

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ПИЖОВ Іван Миколайович

УДК 621.91

**НАУКОВІ ОСНОВИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЛЕЗОВИХ ІНСТРУМЕНТІВ З
ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ**

**Спеціальність 05.03.01–Процеси механічної обробки,
верстати та інструменти**

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Харків – 2009р.

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Грабченко Анатолій Іванович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
завідувач кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Залога Вільям Олександрович,
Сумський державний університет
(м. Суми) Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри «Технологія машинобудування, верстати та інструменти»

доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Філатов Юрій Данилович,
Інститут надтвердих матеріалів ім В.М. Бакуля (м. Київ) Національної академії наук України, завідувач лабораторії технології обробки виробів з каменю

доктор технічних наук, професор
Калафатова Людмила Павлівна,
Донецький національний технічний університет
(м. Донецьк) Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри «Металорізальні верстати та інструменти»

Захист відбудеться «22» жовтня 2009 р. о «14⁰⁰» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автореферат розісланий «19» вересня 2009 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Україна є одним з виробників полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ), які в даний час широко застосовуються в різних галузях промисловості. Світова тенденція в галузі виробництва і використання ПНТМ спрямована насамперед на створення технічних можливостей високоякісного формоутворення прецизійних, у тому числі і складнопрофільних лезових інструментів на їх основі. Це дозволить широко використовувати їх для автоматизованих систем, які часто базуються на безпідналагоджувальній обробці, і забезпечити поступову заміну природних алмазів в інструментах. При цьому в сучасних умовах особливо гостро стоїть вимога економії ресурсів на всіх етапах життєвого циклу надтвердих інструментальних матеріалів. Ефективне розв'язання вказаних питань неможливе без комплексного підходу до проблеми, який полягає в системному використанні різних видів енергії (механічної, електричної, хімічної) при формоутворенні інструмента і розрішення на цій основі існуючої основної суперечності між продуктивністю і вартістю якісної обробки ПНТМ, яка завдяки їх унікальним фізико-механічним властивостям набуває найбільшої гостроти.

Особливо актуальним є вирішення науково-технічної проблеми високоякісного формоутворення прецизійних (у тому числі і складнопрофільних) лезових інструментів із ПНТМ, що складає напрямок досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася на базі наукової тематики кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка НТУ «ХПІ». Здобувач був виконавцем держбюджетних тем МОН України за фундаментальним та прикладним напрямком: «Розробка та дослідження прогресивних методів виготовлення сучасних конструкцій різальних інструментів та виробів із надтвердих матеріалів» (1994-1996р.); «Розробка концепції способів формування високоточних поверхонь виробів машинобудівного та медичного призначення із заданими функціональними властивостями на основі комплексного застосування нових видів покриттів та управління трансформацією стану ріжучих поверхонь алмазно-абразивних інструментів» (д/р № 01000100U001084, 1999-2001р.); «Розробка системи високої технології обробки композиційних матеріалів, що включає об'єктно-орієнтоване статистичне моделювання алмазно-абразивних інструментів, управління формуванням обробленої поверхні з урахуванням властивостей анізотропії, нанесення ефективних функціональних покриттів,

у тому числі біоінженерних, і створення експертної системи якості» (д/р № 0102U000997, 2002-2004р.); «Розробка теоретичних основ 3D методології комп'ютерного моделювання оптимальних характеристик абразивно-алмазних інструментів», (д/р № 0105U000577, 2005 – 2007р.); «Розробка теоретичних основ 3D моделювання фізичних явищ у ресурсозберігаючих процесах виготовлення і експлуатації алмазних інструментів» (д/р № 0108U001447, 2008 – 2010р.) та міжнародного проекту ЕС2201 «Прецизійне і ультрапрецизійне точіння та шліфування металів, конструкційної кераміки та полімерів» (проект MINOS № ERB 3512PL964070 за програмою ЄС INCO-COPERNICUS, 1997-2000р.).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності формоутворення прецизійних лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів за рахунок використання мікропорошків алмазу зі спеціальними рельєфними товстошаровими металевими покриттями в струмопровідних кругах на основі запровадження комбінованих процесів шліфування з регулюванням сталих вихідних показників обробки в умовах різного рівня невизначеності значень технологічних параметрів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

1. Провести дослідження існуючих методів алмазного формоутворення лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів і виконати імовірнісне прогнозування їх вихідних показників в плані можливості забезпечення необхідної якості різального леза в умовах різного рівня невизначеності значень технологічних параметрів, встановити основні причини виникнення дефектів обробки.

2. Шляхом застосування концепції 3D моделювання напружено деформованого стану інструментальної підсистеми «алмазне зерно – рельєфне товстошарове покриття – зв'язка круга» і різальної системи «зв'язка круга - рельєфне товстошарове покриття - алмазне зерно - оброблюваний матеріал» виконати теоретичне обґрунтування доцільності використання мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями в кругах на міцних струмопровідних зв'язках для формоутворення прецизійних лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів і провести експериментальні дослідження підтвердження подолання причин виникнення дефектів обробки.

3. Дослідити фізичні і технологічні закономірності та особливості процесів електроерозійної обробки, алмазного і комбінованого алмазного шліфування з додатковою інтенсивною рівномірно розподіленою або щадною локальною дією на струмопровідну зв'язку круга з мікропорошків алмазу, виявити їх потенціал і, виходячи з необхідності набуття високих значень розмірної точності і якості робочих елементів лезових інструментів із ПНТМ встановити послідовність реалізації їх достоїнств.

4. Сформулювати основні принципи забезпечення сталості вихідних показників процесу алмазного шліфування полікристалічних надтвердих матеріалів, застосувавши концепцію 3D моделювання алмазно – абразивних інструментів підтвердити їх і запропонувати напрями для їх реалізації.

5. Запропонувати високоефективні способи підтримки параметрів робочої поверхні круга на макро - і мікрорівнях стосовно системної сукупності різних схем шліфування і на їх основі реалізувати комбінований процес шліфування ПНТМ зі сталими значеннями вихідних показників обробки.

6. Розробити методи профілювання робочих поверхонь інструментів вищого (другого) порядку і на їх основі запропонувати високоефективні процеси формоутворення прецизійних (у тім числі складнопрофільних) лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів.

Об'єкт дослідження - процес алмазного шліфування надтвердих матеріалів.

Предмет дослідження - формоутворення лезових інструментів із надтвердих матеріалів.

Методи дослідження. Робота виконана на основі фундаментальних положень теорії різання матеріалів і запропонованих оригінальних методик дослідження процесів обробки ПНТМ. Використано сучасні фізичні методи дослідження матеріалів, а також положення теоретичної і прикладної статистики. Концепція 3D моделювання напружено - деформованого стану інструментальної підсистеми «алмазне зерно – рельєфне товстошарове покриття – зв'язка круга» використовувалася стосовно спікання алмазозносного шару круга, а різальної системи «зв'язка круга - рельєфне товстошарове покриття - алмазне зерно - оброблюваний матеріал» - відносно процесу шліфування ПНТМ. Для прогнозування вихідних показників процесів шліфування ПНТМ в умовах різного рівня невизначеності значень технологічних параметрів була використана концепція статистичного моделювання процесу формоутворення лезових інструментів із ПНТМ. Для вивчення можливостей регулювання параметрів ріжучого рельєфу круга використана концепція 3D моделювання абразивних інструментів. Для дослідження 3D топографії робочої поверхні круга використано метод лазерного сканування і методику 3D вивчення рельєфу робочої поверхні кругів на вимірювальному комплексі OMG 3 (Німеччина, Магдебурзький технічний університет) з використанням пакету «SurfControl 2.0», що включає програму «SurfControl Viewer» для аналізу отриманих результатів і додаткову програму «3D-Viewer», яка служить як «online» засіб для розгляду 3D даних робочої поверхні круга.

Для аналізу напружено - деформованого стану в системах використано пакет «COSMOS», як інструмент реалізації метода скінчених елементів. Експериментальні дослідження проведено на сертифікованому устаткуванні, яке в необхідних випадках піддавалося відповідній модернізації і додатково оснащувалося спеціально розробленими вимірювальними стендами з використанням сучасних контрольно-вимірювальних приладів.

Наукова новизна отриманих результатів: У дисертаційній роботі розроблено принципи і запропоновано методи вирішення проблеми формоутворення прецизійних лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів за рахунок використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями в комбінованих процесах шліфування зі сталими значеннями вихідних показників обробки.

1. На базі використання концепції 3D моделювання напружено деформованого стану інструментальної підсистеми «алмазне зерно – рельєфне товстошарове покриття – зв'язка круга» і різальної системи «зв'язка круга - рельєфне товстошарове покриття - алмазне зерно - оброблюваний матеріал» встановлено особливості взаємодії елементів цих систем, пов'язані з наявністю покриттів, що дозволило запропонувати новий підхід до забезпечення цілісності зерен на етапі спікання алмазоносного шару кругів і розв'язати протиріччя між необхідністю використання зерен мікропорошків алмазу і міцністю їх утримання в металевій зв'язці шляхом нанесення на них рельєфних металевих покриттів, товщина яких наближається до половини розміру початкового алмазного зерна.

2. Сформульовано і здійснено принцип вибіркової переважної цілеспрямованої послідовності реалізації потенціалу процесів електроерозійної обробки та алмазного шліфування з додатковою інтенсивною рівномірно розподіленою або щадною локальною дією на зв'язку круга з мікропорошків алмазу стосовно формоутворення прецизійних (у тому числі і складнопрофільних) лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів.

3. Висунуто і шляхом використання концепції 3D моделювання алмазно – абразивних інструментів підтверджено наукове положення про ключову роль мікропорошків алмазу в реалізації процесу пристосування з формуванням сталого ріжучого рельєфу алмазних кругів на струмопровідних зв'язках як основи досягнення високих показників розмірної точності і якості робочих елементів при формоутворенні лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів.

4. Встановлено можливість зміни ступеня зносостійкості (сталості) ріжучого рельєфу кругів на струмопровідних зв'язках за рахунок управління механізмом зносу алмазних зерен з металевими покриттями в межах від мікро- до макроруйнування шляхом реалізації випереджального електрохімічного видалення матеріалу одного з елементів системи «металева зв'язка круга - металеве покриття».

5. Запропоновано і реалізовано комплексний підхід до забезпечення сталості вихідних показників і перш за все розмірної точності і якості робочих елементів при формоутворенні лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів, що полягає в створенні умов для збереження незмінності початкової характеристики алмазоносного шару круга з мікропорошків алмазу на етапі його спікання і забезпечення стабільності протікання процесу електрофізикохімічної підтримки параметрів робочої поверхні круга на макро – і мікрорівнях при шліфуванні.

Практичне значення одержаних результатів. Виконані дослідження дозволили вирішити науково-технічну проблему формоутворення прецизійних (у тому числі і складнопрофільних) лезових інструментів із ПНТМ яка має важливе значення при вдосконаленні існуючого та розробки перспективних видів обладнання та інструменту у галузях машино – та приладобудування. Розроблено і впроваджено в промислових умовах, захищені 24 авторськими свідоцтвами способи

і пристрої для реалізації високоефективних комбінованих процесів алмазного шліфування.

Розроблений процес плоского торцевого шліфування лезових інструментів на основі ПНТМ зі сталими вихідними показниками стосовно верстатів з вертикальним шпинделем знайшов використання завдяки запропонованим багатомісним інтегрованим пристосуванням.

