

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Федорович Володимир Олексійович

УДК 621.91

**РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ ТА СПОСОБІВ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ
УПРАВЛІННЯ ПРИСТОСОВУВАНІСТЮ ПРИ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ
НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.03.01 - Процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Харків – 2002 р.

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі "Різання матеріалів та різальні інструменти"
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 "Різання матеріалів та різальні
інструменти".

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Внуков Юрій Миколайович,
Запорізький національний технічний університет Міністерства

освіти і науки України, м. Запоріжжя,
проректор з наукової роботи;

доктор технічних наук, професор

Матюха Петро Григорович

Донецький національний технічний університет Міністерства
освіти і науки України, м. Донецьк,
завідувач кафедри “Металорізальні верстати та інструменти”;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Філатов Юрій Данилович

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
м. Київ,
провідний науковий співробітник

Провідна установа

**Національний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут",** кафедра "Інструментальне
виробництво" Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться "24" жовтня 2002 р. о "14" годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д64.050.12 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 " 20" вересня 2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Узунян М.Д.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасних умовах розвитку ринкової економіки в Україні найважливішим фактором успішної діяльності підприємств є підвищення якості і зниження собівартості продукції. В машинобудівних галузях промисловості ці фактори нерозривно пов'язані з інтенсифікацією механічної обробки, що у свою чергу багато в чому визначається працездатністю різального інструменту. Таким чином, підвищення ресурсу роботи інструменту є необхідною умовою ефективного функціонування сучасного машинобудівного підприємства. Далекі не розкритими можливостями реалізації цих умов характеризуються синтетичні надтверді матеріали (НТМ) на основі алмазу і щільних модифікацій нітриду бору. Широке застосування НТМ і організація масового виробництва з них різального, вигладжуючого, волочильного, бурового і вимірювального інструменту потребує розроблення

високопродуктивних прецизійних методів їхньої обробки.

Актуальність названої проблеми зумовлена низькою продуктивністю процесу шліфування, значною витратою дуже дорогих алмазних зерен і, як наслідок, високою собівартістю обробки. Також є нагальною проблема підвищення якості та надійності інструменту із НТМ, без чого неможливо застосування його в автоматизованому виробництві. Істотно скоротити обсяг і трудомісткість дорогих експериментальних досліджень при вирішенні проблеми ефективної обробки різних марок НТМ, у тому числі тих, що тільки створюються, можна за рахунок розробки сучасної експертної системи процесу алмазного шліфування НТМ, що базується на встановлених фізичних і технологічних закономірностях, які пов'язані з аномальною нестабільністю процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язано з держбюджетною і міжнародною науковою тематикою кафедри "Різання матеріалів і різальні інструменти" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" з наступних тем і програм: M2201 "Розробка теоретичних основ та створення нових методів, обладнання і високоефективних інструментів для обробки неметалічних композиційних та інших важкооброблювальних матеріалів", 1991-1993 рр.; КН2211 "Фізичне та математичне моделювання базових процесів прецизійної обробки для забезпечення структурної та параметричної оптимізації", 1993 р.; M2211 "Розробка та дослідження прогресивних методів виготовлення сучасних конструкцій різальних інструментів та виробів з надтвердих матеріалів", 1994-1996 рр.; ЕС2201 "Прецизійне та ультрапрецизійне точіння та шліфування металів, конструкційної кераміки та полімерів" (проект MINOS № ERB 3512PL964070 по програмі ЄС INCO-COPERNICUS), 1997-2000 рр.; M2223 "Розробка концепції способів формування високоточних поверхонь виробів машинобудівного та медичного призначення з заданими функціональними властивостями на основі комплексного застосування нових видів покриттів та управління трансформацією стану ріжучих поверхонь алмазно-абразивних інструментів", 1999-2001 рр.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності алмазного шліфування синтетичних надтвердих матеріалів за рахунок управління явищем взаємної пристосовуваності поверхонь круга та оброблюваної деталі, розробки і застосування експертної системи процесу, що забезпечує прогнозування та оптимізацію високого рівня вихідних показників.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розглянути процес алмазного шліфування НТМ у рамках єдиної системи оброблюваний матеріал (НТМ) - алмазне зерно шліфувального круга та зв'язку круга, ефективність функціонування якої визначається рівнем пристосовуваності поверхонь круга і НТМ. Розробити методологію комплексних теоретико-експериментальних досліджень процесу алмазного шліфування НТМ і експериментально-аналітичну модель пристосовуваності елементів системи.
2. З урахуванням раніше виявленої аномальної нестабільності процесу при алмазному шліфуванні НТМ провести на основі 3D моделювання комплексний теоретичний і експериментальний аналіз зміни топографічних параметрів робочої поверхні круга і НТМ, виявити визначальні параметри пристосовуваності при високопродуктивній та прецизійній обробці НТМ.
3. Провести теоретичний аналіз напружено-деформованого стану зони шліфування шляхом 3D моделювання взаємодії елементів системи "НТМ-зерно-зв'язка" методом кінцевих елементів. На базі теоретичного та експериментального вивчення взаємозв'язку процесів мікроруйнування її елементів розробити експертну систему

процесу алмазного шліфування НТМ, у тому числі і наново створюваних, з метою прогнозування й оптимізації вихідних показників їхньої обробки.

4. Виявити причини виникнення дефектів обробленої поверхні НТМ, вплив анізотропії властивостей кристалітів НТМ і алмазних зерен круга, розподілу і розміру мікротріщин на характер їхнього руйнування; визначити умови бездефектної обробки. На цій основі підвищити надійність лезового інструмента із НТМ.

5. Розробити методологію управління процесом пристосовуваності, що забезпечує досягнення заданого рівня показників продуктивності, якості і собівартості алмазного шліфування НТМ. Для практичної реалізації розробити комплекс способів алмазного шліфування, що базуються на управлінні інтенсивністю пристосовуваності, спеціальні абразивні інструменти, модернізацію технологічного устаткування й оснащення, що обумовлюють підвищення ефективності алмазного шліфування за рахунок більш повного використання потенційно високих ріжучих властивостей алмазних зерен.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес алмазного шліфування надтвердих матеріалів.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є пристосовуваність взаємодіючих поверхонь при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів.

Методи дослідження. Робота виконана на основі фундаментальних положень теорії різання матеріалів і трибології, запропонованих нових методологічних підходів до вивчення процесу взаємодії двох поверхонь і розроблених оригінальних методик дослідження процесу алмазного шліфування НТМ. Використано експериментально-теоретичні методи механіки контактного руйнування, сучасні фізичні методи дослідження матеріалів - електронно-мікроскопічний, рентгеноструктурний, металографічний, а також оригінальні, розроблені автором методики: визначення динамічної міцності алмазних зерен, оцінки рівня пристосовуваності, вивчення втомлено-циклічного руйнування НТМ і зерен із накладенням ультразвукових коливань, визначення фактичної площі контакту в системі "НТМ-зерно-зв'язка", оцінки ефективності використання алмазних зерен. В роботі використані пакети прикладних програм Cosmos, MathCAD, MatLab і ін. Вперше застосовано 3D моделювання напружено-деформованого стану єдиної системи "НТМ-зерно-зв'язка" методом кінцевих елементів, а для вивчення параметрів 3D топографії робочої поверхні круга використано метод лазерного сканування. Експериментальні дослідження проводилися на розроблених стендах з використанням сучасної контрольно-вимірювальної апаратури, технологічні випробування - на спеціально модернізованих верстатах. Достовірність теоретичних положень роботи підтверджується результатами експериментальних досліджень і практикою промислового впровадження.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше на основі 3D моделювання напружено-деформованого стану єдиної системи "оброблюваний надтвердий матеріал - алмазне зерно - зв'язка круга" запропонована науково-обґрунтована систематика механізмів руйнування її елементів і визначені шляхи спрямованого регульованого впливу на систему абразивного мікрорізання, що забезпечує управління взаємною пристосовуваністю її елементів.

2. Сформульоване і доведене наукове положення про специфіку топографічного, структурно-фазового й енергетичного аспектів пристосовуваності взаємодіючих рівнотвердих поверхонь при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів як еволюційної властивості процесу, що визначає ефективність обробки. В рамках функціонування єдиної технічної системи "оброблюваний матеріал - алмазне зерно - зв'язка" пристосовуваність характеризується трьома етапами, що відображають

трансформацію механізмів руйнування елементів системи.

3. На базі комплексного теоретико-експериментального вивчення 3D топографії оброблюваної поверхні і робочої поверхні шліфувального круга методом лазерного сканування, моделювання 3D напружено-деформованого стану єдиної системи "оброблюваний матеріал-робоча поверхня абразивно-алмазного круга" і динаміки зносу її елементів розроблена експертна система процесу шліфування, що дозволяє прогнозувати й оптимізувати процес бездефектної обробки існуючих і наново створених надтвердих матеріалів.

