є.Є., Головка Л.Ф., Саленко А.О., Будар Мохамед Р.Ф. Забезпечення надійності роботи алмазовмісного інструменту, отриманого лазерним термодформаційним спіканням, при обробці армованих вуглепластиків. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Кременчук, 2019. Вип. 3 (116). С.147–157. (включено до міжнародних наукометричних баз «Ulrich's Web Global Serials Directory», «eLIBRARY», «Index Copernicus», «Polish Scholarly Bibliography», «Infobase Index», «Inspec», «Open Academic Journals Index», «Google Scholar», «CiteFactor» і «Scientific Indexing Services»).

2. Salenko Alexandr, Shchetynin Viktor, Gabuzian Galina, Lashko Evgeny, Budar Mohamed R.F., Klimenko Sergey, Potapov Alexandr. Cutting Superhard Materials by Jet Methods (on Functional Approach). Recent Advancements in the

Metallurgical Engineering and Electrodeposition. IntechOpen, 2019. P.1–21. (включено до міжнародних наукометричних баз «Web of Science – Book Citation Index», «Crossref Google Scholar», «WorldCat», «BASE», «EMBSCO A-to-Z», «Open AIRE», «CNKI Scholar», «RePEc», «ExLibris SFX»).

3. Salenko A., Chencheva O., Gluchova V., Schetinyn V., Budar Mohamed R.F., Klimenko S., Lashko E. Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020. 3/1 (105). P.38–51. (включено до міжнародних наукометричних баз «CrossRef», «Index Copernicus», «American Chemical Society», «PIHЦ», «WorldCat», «Ulrich's Periodicals Directory», «BASE», «ResearchBib», «CiteFactor», «Scopus»).

4. Salenko Oleksandr, Chencheva Olga, Schetinyn Viktor, Budar Mohamed R.F., Gluchova Valentina. New design of combined electric machines to increase the efficiency of processing composite materials. Journal of the Technical University of Gabrovo. 2019. № 59. P.27–31.

5. Salenko Oleksandr, Chencheva Olga, Shchetynin Viktor, Gluchova Valentina, Lashko Evgeny, Budar Mohamed R.F. Cutting carbon-carbon composites by the diamond drills variable cyclic feed. Mechanics and Advanced Technologies. 2019. Vol 87, № 3. P.47–60.

6. Salenko Oleksandr, Chencheva Olga, Schetinyn Viktor, Gluchova Valentina, Lashko Evgeny, Budar Mohamed R.F. Increasing the efficiency of diamond drilling of carbon composites by a device with combined electric machines. Journal of the Technical University of Gabrovo. 2020. № 60. P.52–65.

7. Salenko O.F., Golovko L.F., Salenko A.O., R.H. Arhat, Budar Mohamed R.F. Principles of creating a diamond abrasive tool taking into account the features of the microcutting process. Journal of the Technical University of Gabrovo. 2020. № 61. P.8–21.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

8. Саленко О.Ф., Клименко С.А., Щетинін В.Т., Лашко Є.Є., Коваленко С.В., Будар Мохамед Р.Ф. Про використання функціонально-орієнтованого підходу при розробці гібридних процесів обробки композиційних матеріалів. Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали ХХ Міжнародної науково-технічної конференції, 10–13 вересня 2019 р. Херсон, 2019. С.290–294.

9. Саленко О.Ф., Мельничук С.П., Гаврушкевич А.Ю., Щетинін В.Т., Ченчева О.О., Будар Мохамед Р.Ф., Мельничук П.П. Гібридні процеси оброблення композиційних матеріалів: тенденції сучасного машинобудування. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: матеріали Х Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, 06–09 листопада 2019 р. Житомир, 2019. С.29–37.

10. Будар Мохамед Р.Ф., Шепеленко І.В. Формування поверхонь та їх властивостей у деталях із композиційних матеріалів і металів. Молодь і сільськогосподарська техніка у ХХІ сторіччі: матеріали XVI – го міжнародного форуму молоді. Харків, 2020. С.45.

11. Саленко О.Ф., Шепеленко І.В., Будар Мохамед Р.Ф. Формування алмазовмісних шарів на робочих поверхнях інструменту. Инженерия поверхности и реновация изделий: матеріали XX Міжнародної науково–практичної конференції, 01–05 червня 2020 р. Київ: АТМ України, 2020. С.100–103.

12. Будар Мохамед Р.Ф. Новий підхід до розробки інструментів, що використовуються для оброблення композиційних матеріалів, застосовуваних в авіації. Авіація, промисловість, суспільство: матеріали I Міжнародної науково–практичної конференції, присвяченої 60-річчю КЛК ХНУВС. Ч.1. Кременчук, 2020. С.166–169.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13. Пристрій для фрикційно–механічного нанесення антифрикційних покриттів: Пат. 102038 Україна: МПК В24В 39/00. № 201504042; заявл. 27.04.2015; опубл. 12.10.2015, Бюл. №19, 2 с.

14. Пристрій для визначення міцності зчеплення покриття з основним матеріалом. Пат. 133205 Україна: МПК G01N 19/04. № 201810652; заявл. 29.10.2018; опубл. 25.03.2019, Бюл. №6, 2 с.