Виконано дослідження, направлені на подальше вдосконалення процесів формоутворення лезових інструментів із ПНТМ як за рахунок використання методів електроерозійної обробки непрофільованим і профільованим електродами-інструментами (у тому числі як альтернатива чорновому алмазному шліфуванню), так і шляхом вдосконалення методів профілювання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями.

Вирішено завдання економного використання ПНТМ і алмазів круга, а також істотного розширення номенклатури лезового інструменту. Запропоновано низку методик (способів), визнаних винаходами, що рекомендуються для досліджень процесів алмазного шліфування різних матеріалів: контролю різальної здатності шліфувального круга; визначення найбільшої висоти виступу зерен над рівнем зв'язки; методика досліджень при шліфуванні периферійними алмазними кругами за пружною схемою, експрес-методика визначення оптимальної швидкості різання при точінні та інше.

Результати роботи впроваджені на виробництві: Державне підприємство завод «Електроважмаш» (м. Харків), ВАТ «Полтавський алмазний інструмент» (м. Полтава), ЗАТ «Завод Композит» (м. С. Петербург), Дергачівський державний моторобудівний завод (м. Дергачі Харківської обл.) із загальним економічним ефектом понад 200 тис. гривень.

Результати дисертації використовуються в навчальному процесі кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка НТУ «ХПІ». Це наступні курси лекцій: «Робочі процеси сучасних технологічних систем», «Робочі процеси високих технологій» в розділі «Робочі процеси алмазного шліфування надтвердих матеріалів», «Об'єктно-орієнтоване моделювання робочих процесів», «Теорія технічних систем». Крім того результати докторської дисертаційної роботи використовуються при підготовці спеціалістів і магістрів інженерної механіки (спеціальність 8.090202 «Технологія машинобудування»).

Особистий внесок здобувача. Теоретичні і експериментальні дослідження виконані здобувачем самостійно. Постановка завдань і аналіз результатів досліджень проводилися спільно з науковим консультантом. Розробка конструкторської документації для модернізації різних видів шліфувальних (заточувальних) верстатів, проведення виробничих випробувань виконані спільно із співробітниками кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка НТУ «ХПІ».

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних науково - технічних конференціях і семінарах: «Високі технології в машинобудуванні» (Харків, 1992р., 1994р., 1996р., 1997р., Запоріжжя-Алушта, 2007р.); «Проблеми різання матеріалів в сучасних

технологічних процесах» (Харків, 1991р.); «Proceeding of the tenth international conference on tools» (ICT-2000, Мішкольц, Угорщина, 2000р.); «Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, навколишнє середовище» (Харків, 2001р.); «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти» (Житомир, 2007р.); «Прогресивна техніка та технологія-2008» (Київ:, 2008р.); «Важке машинобудування-проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2008р.); MicroCAD international scientific conference (Мішкольц, Угорщина, 2009р.). Повністю дисертаційна робота доповідалася на XVII міжнародному науково-технічному семінарі «Високі технології: тенденції розвитку» (Алушта, 2008р.); наукових семінарах кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка НТУ «ХП».

Публікації. За результатами роботи опубліковано 37 наукових праць, з них 25 – у наукових фахових виданнях ВАК України, 3 авторських свідоцтва на винаходи.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 6 розділів основної частини, висновків, додатків і списку використаних джерел. Повний обсяг дисертації складає 405 сторінок, з них 110 рисунків по тексту, 32 рисунка на 21 окремій сторінці, 10 таблиць по тексту, 3 таблиці на 2 окремих сторінках, 5 додатків на 88 сторінках, 303 використаних літературних джерела на 31 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено мету та задачі досліджень, наведено наукову новизну і практичну цінність розробок.

Розділ 1. Проведено аналіз стану питання, визначені сучасні тенденції розвитку в області розробки і використання ПНТМ і методів формоутворення лезових інструментів на їх основі. Особлива увага приділена можливості виготовлення складнопрофільних інструментів із ПНТМ, якості обробки, забезпеченню сталості процесів алмазного шліфування і можливості використання методів електроерозійної обробки. На основі аналізу фундаментальних і прикладних досліджень в області підвищення ефективності процесів обробки з використанням інструментів із надтвердих матеріалів, викладених в роботах провідних вчених Беззубенка М.К., Братана С.М., Весткемпера Е., Внукова Ю.М., Гавліка Й., Гавриша А.П., Грабченка А.І., Гриценка Е.І., Гусева В.В., Доброскока В.Л., Залози В.О., Захаренка І.П., Кавальця М., Калафатової Л.П., Кліменка С.А., Костюка Г.І., Кундрака Я., Лавриненка В.І., Лієрата Ф., Лоладзе Т.М., Матюхи П.Г., Маслова Є.Н., Мельничука П.П., Мішнаєвського Л.Л., Муковоза Ю.О., Новікова М.В., Резнікова А.Н., Розенберга О.О., Семка М.Ф., Сизого Ю.А., Узуняна М.Д., Федоровича В.О., Філатова Ю.Д., Філімонова Л.М., Шепелева А.О., Якімова О.В., Якубова Ф.Я., Ящерицина П.І. та інших, в дисертації сформульовані питання, що залишилися невирішеними та наведене резюме стосовно необхідності проведення досліджень по даній науковій проблемі.

Світова тенденція в області виготовлення лезових інструментів із ПНТМ свідчить про те, що алмазне шліфування залишається одним з найбільш перспективних способів. Проте його потенційні можливості до теперішнього часу ще не повністю розкриті. Особливо це стосується проблеми високоякісного

формоутворення лезових інструментів із ПНТМ (включаючи і ті з них, які вже пройшли лазерну або електроерозійну обробку).

Найбільшу увагу проблемі формоутворення лезових ПНТМ алмазним шліфуванням приділяють дослідники країн СНД. Це насамперед ІНМ ім. В.М. Бакуля НАНУ (м. Київ), НТУ «ХПІ» (м. Харків), «ВНДІАЛМАЗ», «ВНДІНСТРУМЕНТ», ВНДІ твердих сплавів (Москва), ВНДІ порошкової металургії (м. Мінськ) та ін. Аналіз робіт зарубіжних науковців показав, що вони не мають системного характеру і багато в чому підтверджують результати робіт вітчизняних учених. Наголошується на наявності істотної проблеми в цій області і особливо підкреслюється факт відсутності сталості процесу шліфування, яка пов'язана з періодичністю самозаточування алмазних кругів. Таке нестале протікання процесу є чинником, що істотно утруднює набуття необхідних значень розмірної точності і якості робочих елементів при формоутворенні лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів. Ці результати відносяться в основному до використання кругів на органічних і керамічних зв'язках, що самозаточуються.

Останнього часу з'явилися дані, що підтверджують перспективність комбінованих процесів шліфування. Так, фірма Agathon AG (Solothurn, Швейцарія), яка є провідним розробником технологій і світовим виробником устаткування для заточування ріжучих інструментів, запропонувала споживачам верстат Agathon 350 Combi EcoDress, що реалізовує комбінований процес шліфування лезових інструментів із ПНТМ на основі кубічного нітриду бору алмазними кругами на металевих зв'язках.

У цілому ж відзначено відсутність системного підходу до проблеми високоякісного формоутворення прецизійних (у тому числі і складнопрофільних) лезових інструментів із ПНТМ. Ефективне вирішення цієї проблеми практично неможливе без комплексного підходу до розв'язання існуючого протиріччя між продуктивністю і якістю обробки. Комплексність може полягати у вибіркового цілеспрямованому використанні різних методів формоутворення (алмазних і безалмазних), а також без забезпечення умов технологічної сталості процесів алмазного шліфування ПНТМ.

Розділ 2. Присвячено розробці методичного забезпечення досліджень. Запропоновано і реалізовано комплексний підхід до методології виконання досліджень в галузі алмазно-абразивної обробки. Він поєднує в собі 3D методи дослідження напружено деформованого стану зон спікання алмазоносного шару кругів і шліфування, концепцію 3D моделювання алмазно-абразивних інструментів, концепцію статистичного моделювання процесу формоутворення лезових інструментів із ПНТМ для прогнозування його вихідних показників в умовах різного рівня невизначеності значень технологічних параметрів.

Виконання експериментальних досліджень проводилося на заточувальних, плоско-, круглешліфувальних і дротяно-вирізних електроерозійних верстатах, які піддавалися відповідній модернізації і додатково оснащувалися спеціальними пристроями і експериментальними стендами з використанням сучасних контрольно-вимірювальних приладів. Для дослідження стану ріжучого рельєфу алмазних кругів використовувалося лазерне сканування з комп'ютерною обробкою характеристик

топографії робочої поверхні круга і поверхні оброблюваного ПНТМ, що дозволило дослідити зміни 3D параметрів субмікрорельєфу окремих алмазних зерен круга, визначати фактичну площу контакту, оцінити відносну опорну поверхню, а також 3D комп'ютерна методика вивчення рельєфу робочої поверхні кругів, що заснована на принципі конфокальної мікроскопії.

При 3D моделюванні напружено деформованого стану (НДС) інструментальної підсистеми «алмазне зерно – рельєфне товстошарове покриття – зв'язка круга» і різальної системи «зв'язка круга - рельєфне товстошарове покриття - алмазне зерно - оброблюваний матеріал» використовувалися сучасні пакети прикладних програм типу «Cosmos», що дозволило в умовах, максимально наближених до реальних, оцінити взаємовплив фізико-механічних властивостей алмазних зерен, металевих товстошарових покриттів, ПНТМ і зв'язки на рівні головної і приведеної напружень (силових, температурних і термосилових), енергії і щільності енергії деформації. Метод дозволяє оцінити характеристики всіх елементів систем одночасно, що важливо при визначенні областей оптимальних сполучень їх фізико-механічних властивостей і механізмів взаємодії.

Разом з відомими методиками дослідження вихідних показників процесів обробки ПНТМ в роботі використано спеціально розроблені методики (способи) дослідження, які забезпечують всебічність підходу до вивчення процесів обробки: спосіб реалізації пружної схеми обробки при круглому зовнішньому або внутрішньому шліфуванні, що базується на додатку до заготівки постійної тангенціальної сили (А. с. № 1324826); спосіб контролю ріжучої здатності шліфувального круга, що використовує віддзеркалені від робочої поверхні круга (РПК) світлові потоки; спосіб визначення найбільшої висоти виступу зерен над рівнем зв'язки, який засновано на використанні явища пристосованості при шліфуванні (А. с. № 1404892); експрес - спосіб визначення оптимальної швидкості різання при точінні (А. с. № 1585080); комплексна методика дослідження електроерозійної обробки ПНТМ та інші.

Експериментальні дослідження супроводжувалися використанням в необхідному об'ємі методів математичної статистики. Зокрема проводилася перевірка результатів дослідів на предмет виявлення грубих похибок вимірювань або обробки; обчислювалися середні значення дослідних даних з одночасним визначенням їх довірчих інтервалів; виконувався аналіз істотності відмінності середніх значень.

Експериментальні значення, отримані при однофакторних експериментах, описувалися математичними моделями. Визначення коефіцієнтів регресії проводилося методом найменших квадратів з функціональним перетворенням параметрів. Оцінювалася значущість коефіцієнта кореляції або визначалася відносна помилка апроксимації. На завершальному етапі дослідження для визначення оптимальних режимів обробки використовувався метод математичного планування експериментів. Частина досліджень, які вимагали використання великих обсягів обробки, була проведена у виробничих умовах на низці профільних підприємств.

Розділ 3. Присвячено комплексним дослідженням традиційних процесів шліфування та їх аналізу з позиції їх відповідності щодо необхідної якості обробки.