4. Вперше отримано теоретичні залежності, що описують взаємозв'язок і зміну в процесі роботи комплексу параметрів 3D робочої поверхні круга (РПК), і розроблено алгоритм визначення оптимальних умов продуктивного або прецизійного шліфування синтетичних надтвердих матеріалів. Його основою є двохетапний метод 3D експериментально-теоретичного визначення відносної фактичної площі контакту, що враховує навантаження на субмікрорельєф алмазних зерен і обробленої поверхні, анізотропію властивостей кристалітів і алмазних зерен та пружних властивостей зв'язки круга. Встановлено, що головним топографічним параметром, що визначає рівень вихідних показників процесу шліфування, є відносна фактична площа контакту в системі "РПК-НТМ".

5. Сформульоване наукове положення про визначальну роль динамічної міцності алмазних зерен та модуля пружності металевої зв'язки в досягненні необхідного рівня інтенсивності взаємного мікроруйнування елементів системи "НТМ-зерно-зв'язка" за рахунок збільшення сили співудару в контакті "зерно-НТМ" (у зоні шліфування) і "зерно круга-зерно ударника" (у зоні керування), підвищення міцності алмазоутримання й здатності зерна круга оптимальним чином відреагувати на анізотропію кристалітів НТМ, що забезпечує підвищення продуктивності шліфування і скорочення питомої витрати алмазів.

6. Встановлено, що на структурно-фазову пристосовуваність істотно впливає анізотропія властивостей кристалітів оброблюваного матеріалу і алмазних зерен. Це стосується різниці значень мікротвердості, зносостійкості, енергії руйнування і міцності контактуючих елементів. На базі 3D моделювання напружено-деформованого стану системи виявлено, що для підвищення точності теоретичних розрахунків що до процесів руйнування елементів системи слід використовувати їхні фізико-механічні характеристики з урахуванням анізотропії властивостей. У розрахункових схемах 3D моделювання для продуктивного або доводочного (прецизійного) шліфування слід враховувати швидкості круга, розміри зерен, частоти їхніх власних коливань, розміри кристалітів оброблюваного надтвердого матеріалу через виведені залежності їх взаємного зв'язку та впливу на ефективність процесу.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена і реалізована на рівні готового програмного продукту для виробничих умов експертна система процесу алмазного шліфування НТМ. Розроблено алгоритм і програмне забезпечення для визначення оптимальних умов продуктивного і прецизійного шліфування НТМ. Розроблені методики: визначення динамічної міцності алмазних зерен безпосередньо в крузі; визначення і прогнозування коефіцієнта використання потенційних ріжучих властивостей алмазних зерен при шліфуванні НТМ (А.с. 1404832); комп'ютерного кольоровометричного визначення параметрів рельєфу і дефектів на поверхні НТМ шляхом сканування кольорових фотографій, отриманих у поляризованому світлі; визначення рівня пристосовуваності при шліфуванні НТМ за розміром струму електризації й електропровідності алмазних пар тертя, що дозволяє значно скоротити об'єм експериментальних досліджень і використати його в адаптивній системі

управління. Рекомендований до використання у виробництві комплекс способів алмазного шліфування з адаптивним комбінованим управлінням ріжучим рельєфом круга і пристрої для його реалізації, що дозволяють у 1,5-2 рази підвищити ефективність обробки НТМ (А.с. 1085146, 1519017). Запропоновано склад матеріалу абразивного круга з металевої зв'язкою, що має максимально можливий модуль пружності (наприклад, твердосплавні) для розроблених способів алмазного шліфування НТМ із комбінованим управлінням макро- і мікрорельєфом робочої поверхні круга (А.с. 1148761).

Результати роботи впроваджені у виробництво з загальним економічним ефектом 385 тис. гривень (ДП ХМЗ "ФЕД", м. Харків; ЗАТ ХІЗ, м. Харків; МНТК "Практика", м. Харків).

Ряд наукових розробок впроваджено в навчальний процес Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Особистий внесок здобувача. Теоретичні й експериментальні дослідження, розробка алгоритмів і програмного забезпечення, модельні іспити виконані автором самостійно. Постановка задач і аналіз результатів досліджень робилися разом із науковим консультантом. Роботи з підготування авторських посвідчень і деяких статей виконані за участю співавторів. Розробка технічної документації, модернізація устаткування і проведення виробничих іспитів виконані разом із співробітниками кафедри "Різання матеріалів та різальні інструменти" НТУ "ХПІ". Визначальні наукові і практичні результати роботи отримані автором самостійно.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на 15 міжнародних конференціях і семінарах: "International Computer Science Conference" (microCAD).- Miskolc.-1996-2002; "Proceeding of the fourth international symposium on measurement technology and intelligent instruments" (ISMТІІ '98) - Miskolc: University of Miskolc. - 1998; "Високі технології в машинобудуванні". - Харків: ХПІ. - 1992-2002; "Проблеми різання матеріалів у сучасних технологічних процесах", Харків: ХПІ. - 1991; "Proceeding of the tenth international conference on tools" (ICT-2000). -Miskolc-2000; IV Міжнар. конгр. "Конструкторсько-технологічна інформатика-2000" Станкін - Москва - 2000; "Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, навколишнє середовище" - Харків: НТУ "ХПІ". -2001; II Міжнар. конф.: "Прогресивна техніка і технологія", Київ-Севастополь, 2001; "Надтверді інструментальні матеріали на рубежі тисячоліть: одержання, властивості, застосування" (СТІМ-2001), Київ, 2001. У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на наукових семінарах кафедри "Різання матеріалів та різальні інструменти" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"; Запорізького національного технічного університету, а також на спеціальному засіданні міжнародного науково-технічного семінару "Високі технології в машинобудуванні", Алушта, 2000.

Публікації. За результатами роботи опубліковано 62 роботи, із них 11 без співавторів, 15 у закордонних виданнях, 18 - матеріали міжнародних конференцій і семінарів, 6 авторських посвідчень на винаходи.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 7 розділів, висновків та 4 додатків. Повний обсяг дисертації складає 469 сторінок, з них 1 ілюстрація по тексту, 76 ілюстрацій на 70 сторінках, 5 таблиць по тексту, 20 таблиць на 10 сторінках, 4 додатка на 72 сторінках, 245 використаних літературних джерел на 20 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтована актуальність розглянутої проблеми, сформульована мета дисертаційної роботи, визначені її наукова новизна і практична цінність.

Розділ 1. В розділі проведено аналіз стану питання, визначені тенденції рішення проблеми управління процесами контактної взаємодії в умовах, коли відсутнє необхідне за теорією різання перевищення твердості матеріалу інструмента над твердістю оброблюваного матеріалу.

Великий внесок у дослідження процесів контактної взаємодії, тертя і зношування при абразивній обробці, розглянутих у роботі, внесли вчені А.А.Аваков, М.К.Беззубенко, Г.В.Бочувава, Л.Ф.Верещагін, Ю.М.Внуков, А.І.Грабченко, Г.І.Грановський, О.Н.Григор'єв, Є.И.Гриценко, Н.Б.Дьомкін, С.Н.Дуб, В.В.Запорожець, І.П.Захаренко, Ю.Г.Кабалдін, Я.А.Калашніков, В.В.Коломієць, Ю.С.Коняєв, Б.І.Костецький, Г.І.Костюк, І.В.Крагельський, В.І.Лавриненко, Т.М.Лоладзе, А.Мамаліс, П.Г.Матюха, Е.Н.Маслов, Л.Л.Мішнаєвський, Ю.О.Муковоз, М.В.Новіков, А.Н.Резніков, О.О.Розенберг, М.Ф.Семко, М.М.Тененбаум, М.Д.Узунян, Ю.Д.Філатов, А.О.Шепелєв, М.М.Хрущов, О.В.Якимов, Ф.Я.Якубов, П.І.Ящерицин та інші.

Висунуте Б.І.Костецьким положення про роль структурно-енергетичної пристосовуваності матеріалів при терті і необхідність її інверсії в процесах фінішної алмазної обробки розвинуте і успішно використано А.І.Грабченко при розробці теорії і практики стабілізації процесу шліфування регулюванням інтенсивності видалення зв'язки круга. Однак, проблема підвищення ефективності алмазного шліфування НТМ у такий спосіб повністю вирішена не була, діапазон можливостей управління процесом пристосовуваності широкий і багатofакторний, а тому вимагає глибоких теоретичних і експериментальних досліджень.

Проведений аналіз стану питання дозволив зробити висновок про те, що в літературі відсутня узагальнена модель процесу шліфування для умов, коли взаємодіючі матеріали до того ж мають граничну в природі твердість, що властиво алмазним структурам, де практично не спостерігається або мізерно мале заглиблення абразивних зерен в оброблюваний матеріал, що унеможливує використання поняття товщини зрізу.

Це дає підставу для того, що при вивченні умов контактування робочої поверхні круга з НТМ можуть бути використані закономірності, які установлені для процесів тертя і зносу. Відомі запропоновані Н.Б.Дьомкіним, І.В.Крагельським та І.Х.Чеповецьким розрахункові залежності для визначення фактичної площі контакту шорстких поверхонь потребують удосконалення з урахуванням істотного розходження в параметрах поверхонь, що контактують, і пружного та демпфуючого впливу металевої зв'язки.

