

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"



ФЕДОРЕНКО ДМИТРО ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.923

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ
КРУГАМИ НА КЕРАМІЧНІЙ ЗВ'ЯЗЦІ ЗА РАХУНОК ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЇХ САМОЗАТОЧУВАННЯ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки,
верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Федорович Володимир Олексійович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри інтегрованих технологій
машинобудування ім. М. Ф. Семка.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Новіков Федір Васильович,
Харківський національний економічний
університет ім. Семена Кузнеця,
професор кафедри технологій та безпеки
життєдіяльності;

доктор технічних наук, професор
Калафатова Людмила Павлівна,
Донецький національний технічний
університет, м. Покровськ
професор кафедри прикладної механіки.

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків. вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «7» квітня 2021 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради

 Н.В. Зубкова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасному інструментальному виробництві застосування надтвердих матеріалів (НТМ) розглядається як пріоритетний курс, спрямований на збільшення швидкості обробки та розширення номенклатури оброблювальних матеріалів. Найбільш високопродуктивним способом обробки крихких важкооброблюваних матеріалів є шліфування із застосуванням алмазно-абразивного-інструменту (ААІ). При інтенсифікації режимів різання алмазними кругами виникає ряд недоліків, що проявляються в низькому алмазоутриманні, утворенні на зернах ділянок зносу, «засалюванні» поверхні інструменту часточками шліфувального шламу, що знижує продуктивність та спричиняє дефекти обробки. Відновлення різальних властивостей ААІ є тривалою і трудомісткою операцією, що негативно позначається на продуктивності і собівартості металообробки.

Перспективним напрямком підвищення ефективності роботи алмазних кругів є шліфування в режимі раціонального самозаточування, який забезпечує оновлення різальних поверхонь зерен та їх видалення з робочої поверхні після остаточної втрати різальної здатності. Управління процесом самозаточування дозволить забезпечити стійкість ААІ, що сприятиме підвищенню ефективності алмазно-абразивної обробки в цілому. В цьому сенсі особливої уваги заслуговують алмазні круги на керамічних зв'язках. В даний час не існує єдиного погляду на природу самозаточування, що ускладнює розробку дієвих методів впливу на робочу поверхню (РП) шліфувальних кругів. Найбільш перспективним способом вирішення задачі оптимізації технологічних параметрів виготовлення ААІ та шліфування в режимі раціонального самозаточування є моделювання процесів спікання алмазозносного шару та шліфування матеріалів з урахуванням властивостей зв'язок та оброблюваних матеріалів (ОМ). Отже, пошук шляхів удосконалення процесу алмазного шліфування кругами на керамічній зв'язці за рахунок забезпечення їх самозаточування є актуальною науково-практичною задачею, вирішення якої визначило напрям досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання роботи здійснювалось за планами науково-дослідних робіт кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» згідно завдань держбюджетних тем МОН України: «Підвищення ефективності алмазно-абразивної обробки за рахунок раціонального вибору структури круга і її фізико-механічних властивостей» (ДР № 0115U000510), «Створення методології динамічного 3D моделювання надшвидкісного алмазного шліфування надтвердих (алмазних) композиційних матеріалів на макро-, мікро- і нанорівні» (ДР №0111U002263), «Дослідження прискореного виготовлення складно-профільних виробів оборонного призначення на базі адитивних технологій і фінішної алмазно-абразивної обробки» (ДР №0120U001008), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є підвищення ефективності алмазного шліфування за рахунок реалізації раціонального самозаточування

кругів на керамічних зв'язках шляхом науково обґрунтованого визначення їх характеристик на етапі проектування, виготовлення та експлуатації інструменту.

Для досягнення означеної мети поставлені та вирішені наступні задачі:

1. Визначити причини втрати працездатності кругів на керамічних зв'язках; провести аналіз факторів, що обумовлюють здатність ААІ до самозаточування при шліфуванні.

2. Розробити методологію і створити моделі для тривимірного моделювання процесів мікрорівневого руйнування зерен при спіканні алмазоносного шару і шліфуванні кругами на керамічній зв'язці, враховуючи їх особливості.

3. Розрахунковим шляхом встановити основні причини руйнування зерен при виготовленні кругів на керамічних зв'язках; визначити механізм та умови раціонального самозаточування при шліфуванні.

4. Розрахунковим шляхом визначити вплив марки, зернистості та концентрації алмазних порошоків, властивостей зв'язки та параметрів виготовлення алмазоносного шару на обрані критерії працездатності алмазних кругів та встановити умови самозаточування при шліфуванні крихких важкооброблюваних матеріалів різних груп.

5. Визначити технологічні умови реалізації самозаточування алмазних кругів при використанні керамічних зв'язок, які відповідають встановленим умовам щодо збереження цілісності алмазних зерен (АЗ) при спіканні та раціонального алмазоутримання. Розробити керамічні зв'язки з комплексом заданих фізико-механічних, теплофізичних і технологічних властивостей та провести експериментальну верифікацію результатів теоретичних досліджень.

6. Розробити практичні рекомендації щодо раціональних характеристик алмазних кругів на керамічних зв'язках, параметрів їх виготовлення і режимів шліфування крихких важкооброблюваних матеріалів.

Об'єкт дослідження – процеси проектування, виготовлення та експлуатації ААІ на керамічних зв'язках.

Предмет дослідження – визначення раціональних характеристик алмазних кругів на керамічних зв'язках, умов їх виготовлення та експлуатації в режимі самозаточування.

Методи досліджень. Теоретичні розрахунки, модельні експерименти і експериментальні дослідження виконані на основі фундаментальних положень технології машинобудування і теорії шліфування, кінцево-елементного моделювання і статистичної обробки даних. При аналізі впливу факторів, що визначають умови самозаточування алмазних кругів, використані методи багатофакторного планування. Дослідження топографії робочої поверхні кругів виконували з використанням *3D-Laser-Scann-Mikroskop-Systems VK 9700*. Дослідження процесів фазоутворення, структури та фазового складу керамічних зв'язок та алмазовмісних композитів здійснювали з використанням рентгенофазового (рентгендифрактометр ДРОН 3М), диференційно-термічного (дериватограф *Q1100-D*), електронно-мікроскопічного (скануючий мікроскоп *JSM-6390LV*) методів аналізу. Дослідження проводилися на базі міжкафедральної лабораторії НТУ «ХПІ», Магдебурзького технічного університету, Вісмарської вищої школи (Німеччина) та Техаського університету А&М, (США).

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено можливість підвищення ефективності алмазно-абразивної обробки за рахунок створення умов для раціонального самозаточування алмазних кругів при використанні легкоплавких керамічних зв'язок з комплексом заданих властивостей. В рамках цього:

- вперше теоретично і експериментально встановлено, що основними причинами, що стримують широке використання алмазних кругів на існуючих керамічних зв'язках є невідповідність високої температури плавлення серійних зв'язок (понад 800 °С) та міцності алмазних зерен, що призводить до зниження різальної здатності через термодеструкцію зерен ще на стадії виготовлення кругів;

- отримала подальший розвиток методологія проектування ААІ на основі комплексного 3D моделювання стосовно алмазних кругів, здатних до самозаточування при шліфуванні крихких важкооброблюваних матеріалів;

- вперше здійснено мікрорівневе моделювання процесів спікання алмазозносного шару і шліфування з урахуванням температурних залежностей основних властивостей структурних компонентів круга, а також пористості зв'язки;

- вперше визначено умови реалізації раціонального самозаточування та оптимальні поєднання фізико-механічних і тепло-фізичних властивостей керамічної зв'язки залежно від пористості алмазозносного шару, концентрації і зернистості порошків марок АС4-АС6, які забезпечують раціональне самозаточування при шліфуванні крихких важкооброблюваних матеріалів;

- доведено, що склокерамічна зв'язка, розроблена на основі евтектичних композицій системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, за комплексом властивостей задовольняє визначеним умовам самозаточування круга та забезпечує отримання алмазозносного шару за температури спікання 600–620 °С. Використання добавки газоутворювача (2,0–2,5 мас. % Li_2CO_3) або структуроутворюючого наповнювача (20–30 мас. % техногенних мікросфер), дозволяє збільшити загальну пористість алмазного круга до 25–33% і 45–50 % відповідно та підвищити працездатність інструменту за рахунок раціонального самозаточування.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудівної промисловості України полягає в удосконаленні методики 3D моделювання НДС алмазозносного шару при виготовленні і експлуатації ААІ. Розроблено методологію та алгоритм вибору раціональної структури алмазозносного шару ААІ на керамічних зв'язках, який дозволяє інтегровано підійти до вибору інструменту для шліфування різних груп матеріалів в режимі самозаточування. Запропоновано спосіб виготовлення алмазного круга на керамічній зв'язці, який забезпечує постійне оновлення різальних поверхонь зерен при шліфуванні за рахунок технологічного успадкування залишкових напружень, що виникають при спіканні алмазозносного шару (Патент 109912).