Як основні критерії якості обробки розглянуто тріщини на робочих поверхнях ПНТМ і сколи (щербини) на їх ріжучих кромках.

Тріщини на робочих поверхнях ПНТМ і сколи на ріжучих кромках зумовлюють високий відсоток браку або істотно збільшують трудомісткість процесу і значну витрату алмазних кругів на етапі чистового формоутворення лезових інструментів із ПНТМ.

Допустима величина $v_{\text{доп.}}$ сколів на різальних кромках перед чистовою стадією обробки шліфуванням має бути такою, щоб при доведенні задньої поверхні «по стрічці» величина f' останньої відповідала б значенню критерію зносу по цій поверхні $h_3 \leq 0,5 \text{ мм}$. Розрахунки дозволили встановити, що $v_{\text{доп.}} \leq 20 \text{ мкм}$.

Величина стрічки пов'язана з розміром сколу на ріжучій кромці залежністю:

(1)

де $\alpha_{\text{чорн.}}$, $\alpha_{\text{чист.}}$ задні кути на чорновій і чистовій стадіях шліфування відповідно $\Delta\alpha = (\alpha_{\text{чорн.}} - \alpha_{\text{чист.}}) = 1^\circ - 2^\circ$. Найбільш реальний діапазон величин сколів кромки складає $v = 20 - 100 \text{ мкм}$. Як видно з рис. 1, при обробці монолітних ПНТМ (товщиною до шести мм) у діапазоні задніх кутів $8^\circ - 45^\circ$ відношення розмірів стрічки до величин сколів кромки $M = f'/v$ лежить у межах $M = 20 - 56$, тобто може зростати в багато разів. Це означає, що відповідним чином збільшується і площа контакту ПНТМ з кругом.

Дослідження процесів алмазного шліфування ПНТМ кругами на органічних у режимі самозаточування і металевих зв'язках з управлінням їх ріжучим рельєфом в широкому діапазоні умов обробки показали, що вони не в змозі ефективно забезпечувати якість обробки.

Рис. 1. Залежності $M = f(\alpha, \Delta\alpha)$:
1 - $\Delta\alpha = 1^\circ$; 2 - $\Delta\alpha = 1,5^\circ$; 3 - $\Delta\alpha = 2^\circ$.

Це насамперед зумовлено високими значеннями сил і температури в зоні різання, а також відсутністю сталості вихідних показників шліфування. На базі використання концепції статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій, розробленої на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування ім.

М.Ф. Семка НТУ «ХПІ» і адаптованою стосовно процесу формоутворення лезових інструментів із ПНТМ, було проведено імовірнісне прогнозування вихідних показників в умовах різного рівня невизначеності значень технологічних параметрів. Як модель використано узагальнену статичну залежність, що зв'язує вихідний показник Y з системою технологічних параметрів (характеристика шліфувального круга і режими обробки):

де $Y_{\text{баз}}$ - базове значення вихідного показника; $X_1, \dots, X_i \dots X_N$, $X_{1(\text{баз})}, \dots, X_{i(\text{баз})} \dots X_{N(\text{баз})}$ - відповідно поточні і базові значення технологічних параметрів процесу; $n_1, \dots, n_i \dots n_N$, $K_1, \dots, K_i \dots K_N$ - відповідно ступінь і коефіцієнти впливу параметрів на вихідний показник.

Дослідження проводилося в два етапи з виконанням натурних і модельних експериментів: визначення базового значення $Y_{\text{баз}}$ і ступенів впливу n_i окремих параметрів на вихідний показник Y з використанням багатофакторного планування експериментів та імовірнісний аналіз розподілу значень вихідного показника Y_i коефіцієнтів впливу K_i в умовах невизначеності значень технологічних параметрів $X_{i(\min)} < X_i < X_{i(\max)}$. Досліджено вплив технологічних параметрів на величину сколів ріжучої кромки при чорновій обробці з використанням кругів на основі шліфпорошків алмазу:

де $Z_{\text{ср}}$ - середнє значення (математичне очікування) розмірів зерен; K - концентрація алмазів в крузі; β - кут загострення леза оброблюваного інструменту; $V_{\text{кр}}$ - швидкість шліфувального круга; $S_{\text{пр}}$ - подовжня подача; $P_{\text{н}}$ - нормальний номінальний тиск в контакті круга із заготівкою («пружна» схема обробки), δ - биття круга; I - сила струму в коло управління ріжучим рельєфом круга. Імовірнісний аналіз щільності розподілу значень сколів показав, що навіть за самих щадних умов чорнової обробки синтетичного алмазу СКМ-Р кругами на основі шліфпорошків алмазу вірогідність появи сколів менш допустимої величини (~ 20 мкм) мала і знаходиться в межах п'яти відсотків (рис. 2).

Рис. 2. Екранна форма результатів статистичних розрахунків

Виходячи з аналізу встановленого раніше явища періодичності процесу шліфування, виявлено і реалізовано деякі резерви цього процесу. Зокрема, запропоновані способи визначення оптимальної характеристики алмазного круга, визнані винаходами, що дозволило дещо поліпшити значення вихідних показників обробки за рахунок повнішого використання ріжучого ресурсу алмазних зерен і створення умов, які сприяють забезпеченню сталості процесу чорнового шліфування ПНТМ.

Розділ 4. На основі методології 3D моделювання виконано теоретичне обґрунтування можливості вирішення проблеми формоутворення лезових інструментів із ПНТМ шляхом використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями в комбінованих процесах шліфування із сталими значеннями вихідних показників обробки.

ПНТМ чутливі до силової і теплової напруженості процесу шліфування, що часто перешкоджає отриманню високої якості їх робочих елементів і особливо ріжучих кромки. На практиці це виявляється у вигляді тріщин на робочих поверхнях і сколів на різальних кромках лезових інструментів. З використанням методу скінчених елементів підтверджено, що особливо схильними до тріщиноутворення є двошарові пластини з робочим шаром із ПНТМ, які мають два різномірних шари фізико-механічні властивості яких можуть бути різко відмінними. Для аналізу НДС в таких пластинах розподіл пружних властивостей по їх товщині (у даному випадку модуля пружності E) подано різними моделями. У першому випадку перехідна зона між шарами практично була відсутня. У другій моделі модуль пружності $E=0,5(E_1+E_2)$, де E_1 , E_2 модулі пружності відповідно підкладки і шару ПНТМ. У третій моделі E змінюється за лінійною залежністю, тобто $E=A+B \cdot y$, де A , B - коефіцієнти, визначувані за залежностями: $A=(E_1 Z_2 - Z_2 Z_1)/(Z_2-Z_1)$; $B=(E_1-E_2)/((Z_1-Z_2))$. У четвертій моделі модуль E змінювався за залежністю: $E=A+B \cdot Z+C \cdot Z^2+D \cdot Z^3$, де A , B , C , D - коефіцієнти, визначувані за виразами: $A=E_1+(Z_1-3 Z_2) (E_2-E_1)Z_1^2/(Z_1-Z_2)^3$; $C=-3(E_2-E_1)(Z_2+Z_1)/(Z_1-Z_2)^3$; $D=2(E_2-E_1)/(Z_1-Z_2)^3$.

Аналіз НДС пластин показав: модулі пружності матеріалів робочого шару і підкладки не повинні відрізнятися більш ніж в 2 рази, а в процесі шліфування необхідно прагнути до суттєвого зниження насамперед нормальної сили різання, що сприятиме зниженню кількості бракованих пластин через розшаровування і розтріскування.

Використання 3D моделі НДС ріжучої кромки лезового інструменту із ПНТМ, що має у своєму складі металеві включення, підтвердило суттєву роль температурного фактору (рис. 3), значення якого у даному випадку посилюється з ростом коефіцієнта лінійного розширення та розмірів металевих включень. При наявності блоків зерен, охоплених металевою зв'язкою, це може призвести до виникнення великих сколів на ріжучих кромках.

а) – $T=500^{\circ}\text{C}$ б) - $T=900^{\circ}\text{C}$

Рис. 3. Візуалізація впливу температури на напружено - деформований стан ріжучої кромки в місцях наявності металевих включень

Для суттєвого підвищення якісних показників обробки необхідно в першу чергу забезпечити умови для реалізації технологічної сталості процесів шліфування. Однією зі складових технологічної сталості вважається стабільність роботи інструменту (кругу). Для вирішення цієї проблеми сформульовані основні принципи : забезпечення високої зносостійкості ріжучого рельєфу круга; створення умов для отримання стабільності характеристики алмазозносного шару круга; наявність необхідних високо ефективних способів управління ріжучим рельєфом круга та пристроїв для їх практичної реалізації; забезпечення стабільності процесів у зоні управління ріжучим рельєфом круга; наявність автоматизованої слідкуючої системи, яка підтримувала б потрібний стан ріжучого рельєфу круга.

Експериментальні дані свідчать про істотний позитивний вплив фактору зменшення зернистості алмазного круга на якість різальних кромок лезового інструмента із ПНТМ. 3D аналіз різальної системи «зв'язка круга - алмазне зерно - оброблюваний матеріал» дозволив установити, що зменшення розмірів алмазних зерен круга призводить до зниження НДС в них (завдяки меншій кількості металофази), а також і в зоні контакту із ПНТМ (рис. 4), тобто процес обробки стає більш «щадним».

а) – $Z=100/80$ б) – $Z=60/40$

Рис. 4. Візуалізація впливу зернистості круга на НДС в алмазному зерні

У зв'язку з цим якнайкращі результати з погляду утворення сколів на різальних кромках слід чекати у разі використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу. Все це дозволило висунути ідею про те, що для підвищення ефективності формоутворення лезових інструментів із ПНТМ необхідно відразу після розкрою пластин, наприклад, електроерозією виконувати чистову стадію шліфування струмопровідними кругами на основі мікропорошків алмазу в комбінованих процесах шліфування. Усунення процесу чорнового шліфування ПНТМ кругами на основі шліфпорошків алмазу дозволить суттєво знизити собівартість процесу за рахунок виключення остаточного браку від сколів різальних кромок і (або) витрат на їх усунення.

Негативним фактором при використанні дрібних зерен слід визнати підвищення НДС на межі алмазне зерно – зв'язка круга (рис. 4), що і є однією з причин зменшення їх різального ресурсу.

Дослідження і аналіз їх результатів, розгляд перспективи застосування струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу показали, що їх ріжучий рельєф має більші можливості для забезпечення технологічної сталості, ніж при використанні шліфзерен. Це пояснюється насамперед малими розмірами зерен, що призводить до наступного:

1. Ріжучий рельєф дрібнозернистого круга має малий період прироблення, а, значить, він буде менш чутливим до будь яких факторів, що дестабілізують процес обробки.

2. Через малу абсолютну величину різновисотності зерен прояв періодичності (циклічності) зміни параметрів ріжучого рельєфу круга на протязі його експлуатації, а отже, і значень вихідних показників обробки буде менш виражений (коротший у часі і менший за розмахом) або практично відсутній.

3. Закон розподілу мікропорошків на РПК буде прагнути до рівномірного, що приведе до суттєвого збільшення кількості працівних зерен, а, значить, і до більшої зносостійкості ріжучого рельєфу.

4. Малі значення висоти ріжучого рельєфу круга дозволяють більш ефективно управляти щільністю розподілу і статистичними характеристиками глибини залягання вершин зерен від рівня найвищого;

5. Мікропорошки алмазу містять в собі значно меншу кількість металофази ніж шліфзерна, що позитивно позначається на збереженні їх цілісності у високотемпературному процесі спікання, а значить, і на стабільності характеристики алмазоносного шару як однієї з важливіших складових забезпечення сталості процесу шліфування.