Попередні теоретичні дослідження в основному вирішували проблему опору руйнуванню НТМ, а не інтенсифікації керованого мікроруйнування припуску при їх обробці. Більш глибокого вивчення вимагають розкриття й опис причин і механізму об'ємного руйнування поверхні НТМ при шліфуванні, бо вихід придатного лезового інструмента із НТМ при заточці досягає тільки 70-80%. У даний час є наукові і методичні передумови і назріла практична необхідність у створенні експертної системи процесу алмазного шліфування, яка б базувалась на комп'ютерному 3D моделюванні напружено-деформованого стану зони обробки, що дозволило б істотно скоротити обсяг і трудомісткість дорогих експериментальних досліджень для прогнозування і визначення оптимальних умов обробки різних марок НТМ, у тому числі і наново створюваних. Проведений аналіз дозволив визначити основні задачі наукового дослідження.

Розділ 2. У розділі запропонована комплексна методологія дослідження 3D системи

"НТМ-зерно-зв'язка", що включає 3D моделювання та експериментальне вивчення 3D параметрів взаємодіючих поверхонь, вивчення 3D напружено-деформованого стану зони шліфування і методики дослідження процесу пристосовуваності при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів. Комплексний підхід до вивчення пристосовуваності - експериментальне (лазерне комп'ютерне сканування рельєфу круга і НТМ) і теоретичне (3D моделювання напружено-деформованого стану системи "НТМ-зерно-зв'язка") - істотно наближує результати досліджень до дійсності. З урахуванням особливостей досліджуваного процесу розроблено і використано ряд оригінальних методик досліджень, що забезпечують багатосторонність підходу до вивчення. Запропоновано методику, засновану на процесі електризації пари тертя "алмаз-алмаз", що дозволяє судити про ступінь утворення на зернах площадок зносу, тобто оцінювати рівень топографічної пристосовуваності. Розроблено оригінальну методику теоретичного й експериментального визначення динамічної міцності алмазних зерен безпосередньо в алмазному крузі, засновану на впливі на них алмазними інденторами (зернами) у режимі ультразвукових коливань. Це дозволяє прогнозувати ефективність використання алмазних зерен при шліфуванні різних марок НТМ, оцінити роль модуля пружності металеві зв'язки. Методика рекомендована для атестації алмазних кругів при їх виготовленні. При 3D моделюванні напружено-деформованого стану системи "НТМ-зерно-зв'язка" використані сучасні пакети прикладних програм для методу кінцевих елементів типу "Cosmos", що дозволило в максимально наближених до реальних умов оцінювати взаємовплив фізико-механічних властивостей алмазних зерен, НТМ і зв'язки на рівень головних і приведених напруг (силових, температурних і термосилових), енергії і щільності енергії деформації, частоти власних коливань алмазних зерен. Методика дозволяє оцінювати характеристики всіх елементів системи одночасно, що важливо при визначенні області оптимальних сполучень їхніх фізико-механічних властивостей і режимів взаємодії. Тривимірний підхід істотно підвищує достовірність результатів у порівнянні з відомими рішеннями плоскої задачі. Розроблена комплексна методика визначення питомого зносу і коефіцієнта використання потенційних властивостей алмазних зерен, заснована на експериментальному вимірі їхньої робочої висоти (А.с. №1404892) і теоретичному визначенні об'ємів зруйнованих зерен і НТМ, дозволяє оцінювати ефективність алмазного шліфування НТМ, підбирати оптимальні пари "марка НТМ-марка алмазного зерна" і істотно скоротити обсяг експериментальних досліджень. Запропонована і реалізована методика лазерного сканування і комп'ютерної обробки топографії робочої поверхні круга і поверхні обробленого НТМ дозволяє досліджувати зміни 3D параметрів субмікрорельєфу окремих алмазних зерен круга, агрегатів НТМ, у комп'ютерному режимі визначати фактичну площу контакту, оцінювати відносну опорну площу поверхні. Приклади лазерного сканування поверхні круга і НТМ подані на рис.1.

а)

б)

Рис.1. Топографія обробленої поверхні НТМ (а) і робочої поверхні круга (б). Відносна опорна площа робочої поверхні круга (в).

в)

Запропонований і реалізований кольоровометричний метод обробки фотографій робочої поверхні круга й обробленої поверхні НТМ, отриманих у поляризованому світлі, що дозволяє в комп'ютерному режимі визначати: відносну площу площадок зносу на алмазних зернах, зони крихкого і пластичного руйнування НТМ, відносну площу і довжину дефектів і мікропорожнин на обробленій поверхні НТМ. Розроблено методику, алгоритми і програмне забезпечення для її реалізації у виді готового програмного продукту.

Розділ 3. У розділі проведено аналіз процесу традиційного алмазного шліфування з метою порівняння пристосовуваності двох надтвердих, але істотно різних по топографії поверхонь: дискретної робочої поверхні круга і квазібезперервної оброблюваної поверхні надтвердого матеріалу. Розкрито закономірності, що не мають місця при алмазному шліфуванні матеріалів звичайної твердості. Обґрунтовано, що ефективність будь-якого процесу алмазного шліфування визначається рівнем пристосовуваності взаємодіючих поверхонь і можливостями зміни цього рівня за рахунок вибору умов шліфування (режими обробки, введення в зону шліфування додаткової енергії і т. д.). Визначено основні складові процесу пристосовуваності: топографічна, структурно-фазова й енергетична в трьох різних її етапах - високо інтенсивному (I), перехідному (II), сталому (III) (рис.2).

Топографічна пристосовуваність характеризується змінами геометричних параметрів топографії робочої поверхні круга та оброблюваного НТМ.

Структурно-фазова пристосовуваність включає аспекти, пов'язані зі зміною структурно-фазового складу і фізико-механічних властивостей поверхневих шарів взаємодіючих елементів системи. Вивчено такі елементи структурно-фазової пристосовуваності, як зміна співвідношення в контакті "твердих" і "м'яких" граней кристалітів НТМ і алмазних зерен, що обумовлені анізотропією властивостей, їхня графітизація й окислювання, міграція металофази до зони контакту.

Рис.2. Складові процесу пристосовуваності

Енергетична пристосовуваність включає енергетичні аспекти еволюції невизначених властивостей системи з погляду мінімізації енергетичних витрат: сили різання, потужності, питомої енергоємності і коефіцієнту шліфування. У процесі енергетичної пристосовуваності відбувається перерозподіл поданої у зону шліфування енергії між елементами системи "НТМ-зерно-зв'язка" Управління процесом пристосовуваності повинно базуватися на керуванні цим розподілом енергії.

Виділено два принципово різних типи взаємодії робочої поверхні круга з оброблюваним НТМ - за участю і без участі зв'язки. Традиційні процеси абразивної обробки реалізуються по першій схемі, а запропоновані нами - по другій, або частково по першій.

Цим двом типам взаємодії елементів відповідають принципово різні аспекти процесу пристосовуваності. При відсутності контакту зв'язки це переважно процеси крихкого мікроруйнування алмазних зерен і припуску оброблюваного НТМ, а при наявності контакту - це переважно термоактивовані процеси. У першому випадку забезпечується висока продуктивність процесу, однак він супроводжується великою питомою витратою алмазних зерен і гіршою шорсткістю обробленої поверхні. Другий випадок характеризується високою розмірною стійкістю круга і кращою шорсткістю поверхні, що робить його потенційно придатним для прецизійних і ультрапрецизійних процесів шліфування. Розроблена систематика найбільше представницьких складових процесу пристосовуваності при алмазному шліфуванні НТМ (рис.3).

Доведено, що при традиційному алмазному шліфуванні НТМ кругами на металевих

зв'язках рівень топографічної пристосовуваності визначається не власне висотою виступання зерен із зв'язки, як вважалося раніше, а відносною величиною фактичної площі контакту. Досліджено вплив анізотропії фізико-механічних властивостей НТМ і алмазних зерен на процес пристосовуваності, обґрунтована необхідність врахування анізотропії властивостей цих матеріалів при визначенні умов їхньої обробки. Висунуто гіпотезу про можливість управління процесом пристосовуваності для ефективного використання переваг кожного його періоду й усього діапазону. Вивчена динаміка зміни вихідних показників і їхній зв'язок із комплексом з основних дев'ятох обраних параметрів пристосовуваності. Методом кореляційного аналізу доведено, що визначальний вплив має відносний розмір фактичної площі контакту, що у свою чергу залежить від робочої висоти зерен, ступеня алмазоутримання і пружного заглиблення зерен у зв'язку. Встановлено, що причиною відбракування через появу сітки мікротріщин на поверхні НТМ є масове утворення площадок зносу на алмазних зернах і надмірно велика їхня кількість у контакті зі НТМ. Методом 3D моделювання напружено-деформованого стану системи "кристаліти НТМ–металофаза–зерно-зв'язка" проведено аналіз поведінки системи як єдиного цілого в залежності від силового і температурного навантаження, наявності або відсутності змащувально-охолоджуючих середовищ (рис.4).