Розроблено технологічні принципи проектування склокерамічних зв'язок із заданими властивостями і рецептурно-технологічні параметри їх отримання (Патент 122478). Надано рекомендації щодо виготовлення і експлуатації алмазних кругів з підвищеною пористістю, які створюють умови для раціонального самозаточування при експлуатації інструменту. Результати

розробок впроваджено у виробництво ТОВ «Інстайл»; ефективність запропонованих рішень підтверджено випробуваннями в умовах ТОВ «Компанія ЗБРОЯ». Результати дисертаційної роботи використано у навчальному процесі кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ «ХП» при підготовці фахівців за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, викладені в дисертації та винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Зокрема: аналіз науково-технічної і патентної літератури щодо сучасного стану виробництва та особливостей технології ААІ; розробка мікрорівневих моделей та здійснення імітаційного моделювання процесів виготовлення алмазних кругів та шліфування; реалізація планованих експериментів, розробка керамічних зв'язок і алмазовмісних композицій; аналіз, обробка та інтерпретація результатів. Постановку задач досліджень, формулювання основних наукових положень роботи здобувач виконував разом із науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались на наукових семінарах кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка НТУ «ХП» та науково-технічних конференціях: «International Scientific Conference MicroCAD» (Угорщина, Мішкольц, 2010 р); «Високі технології в машинобудуванні» (Харків-Алушта, 2011), «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2012–2014, 2017); «Інновации в материаловедении» (Москва, 2013), «Машинобудування очима молодих» (Суми, 2014), «Прикладні науково-технічні дослідження» (Івано-Франківськ, 2017), «Композиційні матеріали» (Київ, 2014, 2018).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 25 наукових працях, у тому числі в 13 статтях: 9 – у наукових фахових виданнях України, одне з яких входить до наукометричної бази Scopus, 4 – у закордонних фахових виданнях, що входять до бази Scopus, 2 патенти України та 10 тез доповідей на міжнародних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 233 сторінки, з них: анотація на 14 сторінках, зміст на 2 сторінках, 76 рисунків (в т.ч. 45 рисунків на 29 окремих сторінках), 33 таблиці (в т.ч. 12 таблиць на 10 окремих сторінках); список використаних джерел з 234 найменувань на 24 сторінках; 7 додатків на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано її мету та завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрито наукову новизну і практичну значимість роботи, наведено дані про апробацію результатів, наукові публікації і структуру роботи.

В **першому розділі** розглянуто сучасний стан та тенденції розвитку технології виготовлення ААІ, проаналізовано причини зниження ефективності алмазного шліфування, висвітлені теоретичні і технологічні передумови та матеріалознавчі аспекти отримання високоресурсних інструментів, а також

розглянуто сучасні методи комп'ютерного моделювання, які використовують для прогнозування впливу технологічних факторів на процес шліфування.

Аналіз науково-технічної літератури показав, що шліфування алмазними кругами стандартної якості відрізняється підвищеними питомими витратами алмазів, що суттєво знижує їх працездатність. Дослідженню цієї проблеми присвячені праці М. Morgan, А. Р. Markopoulos, Л. В. Худобіна, В. І. Лавриненко, А. І. Грабченко, Т. Н. Лоладзе, Ф. В. Новікова, Л. П. Калафатової, В. І. Кальченко, М. В. Новікова, А. В. Якімова, В. О. Федоровича, Л. Л. Мішнаєвського, Ю. Д. Філатова та інших. За даними різних авторів в алмазних кругах з матриці випадає від 30 до 95% зерен, не досягаючи значного зносу.

Для реалізації потенціалу ААІ на керамічних зв'язках необхідним є науково-обґрунтований підхід до створення алмазних кругів із комплексом заданих технологічних, фізико-механічних і теплофізичних властивостей. Аналіз сучасних методологій визначення оптимальних характеристик алмазоносного шару, показав, що розробка алмазовмісного керамоматричного композиту (АКК) має базуватись на прогнозуванні термосилових навантажень, що виникають в процесі виготовлення та експлуатації алмазних кругів та визначають процеси їх руйнування. Аналіз публікацій показав, що при дослідженні складних фізичних процесів методи комп'ютерного моделювання перевершують чисельні методи, оскільки сучасне програмне забезпечення дозволяє уникнути похибок складних аналітичних розрахунків та імітувати процес мікрорізання з найменшими припущеннями як за статичних, так і за динамічних умов.

На підставі проведеного аналізу наукової літератури відповідно до поставленої мети визначено задачі досліджень та напрями їх розв'язання.

В другому розділі розглянуто питання загальної методології досліджень, представлено методики та програмне забезпечення, які були використані для тривимірного комп'ютерного моделювання процесів спікання алмазоносного шару і шліфування, надано характеристику матеріалів обладнання та умов проведення експериментів. Викладена удосконалена методологія моделювання процесу спікання алмазоносного шару ААІ і шліфування в режимі самозаточування, що базується на кінцево-елементних розрахунках, описані умови проведення імітаційних експериментів та розроблені 3D моделі, які відображають структурно-фазові особливості алмазоносного шару (рис. 1). 3D моделювання проводили з використанням сучасного програмного забезпечення (*SOLIDWORKS Simulation, Ansys, ABAQUS* і *LS-Dyna*). Для визначення раціональних характеристик алмазоносного шару, параметрів виготовлення та експлуатації алмазних кругів використовували адаптовану методику багатofакторного планування імітаційного експерименту.

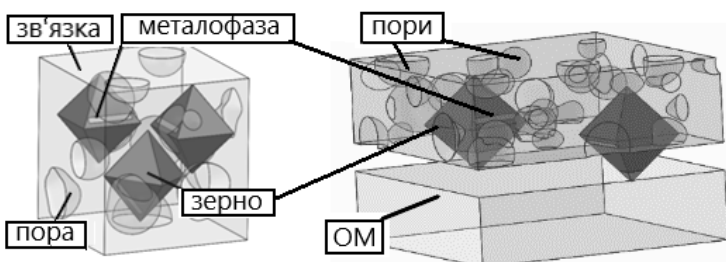


Рисунок 1 – Приклади 3D моделей для дослідження напружено-деформованого стану систем:

а) при спіканні; б) при шліфуванні

Спільно з кафедрою технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей НТУ «ХП» розроблено склад легкоплавкої керамічної зв'язки, яку використовували при виготовленні алмазних кругів. В розділі надано характеристику матеріалів, використаних при розробці склокерамічних зв'язок та алмазовмісних композитів на їх основі, викладено відомості щодо технології виготовлення АКК різних типів, а також описані методики і обладнання для експериментальних випробувань. Дослідження процесів фазоутворення, структури та фазового складу склокерамічної зв'язки і техногенних мікросфер здійснювали з використанням взаємодоповнюючих методів фізико-хімічного аналізу при залученні дериватографа *Q1100-D* системи *Paulik-Paulik-Erdey*, рентгендифрактометра ДРОН 3М і скануючого електронного мікроскопу *JSM-6390LV Jeol*. Оцінку цілісності зерен після спікання АКК проводили з використанням оптичного мікроскопу *MarVision MM-200*. Для проведення випробувань алмазних кругів застосовували верстат *PCD100 (LACH-Diamant Werkzeuge GmbH)*. Як оброблюваний матеріал досліджували АСПК та твердий сплав ВК8. Питому втрату алмазних зерен визначали за загальноприйнятою методикою. Визначення особливостей процесу шліфування і вимірювання шорсткості оброблених поверхонь проводили відповідно до міжнародного стандарту JIS В 0601:2001 (ISO 4287:1997) та включали дослідження 3D топографії робочої поверхні круга з використанням метода лазерного сканування (*3D-Laser-Scann-Mikroskop-Systems VK 9700*). Обробку результатів вимірювань проводили з використанням програми *VK Analyzer Plus*.

Третій розділ присвячений дослідженням і аналізу впливу факторів, що визначають цілісність зерен при спіканні алмазозносного шару на етапі виготовлення інструменту. Перевагою мікрорівневого моделювання за методом кінцевих елементів (МКЕ) в даному випадку є можливість вивчення напружено-деформованого стану (НДС) у всіх елементах системи з урахуванням їх взаємодії при варіюванні фізико-механічних і теплофізичних властивостей елементів системи та умов її навантаження. Для оцінки ймовірності руйнування алмазних зерен (АЗ) і зв'язки під дією термосилових навантажень значення еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}}$, розраховані відповідно до теорії Мора-Кулона, порівнювали з гранично допустимими значеннями напружень σ_p елементів системи.

Розрахунки показали, що при підвищенні температури спікання алмазозносного шару понад 600 °С в зернах в області металофази виникають руйнуючі зерна напруження $\sigma_{\text{екв}} > \sigma_p$. Експериментальні дослідження стану зерен при нагріванні в інтервалі температур 600–800 °С показали, що наявність критичних для зерна напружень в окремих мікроділянках зерна не є достатньою умовою його руйнування. Так, за температури 650 °С в зернах АС6 125/100 утворюються мікротріщини (рис. 2); при подальшому збільшенні температури відбувається їх розвиток, що призводить до руйнування зерна. Встановлено, що помітне руйнування зерна при нагріванні відбувається за умови, якщо його об'єм $V\sigma_p$, де виникають руйнуючі напруження, перевищує 10 %. Тому в подальшому оцінку стану алмазних зерен здійснювали за значенням об'єму зерна $V\sigma_p$, де напруження перевищують межу міцності при розтягненні (σ_p) для АЗ заданої марки і зернистості.

Розрахунки показали, що головним чинником руйнування АЗ є висока температура спікання алмазоносного шару ($T_{сп}$), яка викликає появу критичних напружень в зернах з високим вмістом включень металофази, що пояснюється інтенсивним розширенням включень при нагріванні та значним перевищенням КТР металофази над КТР алмазу (рис. 3).