6. Велика кількість зерен мікропорошків алмазу на РПК створює сприятливі умови для високоякісного формоутворення ріжучих кромок інструментів із ПНТМ навіть з використанням кругів зі зниженими значеннями концентрації, що у свою чергу допускає можливість наносити на зерна покриття, яке захищає їх від руйнування на етапі спікання алмазоносного шару, запобігає можливості агрегування зерен у зв'язці при виготовленні круга та підвищує ріжучий ресурс зерен мікропорошків у процесі шліфування.

7. Малі значення висоти зерен мікропорошків над рівнем зв'язки круга забезпечують набагато кращі умови для реалізації комбінованих процесів шліфування завдяки можливості досягнення малих значень міжелектродного зазору між зв'язкою і правлячим електродом, без чого реалізація технологічної стійкості була б скрутною. У свою чергу можливість дозованого електрофізикохімічного видалення не тільки зв'язки круга, але й самого покриття створює передумови для цілеспрямованого управління механізмом зносу зерен у межах від мікро - до макроруйнування зерен, а, отже, і вихідними показниками процесу обробки.

8. Такі факти як наявність хімічного зв'язку зерна з металевим покриттям, а також те, що мікропорошки алмазу мають більш велику питому поверхню (в порівнянні зі шліфзернами), сприяють посиленню механічного зв'язку покриття з зернами. За умови малих значень глибини залягання зерен у зв'язці круга це в цілому повинно суттєво підвищити їх ріжучий ресурс при шліфуванні, а значить збільшити зносостійкість ріжучого рельєфу.

Експериментальні дослідження підтвердили, що при використанні кругів на основі мікропорошків алмазу період прироблення ріжучого рельєфу практично відсутній (рис. 5 а). Це дозволяє зробити припущення, що в порівнянні з кругами на основі шліфпорошків процес шліфування може бути стабільнішим з точки зору періодичності вихідних показників обробки. Як свідчать експериментальні дані (рис. 5 б), процеси зносу круга на основі мікропорошків алмазу, а отже, і зняття припуску із ПНТМ протікають плавно (без чітко вираженої циклічності).

а) без управління РПК ($I=0A$)

б) з управлінням РПК ($I=40A$)

Рис. 5. Порівняльні залежності при використанні кругів з алмазних шліф - і мікропорошків при обробці композиції «АСПК – сталь»:

1 - АС6 Z=160/125 (літературні дані); 2 - АСН Z=40/28; 3 - АСН Z=20/14

Аналіз, проведений на базі використання об'єктно-статистичної методології 3D моделювання алмазно-абразивних інструментів (рис. 6), показав можливість суттєвого розширення регулювання щільності розподілу вершин зерен по глибині за рахунок формування нерівностей поверхні зв'язки. Із зменшенням розмірів зерен круга закон розподілу їх вершин прагне до рівномірного. Це важливо в плані

збільшення числа одночасно працюючих зерен, бо сприяє створенню умов для технологічної сталості, що у свою чергу приведе до покращання якості й точності обробки, підвищення продуктивності при одночасному зниженні питомої витрати алмазів. Однією з передумов реалізації технологічної сталості при формоутворенні лезових інструментів із ПНТМ є забезпечення незмінності характеристики алмазоносного шару круга при його виготовленні (спіканні).

Як було встановлено дослідженнями М.В. Новікова в умовах високої силової і теплової напруженості в зоні спікання алмазні зерна можуть руйнуватися, змінюючи початкову зернистість. Причиною цього є різниця в значеннях коефіцієнтів лінійного розширення металофази і алмазного зерна. Тому при нагріванні відбувається наче розрив зерна зсередини, оскільки розтягуючі напруги в ньому можуть досягти межі міцності алмазу. У зв'язку з цим була висунута гіпотеза про те, що вирішити цю проблему можна шляхом використання на зернах металевих покриттів. Виконаний комплекс робіт по 3D моделюванню НДС інструментальної підсистеми «алмазне зерно – покриття – зв'язка круга» показав, що наявність металевих покриттів на алмазних зернах сприяє збереженню зерен навіть у високотемпературних умовах спікання алмазоносного шару круга на металевій зв'язці (рис. 7).

Рис. 6. Візуалізація впливу зернистості наважки мікропорошків на щільність розподілу глибини залягання їх вершин від рівня найбільш виступаючих $u_{\text{ВВ}}$ при висоті хвилястості зв'язки $H_{\text{волн.}} = 30 \text{ мкм}$ ($\varepsilon_{\text{кр.}} = 0.6$; $\alpha_0 = 60 \text{ мкм}$)

а) – $T = 700^\circ\text{C}$

б) – $T = 1000^\circ\text{C}$

Рис. 7 Візуалізація результатів розрахунку величин приведених напружень

Цей ефект посилюється із збільшенням товщини, модуля пружності, а також числа шарів покриття. Покриття на зерні запобігає утворенню на ньому макро- і мікротріщин, а також сприяє «заліковуванню» вже наявних.

Для умов використання мікропорошків алмазу особливий інтерес викликають рельєфні покриття, товщина яких може досягати половини розміру зерна, що покривається.

Модель такого алмазного зерна з достатнім ступенем точності можна уявити, наприклад, у вигляді кулі з гармонійною поверхнею (рис. 8 а), рівняння якої у сферичних координатах має вигляд:

де ρ – довжина радіус-вектору, а φ і θ – зенітний і азимутний кути відповідно; k_t – відносний коефіцієнт середньої товщини покриття (відношення середньої товщини покриття до середнього розміру початкового алмазного зерна $Z_{\text{поч. сер.}}$); k_A – відносний коефіцієнт амплітуди зміни товщини покриття; n – кількість виступів в осьовому перетині.

Встановлено, що значення k_t , k_A , n повинні відповідно дорівнювати: $k_t = 0,4 - 0,6$; $k_A = 0,2 - 0,4$; $n = 10 - 15$.

а)

б)

Рис. 8 Модель зерна (а) та до обґрунтування ролі покриття на ньому (б)

Поверхня закладення зерна у зв'язці (з урахуванням рельєфності покриття) значно зростає, що дозволяє більш рівномірно розподілити навантаження на зерно і суттєво знизити величину критичного закладення зерна у зв'язці ($\epsilon_{\text{покр.}} < \epsilon_{\text{кр.1}}$). При цьому $\epsilon_{\text{кр.2}} < \epsilon_{\text{кр.1}}$ за рахунок хімічного зв'язку зерна з покриттям (рис. 8б).

Роль характеристики алмазного круга (концентрація, зернистість і матеріал зв'язки) при обробці ПНТМ, коли практично відсутнє заглиблення алмазних зерен в оброблювальний матеріал, дуже велика. Особливо це виявляється тоді, коли вплив факторів має складний характер. З технологічної точки зору повинно існувати оптимальне поєднання параметрів характеристики алмазоносного шару круга, що забезпечує потрібну якість ріжучих кромek інструменту. Оскільки покрите зерно більше за початкове ($Z_{\text{покр.}} = Z_{\text{поч.}} + 2t$, де t – товщина покриття), то вже з урахуванням можливості розміщення зерен з покриттям в алмазоносному шарі їх початкова наважка (до нанесення покриття) має бути відповідним чином зменшена. Це призводить до зниження концентрації круга (рис. 9) з покритими зернами за залежністю:

де $K_{\text{поч.}}$ – концентрація зерен без покриття, %; $K_{\text{покр.}}$ – концентрація зерен з покриттям, %;

$Z_{\text{поч. min}}$, $Z_{\text{поч. max}}$ – відповідно мінімальний та максимальний розміри зерна, мкм; t – товщина покриття, мкм.

Рис. 9. Залежності $K=f(t, Z_{\text{гн}})$:1 – $Z=14/10$; 2 – $Z=20/14$; 3 – $Z=28/20$; 4 – $Z=40/28$; 5 – $Z=60/40$;

Через складність явищ, що відбуваються в зоні шліфування, найкоректніше оптимальна характеристика круга може бути визначена експериментальним шляхом з урахуванням технічного обмеження (3) по можливості розміщення покритих зерен в алмазоносному шарі.

Розрахунки показують, що вимушене зменшення концентрації круга з покритими зернами компенсується великим числом зерен мікропорошків на РПК. Так, наприклад, при концентрації $K_{\text{покр.}}=25\%$ число зерен на одиниці площі РПК при зернистості $Z=20/14$ буде значно вищим, ніж у круга 100% концентрації на основі шліфпорошків без покриття найдрібнішої зернистості (50/40).

З метою виявлення фізичних особливостей в зоні контакту покритого зерна з оброблюваним ПНТМ і виявлення на цій основі можливих резервів процесу шліфування були виконані 3D дослідження НДС різальної системи «зв'язка круга - рельєфне товстошарове покриття - алмазне зерно - оброблюваний матеріал» (рис. 10).

а) – зерно без покриття

б) – зерно з покриттям (Ni)

Рис. 10. Візуалізація впливу покриття на 3D НДС в алмазних зернах

Встановлено, що наявність рельєфного металевих товстошарового покриття на алмазному зерні вносить істотні корективи до напружено-деформованого стану вищезазначеної системи, що виявляється в значному зменшенні величини напруги на межі «алмазне зерно - зв'язка» та їх збільшенні на межі «алмазне зерно - ПНТМ». У комплексі це сприяє продовженню життєвого циклу зерен, інтенсифікує процес знімання припуску з оброблюваного матеріалу і дозволяє зробити висновок про можливість і доцільність використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими покриттями для чистового формоутворення лезових інструментів із ПНТМ.

Відомо, що для металевих зв'язок металеві покриття на алмазних зернах використовувати не рекомендується через зростання жорсткості алмазоносного

шару. Дослідження дозволили встановити, що це стосується обробки матеріалів, твердість яких, як правило, значно нижча, ніж у алмазних зерен.

Однією з особливостей процесу шліфування ПНТМ є відсутність заглиблення зерен в оброблюваний матеріал, а контакт металевого покриття з оброблюваним ПНТМ виключається, оскільки воно також як і струмопровідна зв'язка круга може з дозованою інтенсивністю піддаватися видаленню електрофізикохімічним способом. Керуючи процесом руйнування зерен мікропорошку шляхом зміни співвідношення швидкостей видалення зв'язки круга і покриття, можна ефективно впливати на значення вихідних показників обробки. На практиці це досягається, наприклад, шляхом певного поєднання властивостей пари «металеве покриття – зв'язка круга». Залежно від значення електрохімічних еквівалентів і коефіцієнтів виходу по струму цієї пари (що визначає рівень швидкостей розчинення зв'язки $V_{зв.}$ круга і покриття $V_{покр.}$) можливі три характерні схеми взаємного розташування елементів системи «алмазне зерно – покриття – зв'язка круга» (рис. 11). Найімовірніше перша і остання схеми сприятимуть прояву механізмів мікро - і макроруйнування зерен відповідно.

Розділ 5. Створено і викладено методологію вирішення проблеми формоутворення лезових інструментів із ПНТМ, яка базується на використанні принципу вибіркової переважної цілеспрямованої послідовності реалізації потенціалу різних процесів обробки.

$$\text{а) - } V_{\text{покр.}} < V_{\text{зв.}} \qquad \text{б) - } V_{\text{покр.}} = V_{\text{зв.}} \qquad \text{в) - } V_{\text{покр.}} > V_{\text{зв.}}$$

Рис. 11. Характерні схеми взаємного розташування елементів системи «алмазне зерно – металеве покриття – зв'язка круга»:
1 – алмазне зерно; 2 – металеве покриття; 3 – зв'язка круга.