а)

б)

Рис.4. Розрахункова схема моделі (а) і поля щільності енергії деформації в елементах системи (б)

Така модель дозволяє визначати умови виникнення невиправних дефектів у НТМ через істотне розходження в коефіцієнтах термічного розширення алмазних кристалітів і металофази при силовому і температурному навантаженні системи. Розглянуто можливість трансформації процесу високопродуктивного шліфування в прецизійний.

Управляти розміром фактичної площі контакту можна двома шляхами: за рахунок вибору умов навантаження системи (режими шліфування) і додаткового примусового керованого впливу на зв'язку круга, але цей підхід обмежений і практично вичерпав свої

можливості. Більш широкі можливості має спосіб, реалізований у даній роботі. На підставі аналізу причин періодичності процесу шліфування НТМ і шляхів її усунення висунута гіпотеза про можливість і ефективність управління процесом пристосовуваності шляхом примусового формування на площадках зносу алмазних зерен розвинутого субмікрорельєфа.

Розділ 4. Розділ присвячений теоретичним і експериментальним дослідженням процесів мікроруйнування елементів системи "НТМ-зерно-зв'язка" при алмазному шліфуванні. Теоретичний аналіз проведено шляхом 3D моделювання напружено-деформованого стану системи методом кінцевих елементів. Розрахунок 3D напружено-деформованого стану елементів єдиної системи "НТМ-зерно-зв'язка" дозволив у комп'ютерному режимі кількісно визначити напруги і пружні переміщення в елементах, що контактують, у залежності від їхніх фізико-механічних властивостей і умов взаємодії. Визначені об'єм матеріалу зерен і НТМ із закритичними значеннями приведених напруг або енергії деформації, критичний розмір закріплення й величина пружної деформації (вдавлювання) алмазних зерен у зв'язку. Розрахункові схеми різних варіантів взаємодії елементів 3D моделі і результати розрахунку напружено-деформованого стану елементів системи приведені на рис.5. Теоретичні розрахунки в пакеті прикладних програм дозволили визначити об'єми зруйнованих НТМ і алмазних зерен у різних умовах функціонування системи "НТМ-зерно-связка". У табл.1 приведені результати, що дозволяють визначити розмір питомого зносу як

відношення об'єму зруйнованих зерен (V_3) до об'єму знятого НТМ.

Таблиця 1

Результати розрахунків об'ємів зруйнованих НТМ і алмазних зерен

Зруйновані об'єми, мм ³	Модуль пружності зв'язки E, ГПа			
	50	100	150	200
V_3	0,248	0,365	0,483	0,564
$V_{НТМ}$	0,117	0,183	0,274	0,383
Кут при вершині зерна ?				
	30°	60°	90°	120°
V_3	0,317	0,265	0,113	0,09
$V_{НТМ}$	0,256	0,183	0,11	0,07

Примітка. Загальні умови: оброблюваний матеріал - АСПК; марка зерна - АС6; концентрація зерен - 100% (4); відносний розмір критичного закріплення зерен $e_{кр} = 0,5$; нормальний тиск $P_H = 2,0$ МПа; $V_{кр} = 30$ м/с.

Доведено, що утворення площадок зносу на зернах на декілька порядків зменшує напруги й енергію деформації в контактi, що і призводить до утворення зносостійкої пари тертя "алмаз-алмаз". Визначено умови, що забезпечують раціональний розподіл енергії, яка подається в зону шліфування, між елементами системи:

$$E = E_{НТМ} + E_{зв} + E_3, \quad (1)$$

де E – енергія, що подається в зону шліфування; $E_{НТМ}$ - енергія поглинання НТМ; $E_{зв}$ - енергія поглинання зв'язкою; E_3 - енергія оглинання зерном.

Керуючи розміром відносної фактичної площі й умовами навантаження системи "НТМ-зерно-зв'язка" (швидкість, подача, нормальний тиск, введення в зону керування енергії ультразвукових коливань), можна змінювати розподіл поданої енергії між елементами системи. Методика 3D моделювання системи "НТМ-зерно-зв'язка" дозволяє визначати енергію і щільність енергії деформації в кожному елементі системи при різних умовах навантаження і параметрах взаємодії і визначати загальні умови, при яких максимальна частина енергії, що підводиться до зони шліфування, буде спрямована на мікроруйнування НТМ, руйнування алмазного зерна буде мінімальним і крім того буде упереджуватись випадання його із зв'язки. Теоретичними розрахунками визначені оптимальні зони мікроруйнування системи "НТМ-зерно-зв'язка" (рис.6). Аналітичний опис процесу руйнування алмазних зерен і НТМ дозволив без трудомістких експериментів визначити область оптимальних умов шліфування при обробці різних НТМ, у тому числі наново створюваних. Отримано вихідні дані для розробки теоретичного модуля експертної системи процесу алмазного шліфування НТМ.

Розрахунки показали, що в умовах, коли контактують рівнотверді абразивний і оброблюваний матеріали, істотно посилюється роль модуля пружності металевої зв'язки як фактора ефективності мікроруйнування НТМ за рахунок збільшення сили співудару в контактi "зерно-НТМ" (у зоні шліфування) і в контактi "зерно круга-зерно ударника" (у зоні управління). Навіть незначне його збільшення забезпечує істотне зростання рівня напруг у контактi "зерно-НТМ" і, як наслідок, підвищення ефективності його руйнування.

Позитивний вплив збільшення модуля пружності металевої зв'язки на ефективність взаємного мікроруйнування елементів системи "НТМ-зерно-зв'язка" ілюструється рис

7.

В результаті розрахунків напружено-деформованого стану 3D моделі системи встановлено, що для підвищення точності теоретичних розрахунків процесів руйнування елементів системи "НТМ-зерно" слід використовувати не усереднені фізико-механічні характеристики, а критичні, тобто найбільш "несприятливі" їхні значення. Розрахунок 3D напружено-деформованого стану системи "НТМ-зерно-зв'язка" дозволив визначити розмір

пружного деформування зерен у зв'язку Δ і критичний розмір їхнього закріплення в залежності від фізико-механічних властивостей і товщини алмазоносного шару. Величина Δ враховується при розрахунку фактичної площі контакту НТМ - зерно.

Рис.7. Вплив модуля пружності зв'язки на ефективність процесу шліфування
Схема процесу шліфування НТМ (периферією чи торцем круга) визначає не параметри зрізу, як це загальноприйнято в кінематичних розрахункових схемах, а характер і силу ударної взаємодії і, отже, механізм взаємного мікроруйнування елементів системи "НТМ-зерно-зв'язка".

Для виявлення позитивних ефектів від введеної у зону шліфування енергії ультразвукових коливань проведені теоретичні й експериментальні дослідження втомлено-циклічного мікроруйнування НТМ і зерен. Показано, що застосування поперечних коливань не тільки сприяє інтенсифікації мікроруйнування припуску, але і сприятливо впливає на процес самозаточування зерен. Для експериментального підтвердження теоретичних розрахунків досліджувався процес мікрорізання поодиноким алмазним зерном в ультразвуковому режимі з поперечними коливаннями. Встановлено число циклів до руйнування НТМ на зернах різних марок. Отримані експериментальні результати підтверджують достовірність теоретичних розрахунків і можуть бути використані при визначенні оптимального складу пар "марка НТМ-марка алмазного зерна" і оптимальних умов обробки різних марок НТМ.

Розділ 5. У розділі проведено комплексний теоретико-експериментальний аналіз топографічної пристосовуваності робочої поверхні круга й оброблюваної поверхні, заснований на теоретичному описі параметрів топографії робочої поверхні круга і їхньої зміни в процесі його зносу та експериментальній перевірці лазерним топографуванням поверхні.

Встановлено, що анізотропія фізико-механічних властивостей алмазних зерен впливає на інтенсивність їхнього зносу і зміну параметрів РПК у процесі пристосовуваності. Розглянуто питання теоретичного обґрунтування можливості управління розміром фактичної площі контакту. Отримано теоретичні залежності, що описують взаємозв'язок і зміну топографічних параметрів пристосовуваності.

Установивши в розділі 3, що визначальний вплив на інтенсивність і характер взаємного мікроруйнування елементів системи "НТМ-зерно-зв'язка" має відносний розмір фактичної площі контакту, провели теоретичний аналіз її зміни по мірі зносу круга. Розрахункова схема 3D моделі "зерно-зв'язка" подана на рис.8. Отримано теоретичні залежності для розрахунку та реагування на міру зносу круга зміни таких параметрів, як число зерен (n) і відносна опорна площа поверхні (tp_s) в залежності від зернистості круга, концентрації, властивостей зв'язки, ступеня зносу круга, робочої висоти зерен і критичного розміру їхнього закріплення в зв'язці:

може змінюватися на декілька порядків, відповідно буде змінюватися і питомий тиск у контакті алмазних зерен із НТМ і, отже, характер і інтенсивність їхнього взаємного руйнування.