Моделювання спікання алмазоносного шару на серійній керамічній зв'язці К1-01 в інтервалі температур 500–800 °С показало, що вже за температури 650 °С в зерні АС6 125/100, що містить 6 % металофази $Fe_{95}Si_5$, рівень напружень $\sigma_{екв}$ перевищує міцність зерен σ_p в 2,8 раз. При моделюванні впливу металофази на стан системи при спіканні розглянуті сплави ростової системи, які застосовують при синтезі АЗ. Встановлено, що підвищення майже вдвічі КТР металофази призводить до збільшення локальних напружень в зерні в 1,5 рази. При цьому розрахунки показали, що руйнування зерна ймовірно тільки при нагріванні до 700 °С і вище ($V\sigma_p \geq 15\%$), тоді як в умовах спікання композиту за температури 600–650 °С руйнування зерен є малоймовірним ($V\sigma_p \leq 10\%$). При збільшенні вмісту металофази в зернах марок АС2–АС15 спостерігається експонентне збільшення напружень. Як видно з отриманих даних (рис. 4), максимальний рівень напружень $\sigma_{екв}$ на ділянках металофази в зернах різних марок відрізняється незначно (до ~9%); натомість об'єми зерен, де зафіксовані руйнуючі напруження, відрізняються майже вдвічі.

Встановлено, що для забезпечення цілісності зерен марок АС2–АС6 температура спікання алмазоносного шару не повинна перевищувати 600–650 °С, що обумовлює необхідність розробки більш легкоплавких зв'язок. Позитивним технологічним чинником є також

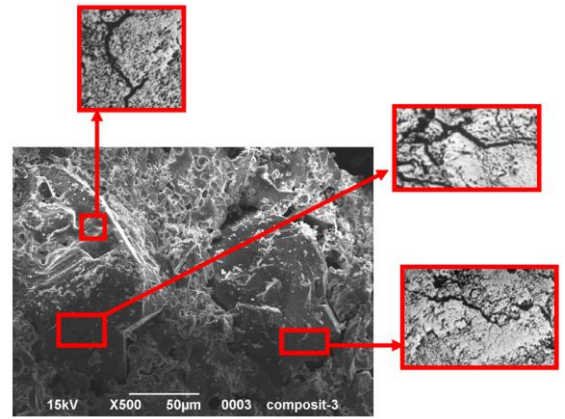
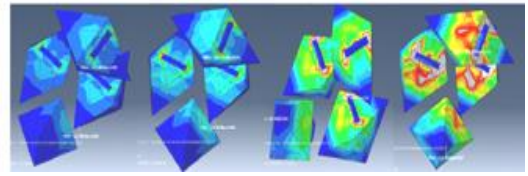


Рисунок 2 – SEM-знімки зерна після спікання алмазоносного шару за температури 650 °С

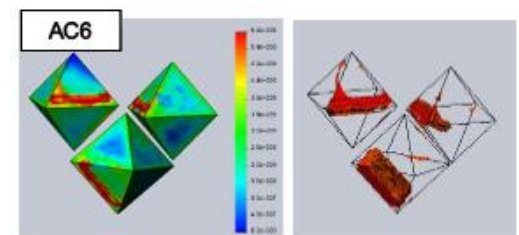
Збільшення на виокремлених ділянках $\times 2000$

500 °С 600 °С 700 °С 800 °С



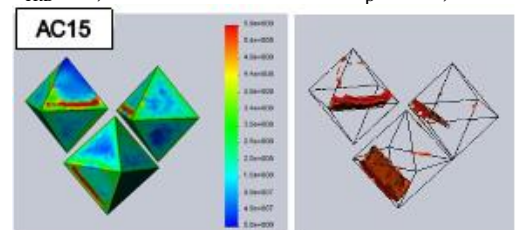
$\sigma_{екв}$ 0,195 ГПа 0,452 ГПа 0,751 ГПа 0,864 ГПа

Рисунок 3 – Розподіл напружень в зерні АС6 125/100 за різних температур спікання алмазоносного шару
Зерна АС6 125/100; металофаза $Fe_{44}Co_{44}(Cr_3C_2)_{12}$ (відн. вміст 6%)
зв'язка К1-01 (прихована)



$\sigma_{екв} = 0,760$ ГПа

$V\sigma_p = 21,44\%$



$\sigma_{екв} = 0,690$ ГПа

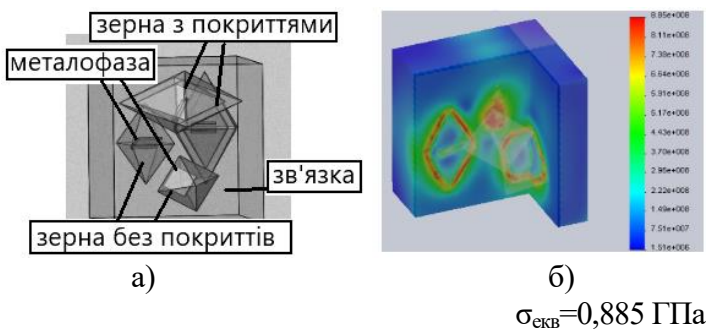
$V\sigma_p = 8,83\%$

Рисунок 4 – Розподіл напружень в зернах при спіканні алмазоносного шару
Зерна АС6 125/100 і АС15 125/100
металофаза $Fe_{95}Si_5$ (відн. вміст 6 і 2,2 %);
зв'язка К1-01 (прихована);
температура спікання 750 °С

використання АЗ, синтез яких відбувався з застосуванням Fe-Co-Cr-вмісних сплавів-розчинників з відносно невисоким КТР ($\sim 9 \cdot 10^{-6}$ 1/К).

Розрахунки показали, що із збільшенням концентрації зерен в алмазозносному шарі від 25 % до 200 % рівень напружень $\sigma_{\text{екв}}$ в зерні збільшується в 1,6–2,2 рази, що, вірогідно, пояснюється накладанням полів напружень сусідніх зерен, які зближуються в умовах високих концентрацій. При цьому осередки критичних напружень дислокуються на гранях октаедру, що імітує зерна. Встановлено, що за температури спікання 650 °С при 200 %-ній концентрації зерен АС6 125/100 вірогідним є їх руйнування ($V\sigma_p = 15,3$ %). Враховуючи, що із збільшенням зернистості порошків марки АС6 від 50/80 до 125/100 їх міцність при розтягуванні σ_p зменшується (з 0,84 до 0,2 ГПа), при використанні крупнозернистих алмазних порошків слід мінімізувати вплив інших факторів на виникнення напружень: зменшувати температуру спікання, концентрацію зерен, КТР та вміст металофази.

Для запобігання передчасному руйнуванню АЗ при спіканні алмазозносного шару круга існує практика нанесення захисних покриттів. Рис. 5 ілюструє ефект використання захисного покриття на основі Ni. Результати розрахунків показали, що покриття на основі натрійборосилікатного скла дозволяє зберегти цілісність зерен тільки до 700 °С (рис. 6), тоді як нікелеве покриття виконує свою функцію за більш високих температур спікання (750–775 °С).



Зерна АС6 125/100,
Металофаза $\text{Ni}_{39,6}\text{Mn}_{59,6}(\text{Cr}_3\text{C}_2)_{0,8}$
(відн. вміст 6%); зв'язка К1-01;
захисне покриття на основі Ni
температура спікання 800 °С

Рисунок 5 – а) 3D модель системи «зв'язка – зерно– металофаза – покриття»; б) розподіл напружень в перетині моделі, що імітує спікання алмазозносного шару

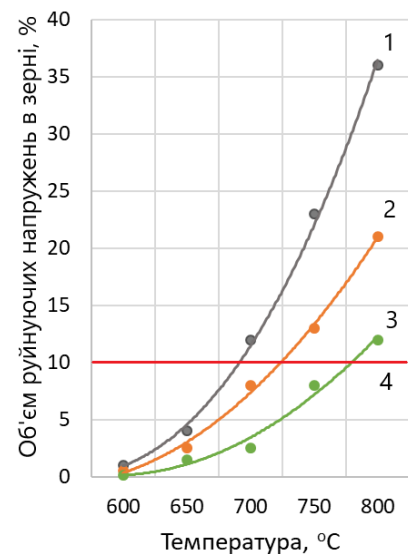


Рисунок 6 – Температурні залежності еквівалентних напружень в зернах:
1 – без покриттів; 2 – з покриттям на основі N-B-S скла; 3 – з покриттям на основі Ni; 4 – межа руйнування зерен АС6 125/100

З огляду на той факт, що збільшення об'єму руйнуючих напружень в зерні $V\sigma_p$ у великій мірі залежить від температури спікання композиту, була висунута гіпотеза, що здатність зерен до самозаточування при шліфуванні визначається температурними умовами виготовлення алмазозносного шару. Обробка результатів моделювання дозволила рекомендувати діапазон раціональних температур спікання алмазних кругів, здатних до раціонального самозаточування.