Встановлено, що найкоротшим шляхом досягнення високої розмірної точності і якості робочих елементів лезових інструментів є послідовне використання електроерозійної обробки непрофільованим електродом - інструментом і комбінованих процесів алмазного шліфування з електрохімічною та електроіскровою дією на робочу поверхню круга (РПК).

Враховуючи, що більшість ПНТМ завдяки наявності в їх складі металевої зв'язки є провідниками електричного струму, було запропоновано вирішити проблему зменшення розмірів сколів на різальних кромках пластини з ПНТМ шляхом використання електроерозійної обробки на етапі попередньої обробки (розкрою).

Встановлено, що вихідні показники цього методу (для якого надзвичайно висока мікротвердість оброблювального матеріалу не має істотного значення) ПНТМ зумовлені багатьма факторами, основними з яких слід вважати відсотковий

вміст металевої зв'язки та розмір зерен початкового мікропорошку надтвердого матеріалу в складі полікристалу, а також електроерозійну стійкість цих складових.

При невеликому об'ємі металевої зв'язки із збільшенням розмірів алмазних зерен у складі полікристалу продуктивність процесу однозначно знижується. Проте при переважних об'ємах зв'язки цей вплив суттєво знижується. Це підтверджує положення про ключову роль металевої зв'язки у складі ПНТМ при електроерозійній обробці. З погляду продуктивності процесу її збільшення є позитивним моментом, а по відношенню до якості обробленої поверхні і особливо ріжучих кромek негативним. Це багато в чому пояснюється співвідношенням електроерозійної стійкості зерен початкового матеріалу і зв'язки (як складових ПНТМ), яка є комплексним показником, що враховує групу фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, важливих з погляду електричної ерозії. Згідно з формулою Палатника Л.С. маємо:

де $E_{ст.}$ – електроерозійна стійкість; C – питома теплоємність, $\text{кДж}/(\text{кг } ^\circ\text{C})$; ρ – щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$; λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м К})$; $T_{пл.}$ – температура плавлення, $^\circ\text{C}$; K – постійний коефіцієнт, $10^{-8} \text{ К м}^4/(\text{кДж Вт})$. Результати розрахунків по формулі (4) свідчать про те, що початкові алмазні зерна, які входять до складу ПНТМ, в порівнянні з матеріалом зв'язки мають значно більші значення $E_{ст.}$. Так для монокристалу алмаза (до якого наближаються мікропорошки алмазу) значення $E_{ст.}$ більш ніж на порядок вище, ніж металевих складових (наприклад, Cr , Ni , Co).

Загострені різальні кромки є найуразливішою частиною (унаслідок дії так званого «крайового» ефекту) робочої поверхні лезових інструментів із ПНТМ. Як і при обробці інших робочих поверхонь інструментів, якість кромek є функцією багатьох факторів, однак їх вплив у даному разі виявляється інтенсивніше. У загальному випадку при незмінних електричних режимах шорсткість і радіус округлення кромek знижуються у міру зменшення відсоткового вмісту зв'язки в ПНТМ (у межах, достатніх для нормального протікання електроерозійної обробки), розмірів зерен вихідного матеріалу, а також збільшення діаметру дрітного електроду-інструменту і кута загострення різальної кромки лезового інструменту, що заточують. Важлива роль і такого фактору, як розподіл зв'язки в пластині з ПНТМ, нерівномірність якої призводить як до виникнення відхилення різальної кромки від прямолінійності, так і до появи досить крупних кратерів (нагадують сколи після шліфування), що є результатом випадіння блоків алмазних зерен, охоплених металевою зв'язкою, внаслідок її випереджального видалення.

З режимних факторів найбільший вплив на якість робочих елементів лезових інструментів із ПНТМ має енергія одиничних імпульсів. З її збільшенням різниця значень $E_{ст.}$ складових ПНТМ виявляється ще в більшій мірі, що веде до погіршення якості ріжучих кромek. Встановлено оптимальні режими електроерозійної обробки непрофільованим електродом-інструментом стосовно різних груп ПНТМ з погляду вимог до мінімізації витрат на наступному етапі чистового алмазного шліфування.

Таким чином, можна вважати, що електроерозійна обробка непрофільованим електродом-інструментом є достатньо серйозною альтернативою чорновій обробці ПНТМ алмазними шліфувальними кругами на основі шліфпорошків алмазу як з погляду економії полікристалів, отримання необхідної якості різальних кромок перед подальшою чистовою обробкою, так і можливості отримання складного профілю з забезпеченням якості.

Виявлено, що важливою умовою забезпечення процесу шліфування зі стійкими значеннями вихідних показників обробки є стан макро - і мікропрофілю робочої поверхні круга, який багато в чому визначається ступенем заповнення міжелектродного зазору електролітом і правильним вибором конструктивних параметрівправлячого пристрою. Цю задачу було розв'язано завдяки низці запропонованих технічних рішень. Дослідження проводилися стосовно запропонованого оригінального процесу плоского торцевого багатомісного шліфування на верстатах з вертикальним розташуванням шпинделя, в якому якправлячий пристрій служить катод у вигляді перфорованого елемента (сепаратора), причому перфорації використовуються для розміщення в них оброблюваних ПНТМ (рис. 12). Таким чином, відмітною ознакою запропонованого способу є реалізація принципу поєднання функцій зони закріплення пластин ПНТМ, шліфування і електрофізикохімічної дії на РПК (А. с. № 1284751, № 1547980). Це значно розширює технологічні можливості процесу обробки ПНТМ, оскільки відсутній катодний пристрій, що займає певну частину РПК. При цьому зони шліфування і управління постійно чергуються, взаємно перериваючи одна одну.

Запропоновано і досліджено оригінальні методи примусової подачі електроліту в зони управління і шліфування. Перший з них (рис. 12) реалізує принцип сполучених посудин, а другий заснований на використанні алмазного круга спеціальної конструкції (А. с. № 1627394). В обох випадках рідина подається у внутрішню порожнину круга, а потім під дією відцентрових сил прокачується через зони управління і шліфування. Обробка проводиться в суцільному шарі електроліту, що дозволяє звести до мінімуму вплив теплового чинника, а також сприяє збереженню в процесі обробки початкового поперечного профілю РПК (рис. 14). При цьому значно збільшується робочий діапазон електричної напруги, а отже, і щільність струму (рис. 13) в ланцюзі управління РПК завдяки відсутності електричного пробоя міжелектродного зазору.

Рис. 12. Принципова схема способу:
1 - стіл верстата; 2 - станина; 3 - ванна;
4 - плита; 5 - сепаратор; 6 - шпindelь;
7 - круг; 8 - крильчатка; 9 - ПНТМ.

Рис. 13. Порівняльні дані методів:
1 - полив перед фронтом круга; 2 -
метод примусової подачі рідини

Це істотно розширює технологічні можливості процесу шліфування, у тому числі і завдяки створенню умов для реалізації його сталості.

Діапазон робочих висот мікропорошків алмазу складає всього лише одну десяту від діапазону шліфзерен. У зв'язку з цим при формоутворенні лезових інструментів з підвищеними вимогами до їх точності і якості метод інтенсивного електрохімічного управління РПК не завжди відповідає вимогам. Це пояснюється в основному істотною відмінністю в значеннях електрохімічних еквівалентів компонентів металевих зв'язок.

Уперше в практиці обробки ПНТМ доведено ефективність рівномірно розподіленого електроіскрового процесу для управління РПК, що є ще однією важливою особливістю процесу шліфування, яка базується на використанні струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу. Це пов'язано насамперед з можливістю реалізації малих величин міжелектродних зазорів, оскільки його мінімальні значення обмежуються висотою рельєфу круга. На практиці це дозволяє підводити в зону управління РПК електричні імпульси з малою енергією, а отже, забезпечити високі значення якості і точності управління РПК, що знайшло своє підтвердження на практиці. Доведено, що для найбільш ефективного управління РПК слід використовувати спосіб, заснований на комбінації процесів електрохімічної та електроіскрової дії на зв'язку круга. При цьому основна частина похибок профілю РПК (у тому числі і биття круга) видаляється за допомогою високопродуктивного електрохімічного способу, а остаточне його формоутворення - шляхом рівномірної електроіскрової дії.

Результати теоретичних досліджень знайшли своє експериментальне підтвердження. Зокрема, з використанням описаної в розділі 3 концепції статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій стосовно процесу чистового формоутворення лезових інструментів із ПНТМ марки СКМ-Р було проведено імовірнісне прогнозування вихідних показників в умовах різного рівня невизначеності значень технологічних параметрів (рис. 14). Узагальнена

залежність (2), що зв'язує вихідний показник Y з системою технологічних параметрів, мала дещо змінений вигляд:

де $S_{\text{поп.}}$ - поперечна подача, f - частота одиничних електричних імпульсів.

Рис. 14. Екранна форма результатів статистичних розрахунків

Імовірнісний аналіз щільності розподілу значень сколів показав, що у разі використання кругів на основі мікропорошків алмазу навіть при дуже широкому діапазоні умов обробки вірогідність не появи сколів більше допустимої величини, по-перше, зростає в порівнянні з чорновим формоутворенням практично на порядок, а по-друге, середня величина сколів знижується більш ніж в три рази (рис. 14).

Завдяки використанню мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими покриттями вдалося забезпечити не тільки високі якісні показники, але також і значення питомої витрати алмазів круга на рівні, характерному для кругів з алмазними шліфзернами. Це є свідченням вирішення існуючого протиріччя між необхідністю використання зерен алмазу малих розмірів і міцністю їх утримання в металевій зв'язці. В особливо відповідальних випадках для чистової обробки алмазних ПНТМ необхідно рекомендувати круги на основі мікропорошків алмазу зернистістю $Z=28/20-14/10$.

Таким чином, виконаними теоретико - експериментальними дослідженнями встановлено, що сукупність зазначених вище особливостей, пов'язаних з використанням струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу, свідчить про існування усіх передумов для реалізації сталих процесів шліфування. Це вперше в практиці формоутворення ПНТМ дає можливість реалізувати високу розмірну точність, без чого вирішення проблеми виготовлення прецизійних лезових інструментів на їх основі дуже проблематично.

Ефективність використання запропонованого підходу підтверджена оцінкою, що базується на ідеї інжинірингу якості, вперше запропонованої Г. Тагуті. Для цього було розглянуто найважливіші складові сумарної технологічної собівартості на якісному рівні. Остання виступала в цьому випадку як інтегральний показник якості,

який в якійсь мірі можна порівняти з функцією надійності Тагуті. До таких складових можна віднести: технологічну собівартість формоутворення ріжучих елементів лезового інструменту (технологічна собівартість у виробника); довжину шляху різання як функцію чинника нерівноцінності значень показника якості у межах допуску (що обумовлено підвищенням розмірної точності); довжину шляху різання як функцію якості обробки робочих елементів ріжучої частини інструменту. При цьому останні два показники побічно відображають технологічну собівартість у споживача продукції. Це дозволило встановити, що у порівнянні зі шліфуванням органічними кругами на основі мікропорошків алмаза та електроерозійною обробкою дисковим електродом-інструментом, запропонований підхід має значні переваги.