Теоретично обґрунтовано й експериментально доведено положення про те, що концентрація алмазів у крузі, робоча висота зерен і критична глибина їхнього закріплення в зв'язці є взаємозалежними найважливішими чинниками процесу алмазного шліфування НТМ. Зменшення концентрації алмазів у крузі до рівня 5-20% із відповідним зменшенням робочої висоти зерен до рівня мікронерівностей зв'язки і збільшенням модуля її пружності не приводить до погіршення вихідних показників алмазного шліфування НТМ, тому що розмір фактичної площі контакту РПК із НТМ залишається незмінним, але істотно знижується питома витрата і собівартість обробки, підвищується ступінь використання алмазних зерен. Ця інформація використана в теоретичному модулі експертної системи (розділ 7).

Розділ 6. У розділі розроблена методологія керованого процесу шліфування і на її основі розроблені способи обробки з комбінованим управлінням пристосовуваністю. Головною причиною топографічної пристосовуваності при алмазному шліфуванні НТМ є масове утворення на зернах площадок зносу, тому підвищення ефективності процесу можливо шляхом примусового формування на них ріжучого субмікрорельєфу. Сформувати його можна або в зоні ультразвукового шліфування в процесі взаємодії алмазних зерен з оброблюваним НТМ і/або в автономній зоні управління за допомогою впливу на площадки зносу надтвердим інструментом-ударником в режимі ультразвукових коливань. Ефективним виявився спосіб ультразвукового шліфування не з подовжніми коливаннями, як це традиційно прийнято для поліпшення якості обробки, а з поперечними, що створюють додаткові ударні навантаження в контакті "зерно-НТМ", а це з одного боку інтенсифікує процес знімання припуску, а з іншого - забезпечує процес формування на площадках зносу зерен ріжучого субмікрорельєфу. Комбіноване управління пристосовуваністю засновано на дозуванні видалення зв'язки електроерозійним або електрохімічним способом і примусовим формуванням на зернах субмікрорельєфу. Схема реалізації способів ультразвукового алмазного шліфування з комбінованим управлінням подана на рис.10.

Основною перевагою розроблених способів шліфування є підвищення коефіцієнта використання коштовних алмазних зерен за рахунок вибору круга з мінімальною концентрацією, забезпечення оптимальної робочої висоти виступання зерен із зв'язки, примусового вдавлення їх у зв'язку, формування на них ріжучого субмікрорельєфу в зоні управління і використання максимально міцних металевих зв'язок.

Розроблений і реалізований алгоритм визначення умов бездефектного як продуктивного так і прецизійного шліфування, заснований на виборі оптимального навантаження на поодинокі алмазні зерна шляхом комплексного управління субмікрорельєфом на площадках зносу алмазних зерен. Запропонована теоретико-експериментальна модель примусового формування субмікрорельєфу на зернах алмазного круга, що ввійшла в якості підсистеми управління в розроблену експертну систему процесу шліфування.

Робоча поверхня інструмента-ударника являє собою шар з НТМ товщиною 2-3 мм із дрібними і міцними алмазними зернами на металевій зв'язці. Зернистість ударника повинна бути в 2-3 рази менше за зернистість круга, марка зерна максимально міцна (наприклад, АС160Т, КІС ? 10 МПа/м^{1/2}). Викривлення поверхні ударника із-за зношення усувається періодичною правкою безпосередньо в процесі шліфування

шляхом умикання зворотної полярності в зоні управління. Розроблені способи дозволяють у 1.4-2.0 рази підвищити продуктивність (за рахунок усунення періодичності процесу), поліпшити якість обробки і скоротити вибраковування при заточуванні інструмента із НТМ (шляхом трансформації процесу з продуктивного в прецизійний), знизити собівартість обробки за рахунок застосування кругів зниженої концентрації і підвищення коефіцієнта використання потенційних ріжучих властивостей алмазних зерен. (А.с. №1085146, №1519017).

Рис.10. Схема управління процесом пристосовуваності

Для регулювання інтенсивності керуючого впливу на пристосовуваність взаємодіючих елементів "НТМ-зерно-зв'язка" запропонована адаптивна система управління, в якій у якості керуючого сигналу використовується розмір струму електризації при терті площадок зносу алмазних зерен круга з оброблюваним НТМ. Для реалізації комбінованого управління субмікрорельєфом алмазних зерен при шліфуванні розроблені спеціальні катодні пристрої й інструменти-ударники (А.с.№1103975, №1009685, №1103976).

Для керованого процесу шліфування розроблено матеріал абразивного круга, що містить оптимальну концентрацію алмазних зерен у металевій зв'язці на основі заліза (А.с. №1148761). Застосування залізвмісних металевих зв'язок у керованому процесі шліфування НТМ забезпечує сумарний позитивний ефект за рахунок підвищення коефіцієнта використання зерен на 30-50% і інтенсифікації термоактивного доведення ріжучих елементів лезового інструмента з НТМ за рахунок хімічної спорідненості заліза і алмазу.

Розділ 7. Розділ присвячений розробці експертної системи процесу алмазного шліфування НТМ. Експертна система складається з двох взаємозалежних модулів – теоретичного і експериментального. Теоретичний і експериментальний модулі експертної системи вирішують як самостійні задачі, так і доповнюють один одного. База даних експертної системи містить інформацію щодо характеристик алмазних кругів, фізико-механічних властивостей різних марок алмазних зерен і оброблюваних НТМ. Структурно-логічна схема алгоритму функціонування експертної системи подана на рис.11.

У теоретичному модулі розрахунок об'ємів зруйнованих НТМ і алмазних зерен ведеться так: якщо навантаження в контакт "зерно-НТМ" достатні для їхнього мікроруйнування при одноактній взаємодії, розрахунок ведеться за методом кінцевих елементів; якщо навантаження не достатнє - вирішується втомлено-циклічна контактна задача з використанням методики розрахунку, запропонованої М.В.Новіковим. За числом циклів навантаження і за розміром критичної тріщини руйнування розраховується продуктивність шліфування Q :

$$Q = \frac{4 \cdot K \cdot d_{KP} \cdot S_{\Phi} \cdot l_{KP} \cdot n_{KP}}{d_{НТМ} \cdot n_{\text{ц}}} ; \quad (7)$$

$$Q = \frac{\pi \cdot K \cdot d_{KP} \cdot d_{НТМ} \cdot t_{Ps} \cdot l_{KP} \cdot n_{KP}}{100 \cdot n_{\text{ц}}} ; \quad (8)$$

де d_{KP} - діаметр круга; S_{Φ} - фактична площа контакту; n_{KP} – частота обертання круга, об/хв. ; $d_{НТМ}$ - діаметр НТМ; t_{Ps} - відносна опорна площа поверхні РПК; n - число циклів навантаження до руйнування НТМ; l_{KP} - довжина тріщини руйнування; K - коефіцієнт коригування з експериментом.

Теоретичний модуль базується на 3D моделюванні напружено-деформованого стану

системи. У нього входять підсистеми визначення числа працюючих зерен і фактичної площі контакту; визначення критичного розміру закріплення алмазних зерен у зв'язці, розмірів їхнього вдавлювання в зв'язку, об'ємів зруйнованих НТМ і алмазних зерен; визначення умов бездефектної обробки; розрахунку 3D напружено-деформованого стану ріжучого клина лезового інструмента із НТМ в екстремальних умовах його експлуатації для забезпечення надійності ще на стадії його виготовлення; розрахунку процесу втомлено-циклічного руйнування НТМ і алмазних зерен (для визначення продуктивності і питомої витрати); розрахунку продуктивності термоактивованого доведення. На основі процедурної бази знань і банку даних теоретичний модуль експертної системи дозволяє прогнозувати область оптимальних умов обробки і кількісно оцінювати продуктивність шліфування, питомий знос і витрату алмазних зерен, шорсткість обробленої поверхні різних марок НТМ, у тому числі і наностворюваних. Враховуються марка зерна, зернистість, концентрація, нормальний тиск, швидкість шліфування, фактична площа контакту і відносна опорна площа профілю. Розроблений експериментальний модуль експертної системи на базі комп'ютерної обробки результатів широкої гами експериментальних досліджень дозволяє користувачеві визначати оптимальні умови процесу алмазного шліфування різних НТМ при визначених реальних можливостях виробництва. Методом регресивного аналізу визначено вагомий внесок різних вхідних параметрів процесу обробки, що дозволяє системі в окремих випадках приймати рішення і без участі кваліфікованого експерта.