Експериментальна перевірка підтвердила висунуту робочу гіпотезу: електронно-мікроскопічні дослідження показали, що при дотриманні рекомендованої температури спікання алмазоносного шару в зернах утворюються мікротріщини, які обумовлюють їх передруйнівний стан та забезпечують раціональне самозаточування при шліфуванні. При перевищенні рекомендованих температур спікання на 50 °С ступінь руйнування зерен Q_p збільшується: з 2,8% до 12,5% для зерен АС4 125/100 і з 2,6% до 10,9 % для зерен АС6 125/100.

Дослідження показали, при виготовленні алмазоносного шару на зерна діють одночасно кілька чинників (температура спікання композиції, КТР та кількість металофази в зернах, концентрація зерен в зв'язці, КТР і модуль пружності зв'язки), отже напруження формуються в результаті їх взаємовпливу. Для визначення раціональних характеристик складових алмазоносного шару проведено серію імітаційних експериментів з використанням багатофакторного планування (план В4). В результаті обробки даних отримано рівняння регресії, які адекватно описують вплив обраних факторів на критерії руйнування зерен:

$$\sigma_{\text{екв}} = 0,302 + 0,081X_1 + 0,004X_2 + 0,032X_3 + 0,107X_4 - 0,001X_1X_2 - 0,001X_1X_3 + 0,028X_1X_4 + 0,007X_2X_3 + 0,002X_2X_4 + 0,011X_3X_4 \quad (1)$$

$$V_{\sigma_p} = 12,595 + 5,28X_1 + 0,489X_2 + 1,437X_3 + 8,226X_4 - 0,159X_1X_2 - 0,503X_1X_3 + 3,582X_1X_4 + 0,567X_2X_3 + 0,437X_2X_4 + 0,812X_3X_4 + 0,713X_1^2 - 1,229X_2^2 - 1,183X_3^2 + 0,519X_4^2 \quad (2)$$

де X_1 – КТР металофази, 1/К; X_2 – модуль пружності зв'язки, ГПа; X_3 – КТР зв'язки, 1/К, X_4 – температура спікання алмазоносного шару.

За результатами обробки планованого експерименту встановлено оптимальні значення факторів, що визначають цілісність зерен при спіканні, в т.ч. основні властивості зв'язки ($\alpha = (3 \div 5) \cdot 10^{-6}$ 1/К; $E = 0,9 \div 1,2$ ГПа, а також температуру плавлення 600 ÷ 650 °С), яка має забезпечити низькотемпературне спікання алмазоносного шару та виконання умов самозаточування зерен. Додержання цих рекомендацій дозволяє виключити необхідність додаткової технологічної операції нанесення на АЗ захисних покриттів за умови зниження температури спікання алмазоносного шару до ~650 °С.

Подальші розрахунки показали, що збільшення пористості алмазоносного шару до 40 об.% знижує рівень напружень на зерні на ~12 %, що зменшує імовірність руйнування АЗ на етапі спікання. З використанням симплекс-градчастого планування визначено раціональне співвідношення структурних складових для випадку використання зерен АС6 125/100 і зв'язки, властивості якої рекомендовані за результатами розрахунків, здійснених за МКЕ. Встановлено, що для забезпечення самозаточування зерен і збереження їх цілісності за температури спікання 620 °С, слід дотримуватися наступного вмісту складових алмазоносного шару, об. %: зв'язка – 40 ÷ 60; пори – 20 ÷ 40; зерна – 10 ÷ 15 об.% (відповідає концентрації АЗ в межах 40–60%).

Отже використання комплексу запропонованих технологічних рішень при виробництві ААІ дозволить вирішити проблему передчасного руйнування зерен та забезпечить підвищення ефективності самозаточування інструменту.

Четвертий розділ присвячений аналізу факторів, що визначають стійкість керамоматричних алмазних кругів при шліфуванні важкооброблюваних

матеріалів. З використанням 3D моделювання за МКЕ досліджено вплив якісних і кількісних характеристик включень металофази, концентрації зерен, ступеня їх зносу та рівня закладення в зв'язку на здатність круга до шліфування різних важкооброблюваних ОМ в режимі самозаточування. Приклад розрахунків для випадку зерен різних марок представлені на рис. 7. Визначено, що переважний вплив на напруження в системі, має температура шліфування. Ділянки, де зафіксований максимальний рівень напружень, локалізовані як в області включень металофази, так і на контактах «зерно – ОМ». Об'єми таких ділянок ($V\sigma_p$) збільшуються при підвищенні твердості ОМ. Результати розрахунків свідчать, що за ступенем впливу на рівень напружень, що виникають в об'ємі зерен при шліфуванні, розглянуті фактори можна розташувати в ряд: склад металофази > розмір металофази > твердість ОМ > форма включень металофази.

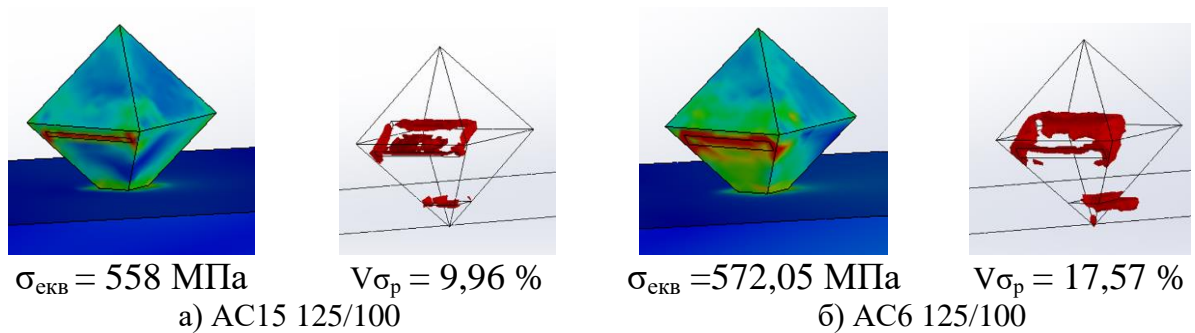
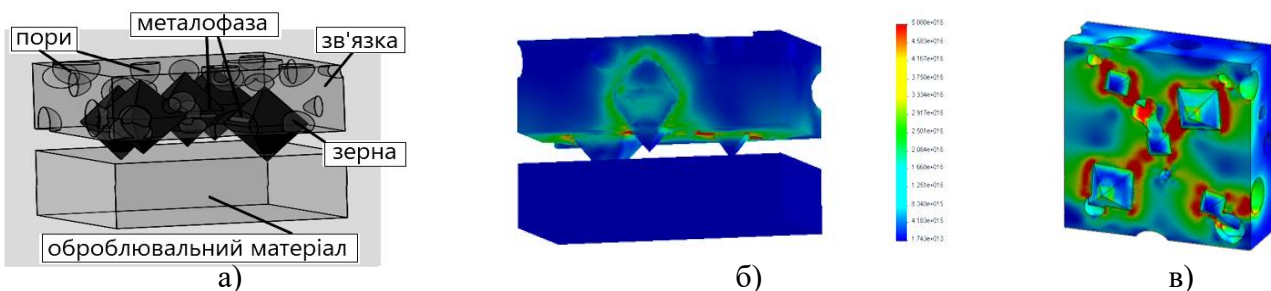


Рисунок 7 – Розподіл напружень в зерні при шліфуванні кругами з зернами різних марок
металофаза $Fe_{95}Si_5$ (2% і 6%); зв'язка K1-01 прихована; ОМ – АСПК;
навантаження – $P_y = 3\text{МПа}$, $P_z = 1,9\text{МПа}$ температура в зоні шліфування $800\text{ }^\circ\text{C}$

Дослідження впливу концентрації зерен і пористості зв'язки на НДС системи при шліфуванні різних ОМ показали, що при високій концентрації зерен (понад 50 %) збільшується ймовірність видалення зерен з потенційно високими різальними властивостями, що спричинятиме швидкий знос інструменту. При зменшенні концентрації до 50% створюються умови для раціонального самозаточування зерен за рахунок збільшення навантаження на одичне зерно. Встановлено, що рівень $\sigma_{\text{екв}}$ на контактах «зерно–зв'язка» та на перетинках між порами перевищує міцність зв'язки (рис. 8). При збільшенні пористості алмазоносного шару до 40 об.% зростає об'єм областей зв'язки, де $V\sigma_p \geq \sigma_{\text{р.зв}}$, що підвищує ймовірність її руйнування, і, як наслідок, випадіння з робочої поверхні (РП) круга «відпрацьованих» зерен та розкриття нових.



Зерно AC6 125/100 (конц. 50%), металофаза $Ni_{39,6}Mn_{59,6}(Cr_3C_2)_{0,8}$ (відн. вміст 6%); зв'язка РМ з рекомендованими властивостями і пористістю ($\Pi = 20\%$); ОМ – АСПК
Рисунок 8 – Моделювання процесу шліфування кругом з пористим алмазоносним шаром:
а) 3D модель; б, в) епюри розподілу напружень

Показано, що варіювання пористості дозволяє керувати процесом руйнування зв'язки і оновлення РП круга. Встановлено, що раціональне алмазоутримання в пористій керамічній матриці ($\Pi = 35\text{--}40$ об.%) можливе за умови високої міцності зв'язки ($E \geq 95$ ГПа), що забезпечить достатню стійкість ААІ.

Одним із важливих чинників самозаточування при шліфуванні є глибина закладення зерен. Дослідження алмазоутримання проводили на 3D моделі (рис. 9), яка включала 5 зерен з різною глибиною закладення (в межах $2/8h\text{--}6/8h$).