Розділ 6. У розділі вирішено питання, пов'язані з практичною реалізацією сформульованих наукових положень шляхом розробки та запровадження високоефективних процесів формоутворення лезових інструментів із ПНТМ шліфуванням. У зв'язку з цим наведено ряд технічних рішень, направлених на забезпечення необхідного стану ріжучого рельєфу і макропрофілю алмазних струмопровідних торцевих і периферійних кругів стосовно різних схем шліфування (заточування).

Так для реалізації принципу вибіркової переважної цілеспрямованої послідовності використання потенціалу різних процесів формоутворення лезових інструментів із ПНТМ стосовно заточувальних верстатів запропоновано оригінальний спосіб та багатофункціональний пристрій для управління ріжучим рельєфом торцевих кругів (А. с. № 1237335, № 1484508). У ньому закладено такі функції: можливість реалізації паралельного і послідовного використання електрохімічного і електроіскрового методів дії на зв'язку струмопровідного круга; поєднання правлячим електродом функцій електроіскрової правки і відстеження розмірного зносу ріжучого рельєфу круга для підтримки заданої величини міжелектродного зазору у ланцюзі електрохімічної правки; безперервного самопідтримування необхідного стану робочої поверхні електроду трубчастої конструкції шляхом її постійного підшліфування за рахунок надання йому обертального руху; забезпечення можливості управління переміщенням електроіскрових розрядів по робочій поверхні круга і тим самим зниження інтенсивності їх високотемпературної дії на алмазні зерна (щадний процес); стабілізації дії, що управляє, на РПК в умовах неможливості або недоцільності використання електронної слідкуючої системи.

Встановлено, що принцип вибіркової переважної цілеспрямованої послідовності реалізації потенціалу різних процесів є чи не єдиною можливістю практичної реалізації процесу формоутворення прецизійних і особливо складнопрофільних лезових інструментів із ПНТМ. Це може бути здійснено, наприклад, за допомогою запропонованих нижче способів шліфування з безперервним профілюванням РПК (рисунки 15, 16).

Особливістю електрохімічного способу (рис. 15) є те, що в його основу закладено п'ять принципів, спрямованих на досягнення максимально можливої точності профілювання РПК: 1 - застосування струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу, внаслідок чого забезпечується можливість реалізації малих значень міжелектродного зазору; 2 - використання кругів із заздалегідь

сформованим профілем, що дозволяє вважати площу в зоні управління величиною постійною; 3 - забезпечення рівноважного міжелектродного зазору перед початком електрохімічної дії на РПК за рахунок правки (корекції) профілю катода робочим кругом на зворотній полярності; 4 - використання датчика електропровідності електроліту для урахування можливого факту зміни електропровідності електроліту в процесі формоутворення РПК; 5 - використання автоматичної слідкуючої системи.

Рис. 15. Принципова схема формоутворення складнопрофільного інструменту із ПНТМ з електрохімічним профілюванням РПК:

1 - круг; 2 - катод; 3 - реверсивний електродвигун; 4,5 - механізм передачі; 6 - джерело живлення; 7 - реверсивний перемикач; 8 - шунт; 10 - джерело стабілізованої напруги; 10 - блок порівняння; 11 - датчик електропровідності електроліту; 12 - суматор; 13 - електронний підсилювач

Електроіскровий спосіб (рис. 16) передбачає з використанням системи числового програмного управління профілювання струмопровідного круга за допомогою дискового електроду-інструменту (наприклад, на основі графіту), профіль якого забезпечується майстер-різцем. При цьому круг на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями забезпечує формоутворення профілю на лезовому інструменті із ПНТМ.

Рис. 16. Структурна схема формоутворення складнопрофільного інструменту із ПНТМ з електроіскровим профілюванням РПК:

1 - алмазний круг; 2 - ПНТМ; 3 - генератор електричних імпульсів;
4 - струмоз'ємник; 5 – майстер - різець; 6 - дисковий електрод – інструмент

Можливість забезпечення малих величин міжелектродних зазорів при використанні струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу дозволило суттєво підвищити точність профілювання робочої поверхні інструментів другого порядку при використанні як електрохімічного, так і електроіскрового методів управління.

Для реалізації на практиці сталого процесу плоского торцевого шліфування лезових інструментів із ПНТМ у інтегрованих багатомісних пристосуваннях розроблено і реалізовано структурну схему слідкуючої системи, в якій інтенсивність електрохімічного видалення зв'язки круга регулюють шляхом зміни сили струму в колі керування в залежності від ефективної потужності електродвигуна приводу головного руху верстата.

На підставі виконаних досліджень було запропоновано способи шліфування та управління РПК, а також конструкції пристроїв для їх здійснення стосовно різних груп верстатів. Це заточувальні, кругло, - внутрішньо, - а також плоскошліфувальні верстати (з прямолінійним і обертальним рухами стола). Ці технічні рішення дозволяють у конкретних умовах реалізувати основні умови забезпечення сталості вихідних показників процесу шліфування.

Виконана спеціальна розробка стосовно управління ріжучим рельєфом та макропрофілем струмопровідних алмазних кругів з широкою робочою поверхнею. Це дало можливість забезпечувати високі показники відхилень форми (наприклад, відхилень різальних кромки лезових інструментів із ПНТМ від прямолінійності т. і.).

Таким чином, використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями в комбінованих процесах шліфування зі сталими вихідними показниками у поєднанні з реалізацією принципу вибіркової переважної цілеспрямованої послідовності застосування потенціалу різних процесів обробки вирішена проблема формоутворення прецизійних (у тому числі і складнопрофільних) лезових інструментів із ПНТМ.

На рис. 17 наведені узагальнені практичні рекомендації по використанню цього принципу.

Рис. 17. Рекомендації по реалізації принципу вибіркової переважної цілеспрямованої послідовності при формоутворенні складнопрофільних лезових інструментів із ПНТМ

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено науково-практичну проблему високоякісного формоутворення прецизійних (у тому числі і складнопрофільних) лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів за рахунок використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями в комбінованих процесах шліфування зі сталими значеннями вихідних показників обробки.

1. Показано, що традиційні процеси алмазного шліфування ПНТМ кругами на основі шліфзерен не в змозі стабільно забезпечувати необхідну якість обробки. Це насамперед зумовлено високими значеннями сил і температури в зоні обробки, а також неможливістю забезпечення сталих значень вихідних показників обробки. Імовірнісний аналіз щільності розподілу значень сколів на базі використання концепції статистичного моделювання робочих процесів інтегрованих технологій, адаптованою стосовно формоутворення лезових інструментів із ПНТМ, показав, що навіть за самих щадних умов чорнової обробки вірогідність появи сколів менш допустимої величини (~ 20 мкм) мала і знаходиться в межах п'яти відсотків.

2. Завдяки використанню концепції 3D моделювання напружено-деформованого стану інструментальної підсистеми «алмазне зерно – рельєфне товстошарове покриття – зв'язка круга» і різальної системи «зв'язка круга - рельєфне товстошарове покриття - алмазне зерно - оброблюваний матеріал» сформульовано наукове положення про можливість суттєвого підвищення ресурсу зерен мікропорошків алмазу у процесах формоутворення лезових інструментів із ПНТМ за рахунок нанесення на них рельєфних товстошарових металевих покриттів. Цьому сприяє наступне:

- металеві товстошарові покриття (з товщиною рівною 0,4 – 0,6 середнього розміру зерна) на зернах мікропорошків алмазу мають визначальну роль з погляду передумов реалізації процесів шліфування зі сталими значеннями вихідних

показників обробки ще на етапі спікання алмазозносного шару круга. Їх наявність сприяє збереженню алмазних зерен навіть у високотемпературних умовах спікання алмазозносного шару кругів на металевих зв'язках;

- наявність рельєфного металевих товстошарового покриття на алмазному зерні вносить істотні корективи до напружено-деформованого стану різальної системи «зв'язка круга - рельєфне товстошарове покриття - алмазне зерно - оброблюваний матеріал», що виявляється в значному зменшенні величини напруги на межі «покрите алмазне зерно-зв'язка круга» та їх збільшенні на межі «алмазне зерно – оброблюваний ПНТМ». У комплексі це сприяє продовженню життєвого циклу зерен та інтенсифікує процес зняття припуску з оброблюваного матеріалу;

- напружено-деформований стан в зернах мікропорошків алмазу круга менше ніж у шліфпорошків завдяки незначній кількості металофази в їх складі, а процес шліфування кругами на їх основі більш щадний, що сприятливо відбивається на стійкості ріжучого рельєфу круга і якості різальних кромок оброблюваного ПНТМ;

3. Сформульовано і доведено наукове положення про можливість ефективного вирішення проблеми формоутворення прецизійних і зокрема складнопрофільних лезових інструментів із ПНТМ на базі використання принципу вибіркової переважної цілеспрямованої послідовності реалізації потенціалу різних процесів обробки. При цьому найкоротшим шляхом досягнення високих значень розмірної точності і якості робочих елементів лезових інструментів із ПНТМ можна вважати послідовне використання електроерозійної обробки непрофільованим електродом - інструментом і комбіновані процеси алмазного шліфування відповідно з інтенсивною рівномірно розподіленою електрохімічною або щадною локальною електроіскровою дією на робочу поверхню струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу. При цьому основна частина похибок профілю РПК видаляється за допомогою високопродуктивного електрохімічного, а остаточне його формоутворення шляхом щадної локальної електроіскрової дії.

4. Роль силового і температурного чинників у процесі формоутворення різальних кромок лезових інструментів із ПНТМ підтверджено теоретичними розрахунками напружено-деформованого стану двошарових пластин. Установлено, що градієнт напруги по товщині пластини збільшується у міру зростання відношення модулів пружності матеріалів робочого шару і підкладки. Для зниження вірогідності утворення тріщин модуль пружності матеріалів робочого шару і підкладки не повинні відрізнятися більше ніж в 2 рази, а в процесі шліфування необхідно прагнути до максимального зниження нормальної складової сили різання. Доведено, що температурний чинник може бути однією із причин утворення сколів на ріжучих кромках лезових інструментів із ПНТМ, що мають у своєму складі металеві включення, причому роль цього чинника зростає із збільшенням значення коефіцієнта лінійного розширення та розміру металевих включень.

5. Встановлено, що завдяки комбінованим процесам шліфування алмазні зерна з металевими покриттями не тільки можуть бути використані в кругах на міцних металевих зв'язках, але, навпаки, в умовах, коли відсутнє заглиблення алмазних шліфувальних зерен в алмазний оброблюваний матеріал, наявна можливість видалення матеріалу покриття (так само як і зв'язки круга) електрофізикохімічним способом відкриває нові перспективи в плані управління ріжучим рельєфом круга.

Зокрема, керуючи швидкостями електрофізикохімічного видалення зв'язки круга і матеріалу покриття (шляхом вирівнювання їх значень або використання ефекту випередження одного з них), можна цілеспрямовано впливати на механізм зносу алмазних зерен.

6. Сформульовано основні принципи для забезпечення сталості процесів шліфування. Це насамперед створення умов для отримання стабільної характеристики алмазозносного шару круга при його спіканні; забезпечення високої зносостійкості ріжучого рельєфу круга; наявність необхідних вискоефективних способів управління ріжучим рельєфом круга і пристроїв для їх практичної реалізації; забезпечення стабільності процесів в зоні управління ріжучим рельєфом круга; наявність автоматизованої слідкуючої системи, яка підтримувала б заданий стан ріжучого рельєфу круга. Доведено, що струмопровідні круги на основі мікропорошків алмазу щонайкраще відповідають вимогам сталого процесу шліфування.