Доведена і реалізована можливість суміщення продуктивного і прецизійного процесу обробки одним тим самим кругом, у тому числі і грубозернистим, за рахунок цілеспрямованої трансформації процесу від взаємного крихкого мікроруйнування елементів системи "НТМ-зв'язка" до термоактивованого (дифузія, графітизація, окислювання) зйому. З метою інтенсифікації процесу термоактивованого доведення застосована металева зв'язка на основі заліза, що забезпечує максимальну міцність утримання алмазних зерен і за рахунок високого ступеня хімічної спорідненості з алмазом - високу інтенсивність дифузійного знімання мікронерівностей з оброблюваної поверхні алмазного НТМ. Продуктивність термоактивованого доведення можна визначити як суму інтенсивностей термоокислювального і дифузійного процесів за залежностями, отриманими Г.П.Черепановим, Т.М.Лолодзе і Г.В.Бокучаю. У цих залежностях використані результати визначення розміру фактичної площі контакту, отримані у розділі 5. Розрахунки показали, що за 1-2 хвилини термодифузійного доведення з попередньо обробленої поверхні НТМ може бути знятий об'єм матеріалу, що знаходиться в шорсткуватому шарі. Таким чином, з'явилася можливість здійснювати продуктивну (з включеною системою управління ріжучим рельєфом круга) і прецизійну (з виключеною системою управління ріжучим рельєфом круга) операції обробки НТМ одним тим самим алмазним кругом на міцній металевій зв'язці.

Щоб чітко виявити дефекти процесу синтезу різців із НТМ, сформульоване і доведене положення про необхідність здійснення термоактивованого доведення при термосилових навантаженнях, що перевищують створювані в майбутніх найекстремальніших умовах їх експлуатації, щоб виконувати відбракування на етапі виготовлення.

Встановлено, що найбільш об'єктивним параметром оцінки якості обробленої поверхні є не традиційно застосовувані параметри шорсткості Ra і Rz, а відносна опорна площа поверхні топографії поверхні, що вимірюється методом лазерного сканування. Стійкісні іспити лезового інструмента із НТМ, виготовленого в запропонованих

умовах, підтвердили його високу надійність і ефективність.

ВИСНОВКИ

1. Пристосовуваність поверхонь, що контактують у процесі опрацювання, як об'єктивне явище цілком визначає ефективність алмазного шліфування. В результаті комплексних експериментально-теоретичних і 3D модельних досліджень розроблені наукові основи підвищення ефективності абразивно-алмазної обробки надтвердих матеріалів за рахунок управління процесом пристосовуваності шляхом спрямованого регулювання мікрорельєфу робочої поверхні кругів і через субмікрорельєф алмазних зерен.

Запропонована й обґрунтована методологія 3D моделювання напружено-деформованого стану зони шліфування як єдиної системи "НТМ-зерно-зв'язка", що включає експериментальне вивчення 3D топографії взаємодіючих поверхонь лазерним скануванням і теоретичний опис 3D топографії абразивно-алмазних кругів. На цій основі створена імітаційна 3D модель напружено-деформованого стану системи "кристаліти надтвердого матеріалу-металлофаза-зерно-зв'язка", що дозволяє аналізувати її поведінку в залежності від режимів обробки, характеристик кругів, рівня пристосовуваності системи і наявності або відсутності ЗОТС. На цій основі розроблена теоретико-експериментальна експертна система процесу шліфування, що дозволяє прогнозувати й оптимізувати процес бездефектної обробки як існуючих, так і наново створюваних надтвердих матеріалів. Розробка експертної системи виконана на рівні готового програмного продукту.

2. Теоретично обґрунтована і підтверджена модельними й експериментальними дослідженнями визначальна роль пристосовуваності (топографічна, структурно-фазова, енергетична) взаємодіючих поверхонь в ефективності процесу шліфування. Визначальним параметром, що характеризує процес пристосовуваності, є відносна фактична площа контакту, розрахунок якої робиться в два етапи. На першому етапі (макрорівень) визначається контурна площа контакту зерен з оброблюваним матеріалом і її зміна по мірі зносу круга шляхом умовної заміни дискретної поверхні квазібезперервною. На другому (мікрорівень) - визначається фактична площа контакту з урахуванням пружності металевої зв'язки за модернізованими залежностями Н.Б.Дьомкіна і І.В.Крагельського, які враховують розходження в параметрах топографії поверхонь, що контактують, (у якості характеристики жорсткості системи використовується модуль пружності металевої зв'язки).

3. Об'єднання елементів зони шліфування в єдину технічну 3D систему "НПМ-зерно-зв'язка", на відміну від диференційного підходу, дозволило установити взаємовплив їхніх фізико-механічних властивостей і геометричних параметрів на інтенсивність і характер взаємного мікроруйнування. На базі 3D моделювання напружено-деформованого стану зони шліфування запропонована науково-обґрунтована систематика механізмів руйнування її елементів з урахуванням ступеня контактування зв'язки з оброблюваним матеріалом. Систематика містить у собі типи взаємодії елементів і види їхнього руйнування. Механізми руйнування при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів визначаються анізотропією властивостей кристалітів алмазу, співвідношенням у контакті "м'яких" і "твердих" граней кристалітів і зерен. Доведено, що при розрахунках процесів руйнування анізотропних матеріалів слід використовувати не усереднені фізико-механічні характеристики, а їхні критичні значення з урахуванням специфіки конкретної задачі, що розв'язується. Підтверджений модельними й експериментальними дослідженнями

втомлено-циклічний характер взаємного мікроруйнування як оброблюваного надтвердого матеріалу, так і алмазних зерен круга. Число циклів до руйнування визначається ступенем дефектності взаємодіючих структур і значеннями коефіцієнта тріщиностійкості.

4. Розроблена методика теоретичного й експериментального визначення питомого зносу і коефіцієнта використання потенційних ріжучих властивостей алмазних зерен, заснована на використанні в якості вимірювальної бази поверхні площадок на зернах, що стабільно утворюються при шліфуванні алмазного зразка (А.с. 1404892), дозволяє визначати оптимальні пари оброблюваного й абразивного матеріалів.

5. Створена експертна система процесу шліфування дозволяє прогнозувати й оптимізувати процес бездефектної обробки як існуючих, так і наново створюваних надтвердих матеріалів. Вона складається з двох взаємозалежних модулів - теоретичного й експериментального. У експертній системі використовується програмний комплекс розрахунків методом кінцевих елементів. Теоретичний модуль експертної системи дозволяє на заданому рівні значимості визначати значення вихідних показників і кінетику їхньої зміни в процесі пристосовуваності в залежності від фізико-механічних властивостей матеріалів, що взаємодіють, і умов обробки. Експериментальний модуль дозволяє погоджувати і корегувати результати теоретичних розрахунків при визначенні оптимальних умов шліфування і управління для обробки різних марок надтвердих матеріалів. У якості критерію оптимізації може бути обрана собівартість або продуктивність обробки, витрата алмазних кругів і різні показники якості. Використання експертної системи істотно скорочує обсяг трудомістких досліджень при визначенні оптимальних умов шліфування і управління при опрацюванні різних марок надтвердих матеріалів, у тому числі наново створюваних.

6. Встановлено, що динамічна міцність алмазних зерен є найважливішим параметром, який через характер та інтенсивність їхнього мікроруйнування визначає ефективність алмазного шліфування надтвердих матеріалів. Розроблена методика теоретичного й експериментального визначення динамічної міцності алмазних зерен безпосередньо в крузі дозволяє оцінювати цей параметр в умовах, максимально наближених до реальних, і рекомендована для атестації виготовлених шліфувальних кругів.

7. Розроблений комплекс способів ультразвукового алмазного шліфування з адаптивним комбінованим управлінням параметрами робочої поверхні кругів і субмікрорельєфом алмазних зерен, заснований на дозуванні видалення зв'язки і впливі на площадки зносу алмазних зерен алмазним індентором в діапазоні ультразвукових коливань (А.с. 1085146, 1519017). Формування на площадках зносу алмазних зерен субмікрорельєфу усуває періодичність процесу і підвищує коефіцієнт використання їх потенційних ріжучих властивостей. Для реалізації комбінованого управління процесом пристосовуваності розроблені спеціальні пристрої (А.с. 1103975, 10009685).

8. Для розроблених способів шліфування сформульовані вимоги до абразивного матеріалу круга (А.с. 1148761) і металевих зв'язок на основі заліза - з максимальним алмазоутриманням і достатньою оброблюваністю при електро-фізико-хімічному розмірному формоутворенні. Застосування залізовмісних металевих зв'язок у керованому процесі шліфування надтвердих матеріалів забезпечує сумарний позитивний ефект за рахунок підвищення використання зерен на 10-30% і активізації термоактивованого доведення за рахунок спорідненості заліза і алмазу. Доведено можливість суміщення термодоводочної і контрольної операцій при виготовленні лезового інструмента шляхом здійснення термоактивованого доведення при термосилових навантаженнях, що перевищують екстремальні умови його експлуатації.