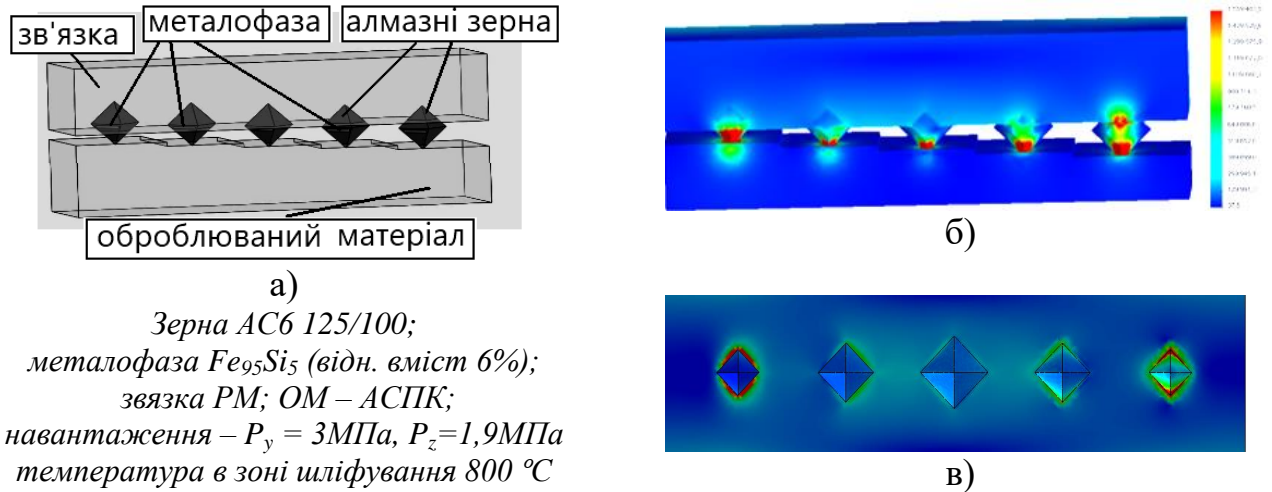


Рисунок 9 – Моделювання впливу глибини закладення зерен в зв'язці на напруження в алмазоносному шарі при шліфуванні: а) 3D модель системи, що імітує шліфування; б) розподіл напружень в перетині моделі; в) розподіл напружень в зв'язці (зерна приховані)

Алмазоутримання оцінювали за рівнем напружень в зв'язці при шліфуванні. Визначено, що при збільшенні глибини закладення зерен в зв'язці зростають напруження на контакті «зерно – ОМ», що свідчить про підвищення ймовірності мікросколів на затуплених ділянках зерна. Це спричинятиме утворення нових різальних крайок і, як наслідок, самозаточування зерен. При зменшенні глибини закладення зерна зростають напруження навколо нього, що, ймовірно, призведе до випадання зерна через руйнування зв'язки. Розрахунки показали, що використання зв'язки РМ, властивості якої рекомендовані за результатами моделювання процесу спікання алмазоносного шару, дозволяє зменшити в 1,6 разів допустиму з точки зору алмазоутримання глибину закладення зерен.

Дослідження впливу ступеня зносу зерен на НДС системи в зоні шліфування проводили на моделі, яка містить зерна з різними ділянками зносу (5×5 , 10×10 і 20×20 мкм), а також різним положенням зерен: під кутами 90° і 70° головної осі біпіраміди відносно ОМ (рис. 10). Встановлено, що в міру остаточної втрати зернами різальної здатності (з утворенням великих ділянок зносу) зростання напружень на контактній поверхні «зерно–зв'язка» викликати їх видалення з РП круга в разі, якщо рівень напружень $\sigma_{\text{екв}}$ перевищує міцність зв'язки (σ_p). В свою чергу, як зазначалось вище, рівень і характер розподілу руйнуючих напружень в зв'язці переважно залежить від її пористості та модуля пружності. Отже, ґрунтований вибір зв'язки є однією з обов'язкових умов управління процесом самозаточування алмазних кругів.

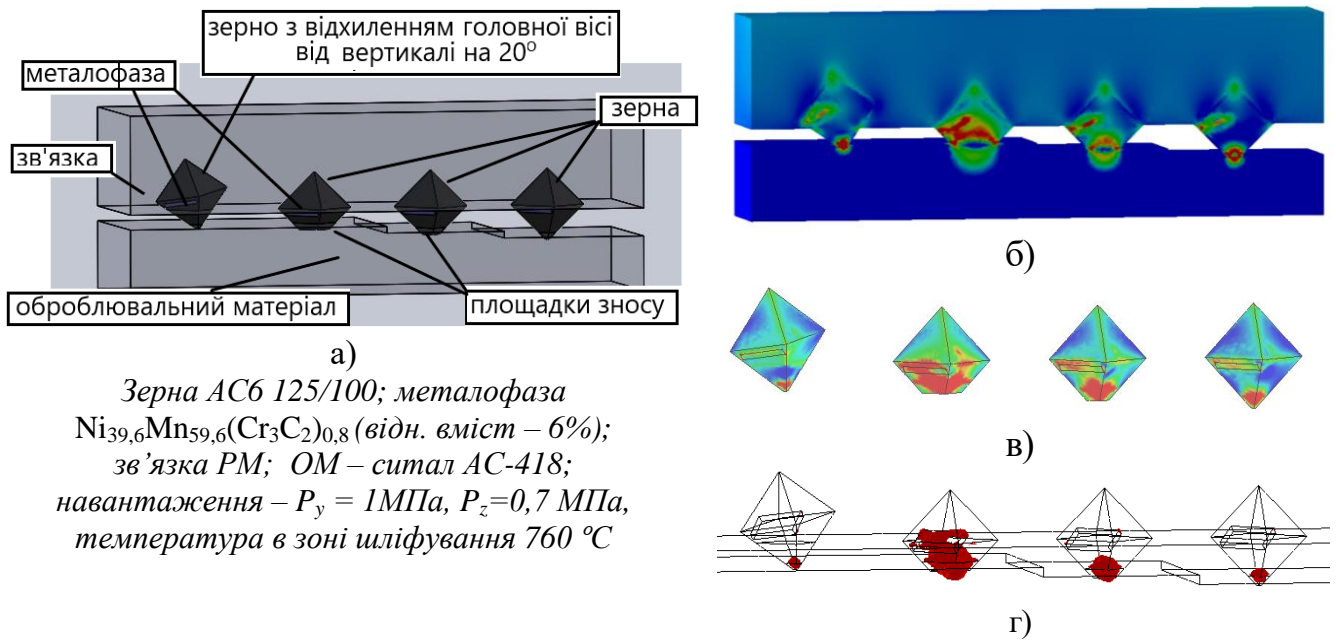


Рисунок 10 – Моделювання ступеня зносу зерен та їх положення в зв'язці на напруження в алмазоносному шарі: а) 3D модель системи, що імітує шліфування; б) розподіл напружень в перетині моделі; в) епюра з прихованою зв'язкою і ОМ; г) розподіл руйнуючих напружень в об'ємі зерен (зв'язка і ОМ приховані)

Для визначення оптимальних параметрів алмазного круга і умов шліфування крихких важкооброблюваних матеріалів в режимі самозаточування використовували повнофакторне планування (план В4). Як найбільш впливові фактори розглядали: КТР металофази, модуль пружності зв'язки, модуль пружності ОМ і температуру в зоні шліфування. В результаті обробки даних планованого модельного експерименту отримано рівняння регресії, що адекватно описує процес шліфування в режимі самозаточування:

$$\sigma_{\text{скв}} = 0,333 + 0,102X_1 + 0,004X_2 + 0,009X_3 + 0,226X_4 - 0,003X_1X_3 + 0,036X_1X_4 + 0,004X_2X_3 + 0,001X_2X_4 + 0,003X_3X_4 + 0,041X_1^2 + 0,036X_2^2 + 0,032X_3^2 + 0,037X_4^2 \quad (3)$$

де X_1 – КТР металофази, 1/К; X_2 – модуль пружності зв'язки, Па;

X_3 – модуль пружності оброблювального матеріалу, Па, X_4 – температура в зоні шліфування, $^\circ\text{C}$.

Розрахунок оптимальних значень факторів, виконаний з використанням програми *Maple 14*, дозволив надати рекомендації щодо характеристик алмазних зерен і керамічної зв'язки, а також раціональних режимів шліфування крихких важкооброблюваних матеріалів.

У п'ятому розділі реалізовано результати теоретичних досліджень та проведена оцінка ефективності запропонованих технічних рішень. Розробку легкоплавкої склокерамічної зв'язки із заданими властивостями здійснювали на основі аналізу діаграм стану оксидних систем та прогнозних розрахунків технологічних, фізико-механічних і теплофізичних властивостей. Як базова обрана оксидна композиція на основі системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{V}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, модифікована оксидами літію і титану. В результаті вирішення задачі оптимізації з урахуванням прийнятих обмежень (табл. 1), визначено склад зв'язки, яка задовольняє прийняті вимоги, забезпечує спікання алмазоносного шару за температури $600-620\text{ }^\circ\text{C}$ та

формування фаз з високою температурою плавлення та твердістю (рис. 11), що сприяє збільшенню жаростійкості та зносостійкості склокерамічної зв'язки.