7. Підтверджено, що для аналізу оброблюваності електричною ерозією ПНТМ як гетерогенних матеріалів доцільно використовувати показник електроерозійної стійкості, оцінюваний, наприклад, за критерієм Палатника Л.С., що враховує одночасний вплив комплексу фізичних властивостей оброблюваного матеріалу на його здатність протистояти електроерозійному руйнуванню. Розрахунки значень цього критерію показали, що електроерозійна стійкість алмазу у багато разів перевершує її значення для матеріалів, які складають металеву фазу.

8. Виявлено ключову роль металевої зв'язки у складі ПНТМ з точки зору електроерозійного формування якісних різальних кромek, що особливо характерно для ПНТМ з великим вмістом металевої зв'язки і призводить як до виникнення відхилення ріжучої кромки від прямолінійності, так і до появи достатньо великих кратерів (нагадують сколи після шліфування) які є результатом видалення блоку алмазних зерен, охоплених металевою зв'язкою. Скупчення зв'язки біля граней заготовки різальної пластини підсилює цю тенденцію.

9. Вперше в практиці обробки ПНТМ доведено ефективність електроіскрового процесу для управління робочою поверхнею круга, що є ще однією важливою особливістю процесу шліфування, заснованого на використанні струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу. Це пов'язано насамперед з можливістю реалізації малих величин міжелектродного зазору, оскільки його мінімальні значення часто обмежуються висотою рельєфу круга. На практиці це дозволяє підводити в зону управління робочою поверхнею круга електричні імпульси з малою енергією, а отже, забезпечити високі значення якості і точності управління РПК, що знайшло своє підтвердження на практиці.

10. Встановлено, що одним з шляхів істотного розширення технологічних можливостей процесу обробки ПНТМ може бути реалізація принципу поєднання функцій зони закріплення пластин ПНТМ, шліфування і електрофізикохімічної дії на робочу поверхню круга стосовно верстатів з вертикальним розташуванням шпинделя. У зв'язку з цим запропоновано високопродуктивний спосіб плоского шліфування торцевими кругами з використанням оригінальних інтегрованих багатомісних пристосувань.

11. Ефективність вирішення проблеми формоутворення лезових інструментів із ПНТМ за рахунок використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями у поєднанні з реалізацією принципу вибіркової переважної цілеспрямованої послідовності реалізації потенціалу різних процесів обробки підтверджено оцінкою, що базується на реалізації ідеї інжинірингу якості.

12. Результати дисертаційної роботи впроваджено на чотирьох виробничих підприємствах з загальним економічним ефектом у сумі понад 200 тисяч гривень, а також в учбовий процес НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пыжов И.Н. Повышение эффективности шлифования двухслойных пластин из ПНТМ / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Козьмин Ю.С. // Резание и инструмент. – Харьков: 1988.-Вып. 40.-С. 14-20. Здобувачем запропоновано моделі перехідної зони пластин та проведено аналіз результатів розрахунків.

2. Пыжов И.Н. Методика оценки работоспособности кругов из СТМ / Иванов Н.П., Пыжов И.Н., Воронков В.И. // Резание и инструмент. – Харьков: 1989.-Вып.42.-С.19-22. Здобувачем виконані теоретичні розрахунки силових залежностей при шліфуванні за пружною схемою.

3. Пыжов И.Н. Особенности управления режущим рельефом алмазных кругов при шлифовании пластичных материалов / Грабченко А.И., Наконечный Н.Ф., Пыжов И.Н. // Резание и инструмент. – Харьков: 1989.-Вып.43.-С.112-117. Здобувачем виконано теоретичні розрахунки по встановленню оптимальних умов реалізації способу правки круга та їх експериментальна перевірка.

4. Пыжов И.Н. Управление режущим рельефом алмазных кругов при обработке высокотвердых материалов / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Морштейн Е.Д. // Сверхтвердые материалы. –К.: 1989.-№ 6.-С.32-35. Здобувачем запропоновано один з підходів для реалізації принципу вибіркової переважної цілеспрямованої послідовності реалізації потенціалу різних способів обробки.

5. Пыжов И.Н. Шлифование плоских поверхностей алмазными кругами на металлической связке / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Култышев С.А. // Станки и инструмент. –М.: 1990.-№ 7.-С.26-28. Здобувачем запропоновано принцип поєднання функцій зон шліфування, управління та закріплення пластин.

6. Повышение эффективности заточки буровых коронок алмазными токопроводящими кругами / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Култышев С.А., Линенко – Мельников Ю.П. // Сверхтвердые материалы. –К.: 1990.-№ 1.- С.57-60. Здобувачем запропонована конструкція пристрою для правки периферійних алмазних кругів.

7. Пыжов И.Н. Расширение технологических возможностей

плоского торцевого алмазного шлифования за счет рациональной подачи электролита в зону управления и обработки / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Култышев С.А. // Сверхтвердые материалы. - К.: 1990.-№ 6.-С.58-61. Здобувачем запропоновано наукові підходи до розробки конструкції пристроїв для подачі ЗОТС у зони управління та шліфування.

8. Пыжов И.Н. Повышение эффективности заточки режущих инструментов в многоместных приспособлениях / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Култышев С.А. // Резание и инструмент.- Харьков: 1990. - Вып.44. - С. 3-4. Здобувачем запропоновано концептуальний підхід до розробки конструкції правлячого пристрою стосовно касетного пристосування.

9. Использование электроэрозии для обработки сверхтвердых материалов и режущей керамики / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазеев М.Г., Грибовски Л. // Резание и инструмент.- Харьков: 1993.-Вып.47.-С.65-69. Здобувачем запропонована концепція електроерозійної обробки ПНТМ.

10. Классификация сверхтвердых материалов по обрабатываемости их электроэрозионным методом / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазеев М.Г., Горбунов С.М. // Резание и инструмент.-Харьков: 1994.-Вып.49.-С.60-64. Здобувачу належить ідея проведення класифікації ПНТМ щодо можливості використання електроерозійної обробки.

11. Пыжов И.Н. Некоторые пути повышения эффективности управляемого процесса алмазного шлифования ПНТМ / Пыжов И.Н. // Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков: 2000. -Вып.14.- С. 326-328.

12. Пыжов И.Н. Устройство для стабилизации процесса алмазного шлифования ПНТМ токопроводящими алмазными кругами / Пыжов И.Н. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.-Харьков: 2001.-Вып.59.- С.176-178.

13. Пыжов И.Н. Некоторые пути повышения эффективности управляемого процесса шлифования / Пыжов И.Н. // Резание и инструмент в технологических системах.- Межд. научн.-техн. сборник. - Харьков: 2001.-Вып.60.-С. 197-199.

14. Пыжов И.Н. Повышение эффективности процесса алмазного шлифования ПНТМ за счет использования вибраций / Пыжов И.Н. // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». - Харків: 2004.- Вип. 1.-С. 113-116.

15. Пыжов И.Н. К вопросу стабилизации управляемого процесса алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов / Пыжов И.Н. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. - Харків: 2005. - №24.-С 177-183.

16. Пыжов И.Н. Некоторые особенности стабилизации

управляющего воздействия на рабочую поверхность алмазного токопроводящего круга / Пыжов И.Н. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків: 2005. – Вип. 2 (11). – С. 322-327.

17. Пыжов И.Н. К вопросу определения оптимального сочетания компонентов в спекаемом алмазоносном слое шлифовальных кругов / Федорович В.А., Пыжов И.Н., Аносов В.И. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків: 2006. – Вип. 1 (12). – С. 497-504. Здобувачем виконані розрахунки НДС алмазоносного шару кругів на керамічних та органічних зв'язках.

18. Пыжов И.Н. Некоторые особенности формообразования рабочих поверхностей лезвийных инструментов из ПНТМ при алмазном шлифовании / Грабченко А. И., Пыжов И. Н. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: 2006. – Вип. 70. – С. 132-137. Здобувачем виконано теоретичні розрахунки по впливу сколів на ріжучих кромках інструментів на показники процесу їх формоутворення.

19. Пыжов И.Н. К особенностям обработки поликристаллических сверхтвердых материалов токопроводящими кругами на основе микропорошков алмаза / Грабченко А. И., Пыжов И. Н. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ». – Харків: 2006. – Вип. 2 (13). – С. 24-34. Здобувачем встановлено роль мікропорошків алмазу в забезпеченні сталості ріжучого рельєфу струмопровідних кругів.

20. Пыжов И. Н. К особенностям заточки и доводки рабочих элементов лезвийных инструментов из ПНТМ при алмазном шлифовании / Пыжов И. Н. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: 2007. – № 01. – С. 18-25.

21. Пыжов И. Н. Некоторые особенности электроэрозионной обработки сложных изделий из ПНТМ профилированным и непрофилированным электродами-инструментами / Пыжов И. Н. // Високі технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ» – Харків: 2007. – Вип. 1 (14). – С. 70-79.

22. Особенности применения токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза при заточке лезвийных инструментов из ПНТМ / [Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А., Пыжов И.Н., Гаращенко Я.Н.] // Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». Машиностроение. – К.: 2008. – Вип. 52. – С. 384-397. Здобувачем висунута та підтверджена гіпотеза стосовно закону розподілу зерен мікропорошків алмазу на РПК.

23. Теоретическое обоснование эффективности использования микропорошков в алмазных кругах на металлических связках / Пыжов И.Н., Федорович В.А., Русанов В.В., Калита И.Н. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.-Харьков: 2008.-Вып.74.-С. 258-266. Здобувачем запропоновано і доведено ідею необхідності нанесення на мікропорошки товстошарових металевих покриттів.

24. Расширение технологических возможностей изготовления алмазно-абразивных инструментов / Грабченко А.И., Федорович В.А., Пыжов И.Н., Русанов В.В. // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ».-Харків: 2008.-Вип.1 (14).-С.88 - 98. Здобувачем запропоновано і доказано ідею необхідності нанесення на мікропорошки рельєфних покриттів.

25. Теоретическое обоснование эффективности использования металлических покрытий на микропорошках в алмазных кругах на металлических связках / Грабченко А.М., Пыжов И.Н., Федорович В.А., Калита И.Н. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.-Харьков: 2008.-Вып.75.-С. 77-85. Здобувачем виконано теоретичні розрахунки НДС алмазних зерен з покриттями.

26. А.с. № 1284751 СССР, МКИ В 23 Н 7/00. Устройство для шлифования кругами на токопроводящей связке / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, В.Л. Рохлин, С.В. Парсегов, В.Ю. Поволоцкий, Д.М. Алексеенко (СССР). -№ 3881023/31-08; заявл. 09.04.1985; опубл. 23.01.1987, Бюл. № 3. Здобувачем запропоновано варіант реалізації принципу поєднання функцій зон шліфування, управління та закріплення пластин стосовно заточувальних верстатів.

27 А.с. 1569124 СССР, МКИ В 23 Н 7/00. Способ непрерывной правки токопроводящих абразивных кругов / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, С.А. Култышев (СССР). -№ 4414396/31-08; заявл. 25.04.88; опубл. 07.06.1990, Бюл. № 21. Здобувачем запропоновано підхід до стабілізації керуючої дії у зоні правки круга.

28 А.с. № 1641538 СССР, МКИ В23Н 3/04, 7/00. Способ непрерывной электрохимической правки торцовых абразивных кругов / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, С.А. Култышев, Л.П. Акуленок, В.С. Кучеренко (СССР). -№ 4404212/08; заявл. 04.03.1988; опубл. 15.04.1991, Бюл.№ 14. Здобувачем запропоновано спосіб поліпшення заповнення зазору електролітом.