9. Підвищення ефективності алмазного шліфування при комбінованому керуванні процесом пристосовуваності покращує коефіцієнт використання потенційних ріжучих властивостей алмазних зерен на 10-30%, знижує собівартість обробки і брак від дефектів на 5-20% за рахунок цілеспрямованої трансформації процесу і суміщення операцій продуктивного і/або прецизійного шліфування. Впровадження результатів роботи у виробництві дозволило одержати річний економічний ефект 385 тис. грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових виданнях

1. Грабченко А.И., Федорович В.А., Образков Б.В. Роль концентрации алмазов в круге при шлифовании поликристаллов сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. - 1984. - Вып.1. - С.49-52.
2. Грабченко А.И., Федорович В.А., Наконечный Н.Ф., Грибовски Л., Веконь Ш. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов и управление рельефом круга // *Nehezpari muszaki egyetem gepgyartastechnologiai tanszek.* –Miskolc, - 1986. - С.102-111
3. Грабченко А.И., Федорович В.А., Пыжов И.Н. Обеспечение равновесного зазора при автономном управлении режущим рельефом алмазного круга // Тематический сб. науч. тр. "Прогрессивные технологические процессы, оборудование и инструмент". – Харьков: ХАИ, 1987.- С.59-64.
4. Федорович В.А., Образков Б.В. Способ измерения высоты выступления зерен над уровнем связки // Резание и инструмент. – 1990. - Вып.43. - С.48-50.
5. Федорович В.А., Доброскок В.Л., Наконечный Н.Ф. Оценка потенциальной режущей способности алмазных кругов // Резание и инструмент. - 1993. - Вып.47. - С.77-78.
6. Грабченко А.И., Федорович В.А., Алексеев К.М. Физическое и математическое моделирование обрабатываемости СТМ // Резание и инструмент. – 1994. - Вып.49. - С.18-22.
7. Федорович В.А., Русанов В.В., Титаренко В.Ф. Взаимное разрушение элементов системы "зерно–связка-СТМ" при алмазном шлифовании // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков. – 1996.- Вып.50.- С.187-190.
8. Федорович В.А., Гринько С.А. Аналитический анализ прочности закрепления алмазного зерна в металлической связке // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков. – 1997. - Вып.51. - С. 234-236.
9. Федорович В.А., Гринько С.А. Алгоритм модели взаимодействия элементов системы "СТПМ - зерно" при шлифовании // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков. – 1999. - Вып.53. - С.167-170.
10. Федорович В.А. Удельный расход и удельный износ алмазных зерен при шлифовании СТПМ // Резание и инструмент в технологических системах.-Харьков.-1999. - Вып.54. - С.230-233.
11. Федорович В.А., Мамалис А. Моделирование управляемого процесса шлифования сверхтвердых материалов // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков. – 1999. - Вып.55. - С.214-219.
12. Федорович В.А. Методология изучения процесса разрушения алмазных зерен при шлифовании СТПМ // Високі технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. - Харків: ХДПУ, - 1999. - С.277-280.
13. Федорович В.А. Способы шлифования с комбинированным управлением режущим рельефом кругов // Вестник ХГПУ. - Харьков. - 1999.-Вып.45 .- С.26-28.
14. Федорович В.А., Гринько С.А. Динамика изменения параметров рабочей

- поверхности кругов при шлифовании СТПМ // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков. – 2000.- Вып. 56. - С.154-163.
15. Федорович В.А., Хавин Г.Л. Моделирование процессов ультразвуковой правки алмазных кругов // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков. – 2000. - Вып. 57. - С.235-244.
16. Федорович В.А, Гринько С.А. Пути повышения эффективности алмазного шлифования СТПМ // Вестник ХГПУ. – Харьков. - 2000. - Вып. 100. - С. 188-192.
17. Федорович В.А. Методика определения динамической прочности алмазных зерен в круге. Научно-технический журнал // Механіка та машинобудування. – Харьков: ХДПУ. – 2000. - С.251 – 256.
18. Федорович В.А., Гринько С.А., Шмитт М. Определение фактической площади контакта РПК с обрабатываемым СТПК // Высокие технологии в машиностроении. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - С. 266-272.
19. Федорович В.А. Методология изучения процесса приспособляемости при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков. - 2000. - Вып. 58. - С. 106-116.
20. Федорович В.А. 3D моделирование напряженно-деформированного состояния системы "СТПМ–зерно–связка" при алмазном шлифовании. // Резание и инструмент в технологических системах. - Харьков. - 2000. - Вып. 59. - С. 184-190.
21. Федорович В.А. Анализ параметров рабочей поверхности алмазного круга при шлифовании СТПМ // Теоретичний і науково-практичний журнал інженерної академії України: Спец. вип.- Харьков. - 2000. – С.281- 286.
22. Grabchenco A.I., Fedorovich V.A., Horvath M., Mamalis A., Grinco S.A., Paulmier D. Development of the expert system of superhard polycrystalline material diamond grinding process under direction of grinding wheel relief // The international Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer-Verlag London Limited. – 2001. – P. 498 - 507.
23. Федорович В.А. Влияние анизотропии свойств кристаллитов на процесс взаимного разрушения элементов системы "СТПМ – зерно-связка" при шлифовании // Вісник інженерної академії України. – Харків. – 2001. - С.480 - 484.
24. Федорович В.А. Роль частоты собственных колебаний алмазных зерен при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов // Вестник НТУ "ХПИ". - Харьков. - 2001. - Вып. 6.- С. 275 - 278.
25. Федорович В.А., Кавалец М. Исследование качества поверхностного слоя поликристаллических сверхтвердых материалов при шлифовании // Вестник национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт". - К. - 2001.- Вып. 40. - С. 328 - 336.
26. Федорович В.А. Управление параметрами субмикрорельефа алмазных зерен при шлифовании сверхтвердых материалов // Высокие технологии в машиностроении: Сб. науч. трудов ХГПУ. - Харьков. - 2001. - С. 50 - 54.
27. Федорович В.А., Русанов В.В., Федорович Н.В., Янковяк М. Экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков. - 2001. - Вып. 7. - С. 255 - 260.
28. Федорович В.А. Шлифование поликристаллических сверхтвердых материалов с учетом анизотропии кристаллитов материалов // Вестник НТУ "ХПИ". - Харьков. - 2001. - Вып. 11.- С. 98 - 106.
29. Федорович В.А. Анализ эффективности использования алмазных зерен при шлифовании сверхтвердых материалов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков.- Вып. 60. - 2001.- С. 235 - 243.
30. Федорович В.А. Теоретическая экспертная система процесса алмазного

шлифования сверхтвердых материалов // Сучасне машинобудування. Київ, 2000. - № 3-4. - С. 100-105.

31. Грабченко А.И. Федорович В.А. Влияние анизотропии свойств кристаллитов на процесс взаимного разрушения элементов системы СТПМ-зерно при шлифовании // Сверхтвердые материалы. – Киев. - 2002. - № 2. - С. 64-70.

32. Грабченко А.И. Федорович В.А. Экспертная система процесса алмазного шлифования сверхтвердых материалов // Сб. науч. тр. Института сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Серия Г: Процессы механической обработки, станки и инструменты. - Киев, 2002. - С. 481-489.

Авторські посвідчення на винаходи

33. Способ шлифования: А.с. 1085146 / Грабченко А.И., Федорович В.А., Пыжов И.Н., Русанов В.В. № 3476234; Заявлено 06.08.82; Оpubл. 08.12.83, Бюл. № 00 - 2 с.

34. Устройство для электроабразивной обработки с одновременной правкой круга: А.с. 1103975. / Грабченко А.И., Федорович В.А., Пыжов И.Н., Наконечный Н.Ф. - №.3341171/25 - 08; Заявлено 24.09.81; Оpubл. 23.07.84, Бюл. №27.-3 с. ил.

35. Устройство для непрерывной электрохимической правки торцовых абразивных кругов; А.с. 1103976. / Грабченко А.И., Федорович В.А., Пыжов И.Н., Наконечный Н.Ф., Русанов В.В. - № 3493976 /25 – 08; Заявлено 27.09.82; Оpubл. 22.03.84, Бюл. №27.- 4 с. ил.

36. Материал абразивного круга: А.с. №1148761 / Грабченко А.И., Федорович В.А., Пыжов И.Н., Наконечный Н.Ф. - №3483077/25-08; Заявлено 06.08.82; Оpubл. 08.12.84, Бюл. №13.-3 с.

37. Способ определения наибольшей высоты выступания зерен алмазных кругов: А.с. 1404892. / Грабченко А.И., Федорович В.А., Пыжов И.Н., Литвинов Е.В. - № 3882430/25-28; Заявлено 09.04.85; Оpubл. 23.06.88, Бюл. №23. - 4 с. ил.

38. Способ шлифования кругами на металлической связке; А.с. 1519017. / Грабченко А.И., Федорович В.О., Пыжов И.М., Наконечный М.Ф. - № 4278351; Заявлено 09.07.87; Оpubл. 01.07.89.

Праці конференцій

39. Федорович В.А., Гринько С.А. Экспериментально – аналитический анализ управляемого процесса шлифования СТМ // Пр. VII Міжнар. научн.-техн. семинару: "Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг". - Харьков: ХПИ. -1997. - С. 252-255.

40. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., Nakonechniy N.F. Fedorovich V.A., New possibilities of diamond drinding // XX Jubileuszowa Naukowa Szkola Obrobki Scicmej Roman-Biazejewko, Poznan-Blazejewko 15-17 wrzesnia 1997. - С.125-127.