Таблиця 1 – Задані обмеження на властивості керамічної зв'язки

Властивості зв'язки	Min	Max
В'язкість розплаву за температури варки 1000 °C η_v , Па·с	-	10
В'язкість розплаву за температури спікання композиту $\eta_{сп}$ Па·с	10^3	10^4
Поверхневий натяг розплаву за температури спікання композиту $\sigma_{сп} \cdot 10^{-3}$, Н/мм ²	0,175	0,275
Температурний коефіцієнт лінійного розширення, $\alpha_{20-400} \cdot 10^6$, град ⁻¹	4,5	6,5
Модуль пружності E, ГПа	95	120

З використанням розробленої зв'язки виготовлено зразки алмазних кругів із закритою пористістю ($P=25-33\%$) при використанні газотворюючої добавки (2,0–2,5 мас. % Li_2CO_3) та з відкритою пористістю ($P=45-50\%$) при застосуванні як структурного наповнювача золосфер, вилучених з золи-виносу ТЕС. Мікроструктура останніх представлена на рис. 12. Алмазоносний шар складається з склокерамічної матриці, яка утримує АЗ і золосфери та містить ізольовані і сполучені пори розміром 100–200 мкм. Зв'язка щільно огортає зерна, забезпечуючи необхідне алмазоутримання на РП. Після шліфування впродовж 3 хв на поверхні алмазного зерна помітні ділянки зносу та їх сколи, утворені в результаті розвитку мікротріщин, успадкованих на етапі спікання алмазоносного шару (рис 12б). Золосфери, в яких за даними рентгенофазового аналізу утворюються високотверді фази (шпінель, герциніт і муліт), не зазнають остаточного руйнування, а утворюють додаткові різальні елементи.

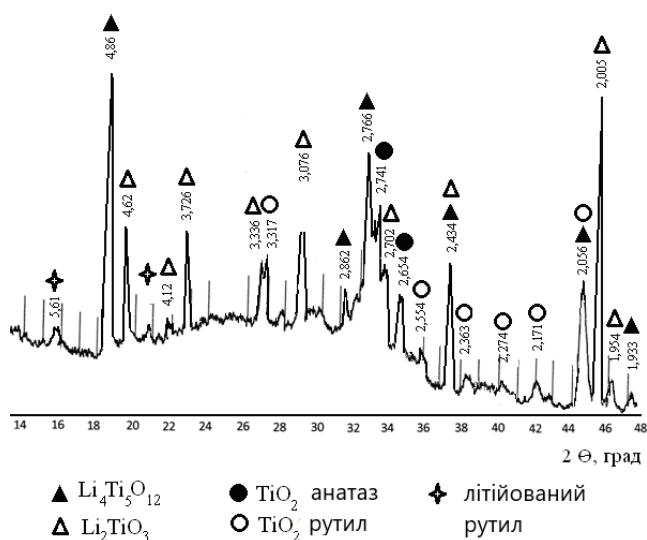


Рисунок 11 – Фрагмент рентгенограми легкоплавкої склокристалічної зв'язки

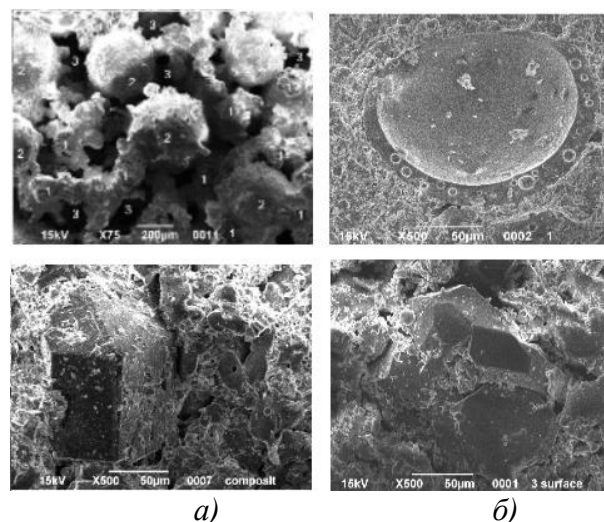


Рисунок 12 – SEM-знімки робочої поверхні алмазного круга: а) до шліфування; б) після шліфування

Ідея комплексного підходу до вибору раціонального складу і структури керамоматричного алмазоносного шару втілена у запропонований алгоритм, який

дозволяє визначити належну комбінацію характеристик структурних складових кругів для шліфування крихких важкооброблюваних матеріалів.

На базі виробництва ТОВ «Інстайл» виготовлені зразки алмазних кругів 12A2-45 125x10x3x40x32 AC6 125/100 6-8 V-2. Шліфування дослідними кругами проводили за жорсткою схемою без охолодження при сталій поздовжній подачі ($S_{\text{п}} = 0,02$ мм/дв.ход) та варіюванні поперечної подачі і швидкості шліфування в наступних межах: $S_{\text{поп}} = 0,01-0,05$ мм/подв. хід з кроком 0,01 мм; $v_{\text{к}} = 20-40$ м/с з кроком 5 м/с. В якості критеріїв стійкості алмазних кругів та їх здатності до раціонального самозаточування розглядали питомі витрати алмазних зерен (q_v , мг/см³). За даними порівняльних випробувань встановлено зниження питомих витрат зерен для кругів на розробленій легкоплавкій зв'язці в порівнянні з серійними кругами (на зв'язках K1-01 і K20), для яких при збільшенні швидкості шліфування до 40 м/с показники q_v відрізняються практично в 2 рази. У той же час круги на розробленій зв'язці працюють в режимі раціонального самозаточування впродовж всього часу шліфування завдяки поступовому мікроруйнуванню зерен і оновленню їх різальних поверхонь. За результатами дослідно-промислових випробувань в умовах ТОВ «Компанія ЗБРОЯ» встановлено підвищення продуктивності шліфування кругами на новій зв'язці в 1,7-1,8 рази при зниженні собівартості алмазного шліфування в 1,5 рази і збереженні необхідної якості обробки твёрдосплавних пластин.

Отже, проведені випробування підтвердили ефективність використання розроблених алмазних кругів на легкоплавкій склокерамічній зв'язці.

В додатках представлені акти випробувань, акти впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес, фрагменти комп'ютерних програм, а також отримані патенти та перелік публікацій.

ВИСНОВКИ

В дисертації вирішено важливу науково-практичну задачу удосконалення алмазного шліфування за рахунок забезпечення раціонального самозаточування кругів на керамічній зв'язці. При виконанні роботи отримано такі результати:

1. Охарактеризовано сучасний стан технології виробництва ААІ, проаналізовані чинники, які знижують працездатність інструменту при шліфуванні та вказані переваги керамічних зв'язок, використання яких дозволить вести шліфування алмазними кругами в режимі самозаточування. Показано, що передчасна втрата різальної здатності алмазних кругів на серійних керамічних зв'язках обумовлена руйнуванням зерен через надмірну температуру спікання (понад 800 °С) алмазоносного шару.

2. Удосконалено методологію моделювання за МКЕ процесів спікання алмазоносного шару і шліфування, використання якої дозволило підвищити точність розрахунків при використанні розроблених моделей, що враховують пористість зв'язки і температурні залежності властивостей компонентів алмазоносного шару. Підтверджено ефективність застосування мікрорівневого моделювання на основі МКЕ для дослідження процесу руйнування АЗ на різних етапах життєвого циклу ААІ.

3. Розрахунковим шляхом виявлено, що руйнування АЗ при виготовленні алмазного круга відбувається через невідповідність міцності зерен і температури спікання алмазозносного шару. Визначено температурні залежності напружень в зернах, що містять включення металофази (залишки ростових систем, типових для виробництва синтетичних алмазів). Визначено, що умовою реалізації раціонального самозаточування при шліфуванні є збереження цілісності зерен та виникнення в них мікротріщин, розвиток яких попереджає масове утворення ділянок зносу за рахунок сколів та утворення нових різальних поверхонь. Встановлено переважний вплив температурного чинника на стан АЗ після спікання алмазозносного шару та визначено раціональні температури спікання алмазовмісного керамоматричного композиту для широкої номенклатури алмазних порошків (АС2–АС32 із зернистістю 50/40–200/160).

4. Показано ефективність використання для оцінювання стану АЗ критерію $V\sigma_p$, що характеризує відносний об'єм зерна, де напруження перевищують його міцність. З використанням запропонованого критерію доведено, що для забезпечення раціонального самозаточування при шліфуванні необхідно знизити температуру плавлення керамічної зв'язки та збільшити пористість алмазозносного шару, що створить умови для видалення відпрацьованих зерен з РП алмазного круга та дозволить виключити її «засалювання» часточками шламу. Показано, що для попередження передчасного руйнування АЗ при спіканні алмазозносного шару слід обмежуватись 50 %-ю концентрацією зерен. Визначено умови самозаточування при шліфуванні крихких важкооброблюваних матеріалів та рекомендовано параметри експлуатації ААІ з урахуванням їх особливостей (марки, зернистості і концентрації АЗ, ступеня їх закладення у зв'язку) та властивостей оброблюваного матеріалу.