29. Пыжов И.Н. Исследование возможности изготовления сложнопрофильных лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов на основе алмаза / Пыжов И.Н., Магазеев М.Г., Воронков В.И. // Высокие технологии в машиностроении. Матер.

международ. науч.-техн. сем. «Интерпартнер-92».-Харьков: 1992.-С. 134-137. Здобувачем встановлено вплив електричних режимів обробки на показники процесу.

30. Пыжов И.Н. Методика проведения расчетов при создании сложнопрофильных инструментов из сверхтвердых материалов на эрозионных станках с ЧПУ / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазеев М.Г. // Компьютер: наука, техника, технология, здоровье. Матер. международ. науч.-техн. конф.-Харьков: 1993.-С. 61-63. Здобувачем запропоновано методичний підхід до розрахунків профілю інструментів.

31. Диагностирование обрабатываемости поликристаллов алмаза электроэрозионным методом / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазеев М.Г., Горбунов С.Н. // Высокие технологии в машиностроении: моделирование, оптимизация, диагностика. Матер. международ. науч.-техн. сем. «Интерпартнер-94».-Харьков: 1994.-С. 47-49. Здобувачем запропоновано положення про особливу роль металевих включень в ПНТМ при їх електроерозійній обробці.

32. Электроэрозионная обработка поликристаллов кубического нитрида бора на станках с CNC-управлением / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазеев М.Г., Грай К. // Компьютер: наука, техника, технология, образование, здоровье». Матер. международ. науч.-техн. конф.-Харьков: 1994.-С. 54. Здобувачем запропоновано механізм зняття припуску із полікристалів КНБ.

33. Создание банка данных для высокоэффективной обработки сверхтвердых и керамических материалов на электроэрозионных станках с CNC-управлением / Грабченко А.И., Пыжов И.Н., Магазеев М.Г., Горбунов С.Н. // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье». Матер. международ. науч.-техн. конф.-Харьков: 1995.-С. 53. Здобувачем запропоновано послідовність методів електроерозійної обробки ПНТМ.

34. Пыжов И.Н. Моделирование обработанной поверхности при электроэрозионной обработке сверхтвердых материалов / Пыжов И.Н., Магазеев М.Г., Горбунов С.Н. // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье». Матер. международ. науч.-техн. конф.-Харьков: 1996.-С. 176-177. Здобувачем запропоновано методичний підхід до процесу моделювання.

35. Пыжов И.Н. Обеспечение устойчивости процесса плоского торцового алмазного шлифования за счет управления рельефом алмазных кругов / Пыжов И.Н. // Высокие технологии в машиностроении: диагностика процессов и обеспечение качества: Матер. VI международ. науч.-техн. сем. «Интерпартнер-

96». Харьков-Алушта: 1996.-С.110-112.

36. Пыжов И.Н. Стабилизация процесса шлифования ПНТМ периферией алмазных кругов / Пыжов И.Н. // Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг: Матер. VII междунар. науч.-техн. сем. «Интерпартнер-97». -Харьков-Алушта: 1997.-С.212-115.

37. Theoretical substantiation of efficiency of use of metal coatings on micropowders in diamond wheels on metal bonds / Anatoly I. Grabchenko, Vladimir A. Fedorovich, Valeriy A. Fadeev, Ivan N. Pyzhov, Ivan A. Kalita. // Materials XXIII. microCAD international scientific conference 19-20 march 2009.-Miskolc:-S. 105-110. Здобувачем запропоновано розрахункову модель і проведено аналіз результатів теоретичних розрахунків.

АНОТАЦІЇ

Пижов І.М. Наукові основи формоутворення лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів.-Рукопис.

Дисертація у вигляді рукопису на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за фахом 05.03.01-процеси механічної обробки, верстати та інструменти.- Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2009.

У дисертаційній роботі розроблено принципи і запропоновано методи вирішення проблеми формоутворення прецизійних (в тому числі і складно профільних) лезових інструментів із полікристалічних надтвердих матеріалів за рахунок використання струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями в комбінованих процесах шліфування зі сталими значеннями вихідних показників обробки.

Теоретичні дослідження дозволили встановити, що струмопровідні круги на основі мікропорошків алмазу якнайкраще відповідають вимогам вирішення зазначеної проблеми. У зв'язку з цим для розв'язання протиріччя між необхідністю використання дрібних зерен і міцністю їх утримання у зв'язці була запропонована, на основі 3D методології моделювання напружено-деформованого стану інструментальної підсистеми «алмазне зерно – рельєфне товстошарове покриття – зв'язка круга» і різальної системи «зв'язка круга - рельєфне товстошарове покриття - алмазне зерно - оброблюваний матеріал» теоретично обґрунтована і експериментально доведена наукова гіпотеза про необхідність нанесення на мікропорошки алмазу рельєфних металевих покриттів, товщина яких наближається до половини середнього розміру зерна.

Для отримання високих значень розмірної точності і якості робочих елементів лезових інструментів із ПНТМ при використанні струмопровідних кругів на основі мікропорошків алмазу з рельєфними товстошаровими металевими покриттями запропоновано принцип вибіркової переважної послідовності реалізації потенціалу процесів електроерозійної обробки і алмазного шліфування з додатковою інтенсивною рівномірно розподіленою або щадною локальною дією на зв'язку круга.

Практичне запровадження даного принципу здійснено завдяки ряду технічних рішень, захищених більш ніж двадцятьма авторськими свідоцтвами.

Ефективність вирішення проблеми підтверджено оцінкою, що базується на реалізації ідеї інжинірингу якості, а також результатами впровадження результатів роботи у виробництво з економічним ефектом у сумі понад 200 тисяч гривень.

Ключові слова: процес формоутворення, комбінований процес шліфування, алмазний круг, мікропорошок алмазу, лезовий інструмент із ПНТМ, ріжуча кромка, ріжучий рельєф круга, напружено - деформований стан.

Пыжов И.Н. Научные основы формообразования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов. – Рукопись.

Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2009.

В диссертационной работе разработаны принципы и предложены методы решения проблемы формообразования прецизионных (в том числе и сложнопрофильных) лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов за счет использования токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза с рельефными толстослойными металлическими покрытиями в комбинированных процессах шлифования с устойчивыми значениями выходных показателей обработки.

Доказано, что традиционные процессы алмазного шлифования ПНТМ кругами на основе шлифзерен не в состоянии стабильно обеспечивать требуемое качество обработки, что обусловлено в основном высокими значениями сил и температуры, а также невозможностью обеспечения устойчивых значений выходных показателей процесса. В связи с этим были сформулированы основные принципы для обеспечения устойчивости процессов шлифования. Это, в первую очередь, создание условий для получения стабильной характеристики алмазосносного слоя круга при его спекании; обеспечение высокой износостойкости режущего рельефа круга; наличие необходимых высокоэффективных способов управления режущим рельефом круга и устройств для их практической реализации; обеспечение стабильности процессов в зоне управления режущим рельефом круга; наличие автоматизированной следящей системы, которая поддерживала бы заданное состояние режущего рельефа круга.

На базе использования концепции 3D моделирования инструментальной подсистемы «алмазное зерно – рельефное толстослойное покрытие – связка круга» и системы резания (шлифования) «связка круга - рельефное толстослойное покрытие - алмазное зерно - обрабатываемый материал», а также методологии 3D моделирования алмазно – абразивных инструментов установлено, что токопроводящие круги на основе микропорошков алмаза наилучшим образом соответствуют требованиям устойчивого процесса шлифования.

Для разрешения противоречия между необходимостью использования мелких зерен и прочностью их удержания в связке была предложена, теоретически

обоснована и экспериментально доказана научная гипотеза о необходимости нанесения на микропорошки алмаза рельефных металлических покрытий, толщина которых приближается к половине среднего размера зерна.

В частности доказано, что наличие рельефного металлического толстослойного покрытия на алмазном зерне, с одной стороны, защищает его от разрушения на этапе спекания алмазонасного слоя, а с другой - вносит существенные коррективы в напряженно-деформированное состояние системы резания «связка круга - алмазное зерно – рельефное толстослойное покрытие - обрабатываемый материал». Это проявляется в значительном уменьшении величины напряжений на границе «зерно-связка» и их увеличении на границе «алмазное зерно – обрабатываемый ПНТМ», что в комплексе способствует продлению жизненного цикла зерен и интенсифицирует съем обрабатываемого материала.

Предложено и экспериментально доказано, что для наиболее эффективного использования токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза с рельефными толстослойными металлическими покрытиями необходима реализация принципа выборочной предпочтительной целенаправленной последовательности применения потенциала процессов электроэрозионной обработки и алмазного шлифования с дополнительным электрохимическим и электроискровым воздействием на связку круга. В связи с этим предложен ряд технических решений, защищенных более чем двадцатью авторскими свидетельствами, позволяющими на практике осуществить этот подход.

Эффективность решения проблемы формообразования лезвийных инструментов из ПСТМ за счет использования токопроводящих кругов на основе микропорошков алмаза с рельефными толстослойными металлическими покрытиями в сочетании с реализацией принципа выборочной предпочтительной целенаправленной последовательности использования потенциала различных процессов подтверждено оценкой, которая базируется на реализации идеи инжиниринга качества, а также результатами внедрения результатов работы в производство с экономическим эффектом в сумме свыше 200 тысяч гривен.

Выполненная работа предназначена для исследователей, технологов и конструкторов в области изготовления и использования лезвийных инструментов из поликристаллических сверхтвердых материалов. Значимость достигнутых результатов будет возрастать по мере создания технологического оборудования, реализующего идеи, заложенные в данной работе.

Ключевые слова: процесс формообразования, комбинированный процесс шлифования, алмазный круг, микропорошок, лезвийный инструмент, режущая кромка, режущий рельеф круга, напряженно - деформированное состояние.

Pyzhov I.N. Scientific basis for forming of edge tools from polycrystalline superhard materials. – Manuscript.

Thesis for a doctor's degree by speciality 05.03.01 – Machining processes, machines and tools. – The National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2009.

In the thesis there are worked out the maxims and proposed the problem-solving techniques for a forming of precision edge tools including figurine from polycrystalline

superhard materials at the expense of the conducting wheels on the base of diamond classified flours with relief thick metal coatings in grinding combined processes with stable values of machining output indices.

The theoretical research allowed to establish that a conducting wheels on the base of diamond classified flours are the best advantage to requirements for solving of the observable problem. In connection with hereby for disambiguation between the necessity of use the fine grains and, contrariwise, the strength of its keeping in the bond it has been proposed, theoretically grounded (on the base of 3D methodology of deflected mode modeling of the systems «diamond grain – coating – wheel bond» and «wheel bond – coating – diamond grain – machining polycrystal») and proved experimentally the scientific hypothesis about relevance of deposition on the diamond classified flours the relief metal coatings with thickness approximating to half a grain mean size.

The concept of sample preferred purposeful realization of an electroerosion processing potcutical and diamond grinding with an additional intensive electrochemical or local electrospark action to the bond of a wheel is introduced for achievement of high side of quality and dimensional accuracy of edge tools from superhard polycrystals under application of conducting wheels on the base of the diamond classified flours with relief thick metal coatings. The practical implementation of this concept is carried out owing to a number of the technical decisions which enclosed more than twenty author's certificates.

Effectiveness of problem solving is confirmed by estimate on the base of realization of the quality engineering concept as well as by implementation of effort in manufacturing application with total saving rate more than 200 hryvna thousands.

Key words: forming process, combined grinding process, diamond wheel, classified flour, edge tool, cutting wedge, wheel cutting relief, deflected mode.