41. Грабченко А.И., Хорват М., Мамалис А.Г., Федорович В.А. Алмазное шлифование сверхтвердых материалов // Пр. Міжнарод. наук. – техн. конф. "Прогресивна техніка і технологія приладобудування і зварювального виробництва." - Київ. - 1998. - С.264 - 266.

42. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Kundrak J., Horvath M. Transformation of mechanisms of superhard polycrystals destruction in grinding process // International Computer Science Conference MicroCAD -98, Section F: Production Engineering, Manufacturing Systems. – Miskolc. - 1998. - С.234 - 241.

43. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Grinco S.A. New ways of SHPM diamond drinding with wheel working relief combined control X-th international conference on tools, university of Miskolc, Hungary, September 6-8. - 2000. - С.175 - 181.

44. Грабченко А.И., Доброскок В.Л., Федорович В.А. 3D моделирование рабочей поверхности и абразивоносного слоя шлифовальных кругов из сверхтвердых

- материалов // Труды IV Междунар. конгр.: "Конструкторско-технологическая информатика - 2000" В 2-х т. - Т. 1. - М.: Изд-во "Станкин". - 2000. - С. 154 - 155.
45. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A. The role of anisotropical properties of diamond cristallites in process of diamond grinding. International Scientific Conference (MicroCAD –2001), February 24-25. – Miscolec. - 2001. – С.59 - 63.
46. Федорович В.А., Гламазда С.Л., Ковалец М. Способы управления процессом приспособляемости при алмазном шлифовании СТПМ // Матер. междуна. научн.- практ. конфер.: "Наука и социальные проблемы общества: Человек, техника, технология, окружающая среда. –Харьков: НТУ "ХПИ". - 2001. - С.194 - 200.
47. Грабченко А.И., Федорович В.А. Влияние анизотропии свойств кристаллитов на процесс взаимного разрушения элементов системы "СТПМ-зерно-связка" при шлифовании. // Тезисы докл. конф.: "Сверхтвердые инструментальные материалы на рубеже тысячелетий: получение, свойства, применение " (СТИМ-2001). - Киев. - 2001. – С.160 - 163.
48. Grabchenko A.I., Kavalec M., Jankowiak M., Fedorovich V.A. Increase of efficiency of diamond grinding superhard ofd materials // Тезисы междунар. конф.: "Manufacturing – 01", 8 - 9 listopada 2001 r. - Poznan. -2001. -С.351 – 358.
49. Федорович В.А., Кавалец М. Исследования качества поверхностного слоя поликристаллических сверхтвердых материалов при шлифовании. // Тезисы докладов. II Міжнародна конференція: "Прогресивна техніка і технологія–2001".-Киев–Севастополь-2001.–С. 74.
50. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A. Ways of SHPM drinding with combined control of a wheel cutting relief // Conference: "Situation and perspective of research and development in chemical and mechanical industry" with international participation. - 22 – 24. October 2001, - Krusevac, -Yugoslavia. – P.142 – 147.
51. Федорович В.А., Русанов В.В., Кавалец М., Янковяк М Новые возможности изучения параметров режущего рельефа алмазных кругов // Матер. XI междунар. науч.-техн. семинара: "Высокие технологии, развитие и кадровое обеспечение". – Харьков: НТУ "ХПИ". - 2001. - С.214 - 222.
52. Grabchenko A.I., Fedorovich V.A., Rusanov V.V. 3D simulation of stress-deformed state of grinding zone of superhard materials.// Труды Междунар. конф.: "International Scientific Conference" (MicroCAD –2002). - March 7- 8. –Miscolec. - 2002. – С.95 - 98.

АНОТАЦІЇ

Федорович В.О. Розробка наукових основ та способів практичної реалізації управління пристосовуваністю при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів. - Рукопис.

Дисертація у вигляді рукопису на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 - процеси механічної обробки, верстати й інструменти. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2002.

У дисертації вирішена науково-технічна проблема підвищення ефективності алмазного шліфування синтетичних надтвердих матеріалів за рахунок управління явищем пристосовуваності. Запропоновано методологію і розроблено систематику складового процесу пристосовуваності при алмазному шліфуванні надтвердих матеріалів. . На базі комплексного теоретико-експериментального вивчення 3D топографії оброблюваної поверхні і робочої поверхні шліфувального круга методом лазерного сканування, моделювання 3D напружено-деформованого стану єдиної системи "оброблюваний матеріал-робоча поверхня абразивно-алмазного круга" і

динаміки зносу її елементів розроблена експертна система процесу шліфування, що дозволяє прогнозувати й оптимізувати процес бездефектної обробки, як існуючих, так і наново створюваних надтвердих матеріалів. Розроблено технічні рішення і рекомендації для практичного застосування, що дозволяє на їхній основі створювати високоефективні робочі процеси виготовлення прецизійних ріжучих інструментів із надтвердих матеріалів.

Ключові слова: пристосовуваність, моделювання, деформація, напруження, поверхня, круг, процес, зв'язка, шліфування, інструмент.

Федорович В.А. Разработка научных основ и способов практической реализации управления приспособляемостью при алмазном шлифовании 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, 2002.

В диссертации решена научно-техническая проблема повышения эффективности алмазного шлифования сверхтвердых материалов за счет управления явлением приспособляемости. Предложена методология и разработана систематика составляющих процесса приспособляемости при алмазном шлифовании сверхтвердых материалов. На базе комплексного теоретико-экспериментального изучения 3D топографии обрабатываемой поверхности и рабочей поверхности шлифовального круга методом лазерного сканирования, моделирования 3D напряженно-деформированного состояния единой системы "обрабатываемый материал - рабочая поверхность абразивно-алмазного инструмента" и динамики износа ее элементов разработана экспертная система процесса шлифования, позволяющая прогнозировать и оптимизировать процесс бездефектной обработки как существующих, так и вновь создаваемых сверхтвердых материалов.

. Разработаны технические решения и рекомендации для практического применения, что позволяет на их основе создавать высокоэффективные рабочие процессы изготовления прецизионных режущих инструментов из сверхтвердых материалов.

Ключевые слова: приспособляемость, моделирование, деформация, напряжения, поверхность, круг, процесс, связка, шлифование, инструмент.

Fedorovych V.A. Development of scientific bases and ways of practical implementation of adaptability control at diamond grinding of superhard materials. – Manuscript

Thesis for doctor's degree in technical sciences on speciality 05.03.01- machining processes, machines and tool. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2002.

Thesis is devoted to solution of scientific and technological problem of great importance in creation of scientific bases of adaptability control at grinding of hard-to-work materials. Methodology is proposed and systematics of aspects of adaptation process at diamond grinding of superhard materials is developed. Main principles of practical implementation of parameter control of working surface topography for grinding wheel with current-conductive bonds by means of forced removal of bond and forming of submicrorelief on diamond grains are developed on the bases of theoretical, simulation and experimental investigations. Engineering solutions and advices are worked out for practical use. This allows to create high-effective working process of manufacturing of precision cutting tools from superhard materials.

For the first time on the basis of 3D simulation of stressed-strained state of "material to be

machined – grain - bond" system the scientifically ground systematics of its element destruction mechanisms are proposed and ways of directed influence on the abrasive microcutting system, providing with control of mutual adaptability of elements "material to be machined – abrasive – diamond tool working surface" are determined. The systematics includes elements interaction types and their destruction sort. Division into interaction kinds is determined by availability or absence of contact of diamond tool bond material to be machined.

Determining influence of anisotropy of crystal grain properties of superhard material to be machined and diamond grains on structural – phase adaptability degree is established. They are, first of all, difference in microhardness, wear resistance, destruction energy and strength of contacting elements, conditioned with their orientation relatively to contact area.

Scientific proposition about specificity of topographic, structural – phase and energy aspects of interacting equally hardness surfaces adaptability at diamond grinding of superhard materials as evolutionary property of the process, determining treatment efficiency, is formulated and proved. Within the framework of functioning of unified technical system "material to be machined-diamond grain-bond" the adaptability is characterized by three stage, reflecting transformation of system element destruction mechanisms. On this basis it is ground and proved that it is possible during grinding process purposefully to transform and/or to stabilize adaptation process at any of three its established stages and by that to realize productive and/or precision treatment of superhard materials using the same diamond wheel with prescribed characteristic.

Expert system of grinding process is developed on the basis complex theoretical-experimental analysis of 3D topography of surface to be machined and grinding wheel working surface by method of laser scanning, simulation of 3D stressed-state of the system "material to be machined-abrasive-diamond tool working surface" and dynamics of its elements wear. This system allows to predict and to optimize process of defect-free machining both available materials and new ones.

Key words: adaptability, simulation, deformation, stress, surface, wheel, process, bond, grinding, tool.

Відповідальний за випуск канд. техн. наук, доцент Наконечний М.Ф

Підп. до друку 03.09.2002 Папір офсетний. Формат 60x90/16.

Друк офсетний. Умов. печ. листів 1. Гарнітура Таймс.

Наклад 100 прим. Зам. № 08/09.

Надруковано: ТОВ фірма "СІМ", м. Харків, пров. Лопарський, 3Ф