5. Запропоновано спосіб реалізації самозаточування алмазних кругів, який полягає в науково обґрунтованому виборі складу і властивостей компонентів алмазозносного шару відповідно до температури спікання алмазозносного шару, що забезпечує появу в зернах напружень передруйнування (Патент 109912). Розрахунковим шляхом визначено раціональні поєднання основних властивостей керамічної зв'язки (температура плавлення $600\div 650$ °С, $\alpha = (3\div 6)\cdot 10^{-6}$, К⁻¹; $E = 0,9\div 1,2$ ГПа; теплопровідність не нижче 0,7 Вт/м·К). З використанням оригінальної методології, розроблено легкоплавку склокерамічну зв'язку на основі евтектичних композицій системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$, модифікованих оксидами Li_2O і TiO_2 (Патент 122478).

6. З використанням розроблених зв'язок виготовлено зразки алмазних кругів з підвищеною пористістю: із закритою ($\Pi=25-33$ %) при використанні газоутворюючої добавки (2,0–2,5 мас. % Li_2CO_3); із відкритою ($\Pi=45-50$ %) з використанням як наповнювача мікросфер техногенного походження. Показана перспективність використання золосфер як структуроутворюючого компонента, абразивні властивості якого підвищуються при спіканні алмазозносного шару внаслідок утворення фаз з високою твердістю (шпінель, герциніт, муліт), що дозволяє розглядати золосфери як додаткові різальні елементи.

7. Запропоновано алгоритм вибору раціональної структури керамоматричного алмазозносного шару кругів, а також надано рекомендації для

оптимізації процесу шліфування деталей з важкооброблюваних матеріалів, які доповнюють існуючі нормативи і дозволяють здійснювати ґрунтовний вибір параметрів алмазних кругів. Виконання наданих рекомендацій забезпечує реалізацію умов раціонального самозаточування ААІ при шліфуванні крихких важкооброблюваних матеріалів.

В умовах виробництва ТОВ «Інстайл» виготовлена дослідна партія алмазних кругів, які отримали схвальні відгуки від підприємств-споживачів інструмента та пройшли успішні випробування в технологічному процесі ТОВ «Компанія ЗБРОЯ» при шліфуванні деталей з твердих сплавів і заточуванні різців. За попередньою оцінкою при використанні розробок продуктивність шліфування збільшилась в 1,7-1,8 разів при забезпеченні необхідної якості алмазної обробки ($R_a = 0,20-0,25$ мкм) та зниженні її собівартості в 1,5 рази.

8. Результати досліджень дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М.Ф. Семка в рамках дисциплін «Теорія 3D моделювання», «Технологічні процеси інструментального виробництва», «Формування структури та властивостей сучасних інструментальних матеріалів» при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Федоренко Д.О. Пути повышения эффективности алмазно-абразивного инструмента / В.А. Федорович, Д.В. Ромашов, А.М. Малиняк, Д.О. Федоренко, Е.А. Бабенко // Високі технології в машинобудуванні: збірник наукових праць НТУ "ХПІ". – 2010. – № 4. – С.88–98.

Здобувачем розроблено 3D моделі для аналізу процесів виготовлення та експлуатації алмазно-абразивного інструмента.

2. Федоренко Д.О. Моделирование путей повышения эффективности алмазно-абразивного инструмента / В.А. Федорович, Д.В. Ромашов, А.М. Малиняк, Д.О. Федоренко, Е.А. Бабенко // Високі технології в машинобудуванні: збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – 2010. – № 1. – С.176–182.

Здобувачем запропоновано алгоритм комплексного моделювання процесів виготовлення та експлуатації ААІ.

3. Федоренко Д.О. Разработка методологии 3D моделирования процесса шлифования в режиме самозатачивания / Д.О. Федоренко, Д.В. Ромашов, В.А. Фадеев, В.А. Федорович // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – 2011. – №. 6. – С. 135–140.

Здобувачем створено методологію моделювання самозаточування алмазних зерен при шліфуванні матеріалів різних груп.

4. Федоренко Д.О. Повышение эффективности алмазно-абразивной обработки путем управления процессом самозатачивания кругов / В.А. Фадеев, Д.О. Федоренко, Д.В. Ромашов, В.А. Федорович // Різання та інструмент в технологічних системах. – 2012. – № 81. – С.289–295.

Здобувачем здійснені модельні експерименти та визначено вплив характеристик круга на здатність зерен до самозаточування при шліфуванні.

5. Федоренко Д.О. Динамическое 3D моделирование процесса шлифования в режиме самозатачивания / Д.О. Федоренко, Д.В. Криворучко, В.А. Федорович // Різання та інструмент в технологічних системах. – 2012. – № 82. – С.301–307.

Здобувачем здійснено динамічне моделювання процесу шліфування та визначено умови для реалізації його раціонального самозаточування.

6. Fedorenko D.O. Prevention of manufacturing defects of diamond composite materials by simulating the process at the micro level / A.I. Grabchenko, D.V. Romashov, D.O. Fedorenko, A.G. Mamalis, J. Kundrak // Nanotechnology perception. Basel: Institute of advanced study. – 2012. – № 8. – P.171–180. (Scopus)

Здобувачем здійснено мікрорівневе моделювання процесу спікання ААІ та визначено вплив характеристик зерен на рівень напружень.

7. Fedorenko D.O. Principles of 3D modeling of the production and application of diamond composite materials / A.G. Mamalis, A.I. Grabchenko, V.I. Fedorovich, D.V. Romashov, D.O. Fedorenko // Nanotechnology perception. Basel: Institute of advanced study. – 2012. – №8.– P.132–139. (Scopus)

Здобувачем запропонована концепція моделювання процесів консолідації алмазоносного шару при виготовленні ААІ та шліфування.

8. Федоренко Д.О. Моделирование процесса спекания алмазных кругов для работы в режиме самозатачивания / Д.О. Федоренко, Д.В. Ромашов, В.А. Федорович // Сучасні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць НТУ «ХП». – 2013. – №. 8. – С.162–175.

Здобувачем розрахунковим шляхом визначено вплив характеристик зв'язки на рівень напружень при спіканні алмазоносного шару.

9. Fedorenko D.O. Simulation of the effect of sintering on the integrity of diamond grains in grinding wheels / A.I. Grabchenko, D.V. Romashov, D.O. Fedorenko, V.A. Fedorovich, T. Baxevanis // Nanotechnology Perceptions. Basel: Institute of advanced study. – 2014. – №10(1). – P. 42-53. (Scopus)

Здобувачем шляхом моделювання визначено вплив складу та властивостей металофази на формування залишкових напружень при спіканні кругів.

10. Федоренко Д.О. Методология 3D моделирования процессов обработки трудно-обрабатываемых материалов / В.А. Федорович, В.А. Залогова, И.Н. Пыжов, Д.В. Криворучко, Д.О. Федоренко // Сучасні технології в машинобудуванні. – 2016. – №. 11. – С.208–232.

Здобувачем розроблено науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимальних складів алмазно-керамічних композицій для виготовлення ААІ.

11. Федоренко Д.О. керамические связки для алмазно-абразивного инструмента / Д.О. Федоренко, Е.Б. Дайнеко, Н.Ф. Лесных, Е.Ю. Федоренко Вісник НТУ «ХП»: Серія Хімія, хімічні технології та екологія. – 2016. – № 22 – (1194). – С. 194–198.

Здобувачем запропоновано склад склокерамічної зв'язки, проведено дослідження її властивостей та фазового складу.

12. Fedorenko D. Porous diamond grinding wheels on ceramic binders: design and manufacturing / J. Kundrák, D. Fedorenko, V. Fedorovich, O. Fedorenko, E. Ostroverkh // Manufacturing Technology. – 2019. – №19(3). – P. 446–454. (Scopus)

Здобувачем здійснено тривимірне моделювання процесів формування пористого алмазоносного шару та шліфування кругами на керамічних зв'язках.

13. Fedorenko D.O. Low-melting glass-ceramic bonds based on oxide compositions for diamond-abrasive tools / O.Yu. Fedorenko, K.B. Bohdanova, D.O. Fedorenko, N.F. Lesnych, N.M. Reheda // Issues of chemistry and chemical technology. – 2019. – No. 3. – P. 158–165. (Scopus)

Здобувачем запропоновано методологію розробки легкоплавкої склокерамічної зв'язки та досліджено АКК з її використанням.

14. Патент на корисну модель № 109912, Україна, МПК В24Д 3/14, В24Д 5/00, Спосіб виготовлення алмазного круга на керамічній зв'язці / Лісачук Г.В., Федоренко Д.О., Федорович В.О., Пижів І.М.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». – № u201603942; заявл. 11.04.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.

Здобувачем запропоновано склад зв'язки та визначені параметри шліфуванні при використанні ААІ на керамічній зв'язці.

15. Патент на корисну модель № 110709 Україна, МПК В24Д 3/34, В24Д 3/14, Легкоплавка керамічна зв'язка для алмазно-абразивного інструменту / Лісачук Г.В., Федоренко Д.О., Федорович В.О., Федоренко О.Ю.; заявник та патентовласник НТУ «ХПІ». – № u201602482; заявл. 14.03.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20.

Здобувачем визначено температури спікання алмазоносного шару та досліджено працездатність ААІ, виготовлено за запропонованим способом.

16. Fedorenko D. Improvement of diamond-abrasive tools based on 3D – simulation / A. Grabchenko, V. Fedorovich, Y. Babenko, D. Fedorenko, D. Romashov // XXIV MicroCAD 2010 International Scientific Conference: abstracts (Miskolc, Hungary, 18-20 March 2010): Section N: Production Engineering and Manufacturing Systems. – Miskolc: University of Miskolc. – 2010. – S. 63–68.