АНОТАЦІЯ

Будар Мохамед Р.Ф. Підвищення ефективності алмазно–абразивного інструменту для обробки високоміцних композиційних матеріалів. – 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, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково–прикладної задачі підвищення ефективності алмазно–абразивного різання високоміцних композиційних матеріалів на основі раціонального формування щільності, фракційності елементів алмазовмісного шару робочої поверхні інструменту засобами лазерного термодформаційного спікання. Для пошуку оптимальних носіїв функцій як послідовності відмінних за властивостями кластерів було застосовано метод розрахунку питомої вартості корисної функції з урахуванням можливостей дискретизації головних функціональних поверхонь виробу з алмазним шаром, що забезпечує кінцеві властивості виробу системою показників якості з мінімальними матеріальними затратами. На основі моделювання взаємодії інструменту з поверхневим шаром композиту сформульовано основні вимоги до кластерів, встановлено закономірності зміни навантажень частин робочої поверхні і, відповідно, функціональних особливостей кластерів робочих поверхонь інструменту, отримано регресійні рівняння для визначення їх параметрів.

Зроблено висновок, що найбільш доцільним засобом забезпечення властивостей поверхонь є лазерний деформаційний спосіб формування поверхневого шару, який потребує певних удосконалень для підвищення керованості процесу формування відповідних кластерів. Удосконалено

математичну модель процесу, вперше врахувавши динаміку руху алмазних зерен та робочих органів.

Випробування розроблених інструментів показало їх високу ефективність при обробці композитів типу КІМФ, а похибка прогнозованих показників не перевищила 12–15%. Інструмент, створений на основі функціонального підходу з використанням запропонованої методики, відрізняється меншою швидкістю розвитку пошкоджень. Для забезпечення відповідності властивостей кластерів поверхні умовам подальшої роботи інструменту запропоновано виконувати реверсивний інжиніринг, який базується на принципі аналізу зношування інструменту впродовж його експлуатації.

Ключові слова: алмазно-абразивний інструмент, високоміцний композиційний матеріал, функціонально-орієнтований підхід, лазерне термодформаційне спікання, кластер поверхні, ефективність обробки.

ABSTRACT

Budar Mohamed R.F. Improving the efficiency of diamond-abrasive tools for processing high-strength composite materials. – 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, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and applied problem of efficiency increase of diamond–abrasive cutting of high-strength composite materials on the basis of rational density formation, elements fractionality of a diamond–containing layer of the tool working surface by means of laser thermodeformation sintering (LTDS). To find the optimal carriers of functions as a sequence of clusters with different properties, the method of the unit cost calculating of the useful function taking into account the discretization of the product main functional surfaces with a diamond layer, allowing to provide final properties of a product through system of quality indicators with the minimum material costs.

The method of searching for rational material carriers of functions to the tasks of improving products with a diamond layer has been adapted. The difference in the conditions of the tool interaction with a loose strong composite allows us to conclude that the tool as a whole should be considered as a set of individual microfragments that work in specific processing conditions. Each such fragment must have a set of useful features (functions) F_p , the set of which allows to reach the extremum of the objective function; in the case of a non-rigid diamond-containing tool – maximum productivity and work reliability. Because surface fragments can have similar properties, they can be considered clusters, the totality of which forms a diamond layer. To find a rational solution for improving the tool used functional–cost model of the system. It is obtained by combining functional and operational models of the object.

Based on the modeling of the tool interaction with the surface layer of the composite, the basic requirements for clusters are formulated, regularities of load changes of working surface parts and, accordingly, functional features of clusters of

the tool working surfaces are established. It is concluded that the most expedient means of ensuring the surfaces properties is a laser deformation method of surface layer formation, which requires certain improvements to increase the controllability of the corresponding clusters formation process. The mathematical model of the process was improved, which for the first time took into account the dynamics of diamond grains and working bodies movement.

It is established that for a small number of laser pulses the difference of the temperature distribution plots is insignificant (not more than 10%); provided that the surface heating for the implementation of the next deformation seal must be greater than 750°C, the diameter of the localized spot with a fixed beam is from 0,32 mm to 0,4 mm; to predict the degree of the impact localization, you can use the equation of temperature distribution on the body surface with temperature restrictions; increase in localization is possible due to change of methods and ways of mechanical sealing influence on a melt zone.

Based on the modeling of the tool behavior, the regularities of changes in the loads of the work surface parts and, accordingly, the functional features of the tool working surfaces clusters are established, according to which the requirements to the diamond-containing layer parameters are formulated, the verification of these requirements for compliance with the capabilities of the minimum cluster size and interconnection is performed, and the requirements for the LTDS process are formed. Perform a comparing the model and experimental results to the properties of the surface showed a relatively high convergence of the results: the error is 12–15%.

Keywords: diamond–abrasive tool, high-strength composite material, functionally–oriented approach, laser thermodeformation sintering, diamond–containing cluster, processing efficiency.

Підписано до друку 22.02.2021 р. Формат 60x90^{1/16}.

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

Наклад 100 прим. Замовлення № 611.

Віддруковано на ризографі в видавничому центрі «Принт-центр»

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

Тел./факс: 486-50-88, (050)712-40-80, (097)182-07-07, 277-40-16

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