Здобувачем описана методика 3D моделювання поведінки алмазоносного шару шліфувальних кругів при спіканні на базі кінцево-елементного аналізу.

17. Федоренко Д.О. Моделювання процесу алмазного шліфування в режимі самозаточування / Д.О. Федоренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. поп. ХХ міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 15-17 травня 2012 р.). – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – Ч. I. – С.143.

Здобувачем здійснено модельні експерименти та визначено вплив характеристик круга на здатність до оновлення різальних поверхонь алмазів.

18. Федоренко Д.О. Оптимізація процесу шліфування в режимі самозаточування / Д.О. Федоренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. доп. ХХІ міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 29-31 травня 2013 р.). – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – Ч. I. – С. 166.

Здобувачем здійснено оптимізацію процесу шліфування за результатами багатофакторного планування експерименту.

19. Федоренко Д.О. Применение лазерного сканирования для исследования топографии рабочей поверхности алмазно-абразивного инструмента / Д.О. Федоренко // Инновации в материаловедении: материалы Всерос. молод. науч. конфер. с междунар. участием (Москва, 3-5 июня 2013г.). – Москва: ИМЕТ РАН. – 2013. – С. 344.

Здобувачем проаналізовано результати 3D топографії робочої поверхні кругів, отриманих за результатами оптимізації параметрів їх виготовлення.

20. Федоренко Д.О. Критерии выбора керамической связки для бездефектного спекания алмазных кругов / Д.О. Федоренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. доп. XXII міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 21-23 травня 2014 р.). – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – Ч. I. – С. 169.

Здобувачем запропоновано новий підхід до проектування керамічної зв'язки із заданими властивостями для алмазних кругів.

21. Федоренко Д.О. Теоретические и технологические принципы выбора состава керамической связки для алмазно-абразивного инструмента / Д.О. Федоренко, В.А. Федорович, М.И. Рыщенко // Композиційні матеріали: матеріали VIII Міжнар. наук.-техн. WEB конфер. (Київ, 11 березня - 11 квітня 2014 р.). – К.: НТУ «КПІ». – 2014. – С. 56–58.

Здобувачем сформульовані наукові принципи розробки складів легкоплавких керамічних зв'язок із заданими механічними і теплофізичними властивостями.

22. Федоренко Д. О. Методологические и технологические аспекты изготовления алмазных кругов / Д.О. Федоренко // Машинобудування очима молодих – прогресивні ідеї, наука, виробництво: тез. доп. XIV Всеукр. молодіж. конфер. (Суми, 27-31 жовтня 2014.). – Суми: СДУ. – 2014. – С. 100–101.

Здобувачем запропоновано алгоритм проектування алмазних кругів для шліфування крихких важкооброблюваних матеріалів.

23. Федоренко Д.О. Алмазно-абразивный инструмент на керамічних зв'язках: принципи проектування, отримання та властивості / Д.О. Федоренко, В.О. Федорович, О.Ю. Федоренко, К.Б. Дайнеко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тез. доп. XXIII міжнар. наук.-практ. конф. (Харків, 17-19 травня 2017 р.). – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – Ч. II. – С.286.

Здобувачем розроблено теоретичні і технологічні принципи проектування ААІ на легкоплавких склокерамічних зв'язках.

24. Федоренко Д.О. Технологічні параметри виготовлення крупнопористих алмазних кругів на керамічних зв'язках / Д.О. Федоренко, В.А. Федорович, Е.Ю. Федоренко // Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. АТН України (Івано-Франківськ, 5-7 квітня 2017 р.). – Івано-Франківськ: Симфонія форте. – 2017 р. – С.25.

Здобувачем визначено раціональний склад і технологічні умови отримання крупнопористих керамоматричних алмазних кругів.

25. Федоренко Д.О. Визначення раціонального складу керамоматричних алмазно-композиційних матеріалів на основі аналізу критеріїв руйнування зерен при виготовленні алмазно-абразивного інструменту / Д.О. Федоренко, В.О. Федорович, О.Ю. Федоренко, К.Б. Богданова // Композиційні матеріали: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. WEB конференції (Київ, квітень 2018 р.). – Київ: НТУУ «КПІ». – 2018. – С. 75.

Здобувачем запропоновано критерії для оцінки самозаточування алмазних кругів та визначено склад АКК, що відповідає поставленим вимогам.

АНОТАЦІЇ

Федоренко Д.О. Удосконалення процесу алмазного шліфування кругами на керамічній зв'язці за рахунок забезпечення їх самозаточування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти (13 – механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню проблеми підвищення ефективності шліфування за рахунок управління процесом самозаточування алмазних кругів на керамічних зв'язках шляхом визначення їх раціональних характеристик на етапах виготовлення та експлуатації інструменту.

Встановлено, що основною причиною зниження різальної здатності алмазних кругів на серійних керамічних зв'язках є невідповідність високої температури плавлення зв'язки (понад 800 °С) та міцності алмазних зерен, що призводить до їх термодеструкції. Розроблено методологію та алгоритм вибору раціональної структури алмазноносного шару ААІ на керамічних зв'язках. Визначено оптимальні характеристики алмазних кругів, здатних до раціонального самозаточування при шліфуванні важкооброблюваних матеріалів різних груп. На прикладі алмазних кругів на розробленій легкоплавкій склокерамічній зв'язці експериментально підтверджено ефективність запропонованого підходу.

Ключові слова: алмазний круг, стійкість інструменту, продуктивність шліфування, спікання алмазноносного шару, шліфування в режимі самозаточування, метод кінцевих елементів, тривимірне мікрорівневе моделювання, напружено-деформований стан, структурно-фазові складові, раціональні характеристики.

Федоренко Д.О. Усовершенствование процесса алмазного шлифования кругами на керамической связке за счет обеспечения их самозатачивания. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты (13 – механическая инженерия). – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2021.

Диссертация посвящена решению проблемы повышения эффективности шлифования за счет управления процессом самозатачивания алмазных кругов на керамических связках путем определения их рациональных характеристик на этапах изготовления и эксплуатации инструмента.

Установлено, что основной причиной снижения режущей способности алмазных кругов на серийных керамических связках является несоответствие высокой температуры плавления связки (800 °С и выше) и прочности алмазных зерен, что приводит к их термодеструкции. Разработана методология и алгоритм выбора рациональной структуры алмазноносного слоя ААИ на керамических связках, реализующие интегрированный подход к выбору инструмента для шлифования в режиме самозатачивания. Определены оптимальные

характеристики алмазных кругов, обеспечивающие рациональное самозатачивание при шлифовании труднообрабатываемых материалов разных групп. На примере алмазных кругов на разработанной легкоплавкой связке экспериментально подтверждена эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: алмазно-абразивный инструмент, устойчивость алмазного круга, производительность шлифования, спекание алмазосодержащего слоя, шлифовка в режиме самозатачивания, метод конечных элементов, трехмерное микроуровневое моделирование, напряженно-деформированное состояние, структурно-фазовые составляющие, рациональные характеристики.

Fedorenko D.O. Improvement of the process of diamond grinding with ceramic-bonded wheels by ensuring their self-sharpening. – Manuscript.

This is for a granting Candidate of Technical sciences Degree in specialty 05.03.01 – machining processes, machines and tools (13 – mechanical engineering). – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». – Kharkiv, 2021.

Thesis is dedicated to solving the problem of increasing the grinding efficiency of by controlling the process of self-sharpening of diamond wheels on ceramic bonds by determining their rational characteristics at the stage of their manufacture and operation.

It has been established that the main reason for the decrease in the cutting ability of diamond wheels on serial ceramic bonds is the discrepancy between the high melting temperature of the bond (more than 800 °C) and the strength of diamond grains, which leads to their thermal destruction. A new concept and methodology for the selection of a rational structure of the diamond-bearing layer of abrasive instrument on ceramic bonds, which implement an integrated approach to the selection of diamond wheels for grinding in the self-sharpening mode, have been developed. A method for the manufacture of ceramic-bonded diamond wheels is proposed, which ensures a constant renewal of the grains cutting surfaces during grinding due to the technological inheritance of residual stresses arising in the grains during sintering of the diamond-bearing layer. The optimal characteristics of diamond wheels have been determined, which provide rational self-sharpening when grinding materials of different groups. On the example of diamond wheels on the designed low-melting bond, the effectiveness of the proposed approach has been experimentally confirmed.

The optimal combinations of physical-mechanical and thermophysical properties of a ceramic bond were determined depending on the porosity of the diamond-bearing layer, the concentration and granularity of powders, which provide rational self-sharpening when grinding difficult-to-machine materials.

On the basis of the eutectic composition of the $\text{Na}_2\text{O} - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ system, modified with Li_2O and TiO_2 , a low-melting glass-ceramic bond with specified properties has been developed. It provides sintering of the circles diamond-bearing layer at a temperature of 600-620 °C and grinding in the self-sharpening mode.

Key words: diamond-abrasive tool, diamond wheel stability, grinding performance, diamond layer sintering, self-sharpening grinding, finite element method, three-dimensional microlevel modeling, stress-strain state, rational characteristics, structural-phase components.

