

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

КЛИМЕНКО ВІТАЛІЙ ГРИГОРОВИЧ



УДК 621.923

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛОСКОГО ТОРЦЕВОГО ШЛІФУВАННЯ
ЗА РАХУНОК УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ЗОНИ КОНТАКТУ КРУГА З
ДЕТАЛЛЮ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2017

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Пишов Іван Миколайович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри інтегрованих технологій
машинобудування імені М. Ф. Семка

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Залога Вільям Олександрович,
Сумський державний університет, м. Суми,
завідувач кафедри технології машинобудування,
верстатів та інструментів

кандидат технічних наук, доцент
Краснощок Юрій Степанович,
пенсіонер

Захист відбудеться ¹⁵ червня 2017 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

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

Автореферат розісланий ¹² травня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Н. Зубкова

Зубкова Н. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У різних галузях сучасної промисловості використовується значна кількість деталей із плоскими поверхнями, які підлягають остаточній обробці на плоскошліфувальних верстатах. Серед схем плоского шліфування особливе місце займає обробка торцевими алмазно-абразивними кругами, яка може бути реалізована на верстатах з вертикальним та горизонтальним розташуванням шпинделя з використанням як прямокутних, так і обертових столів. Значна кількість торцевих кругів використовується й на заточувальних верстатах. Плоске торцеве шліфування має кращі показники в плані шорсткості оброблювальної поверхні, а при шліфуванні крихких, наприклад, надтвердих, оброблювальних матеріалів (ОМ) рівня браку виробів через появу відколів, розтріскування і т. і.

Як відомо, особливістю процесів шліфування є високий рівень температур у зоні різання, що негативно позначається на якості поверхонь і потребує обмеження режимів обробки. Це особливо стосується плоского торцевого шліфування, яке характеризується найбільшими значеннями дуги, а отже, і площі зони контакту різальної поверхні круга (РПК) з деталлю. Є доведеним факт, що оптимізація плоского торцевого шліфування повинна відбуватися шляхом вдосконалення факторів, що впливають на зниження його теплонапруженості. Насамперед це управління площею контакту круга з деталлю за рахунок нахилу осі обертання шпинделя, покращення умов охолодження зони обробки технологічною рідиною (ТР), створення механічних коливальних у зоні обробки, правка РПК правлячими олівцями на основі синтетичного полікристалічного алмазу (СПА) та інше. Таким чином, науково-практична задача підвищення ефективності процесу плоского торцевого шліфування за рахунок управління параметрами зони РПК з деталлю (тобто шляхом вдосконалення факторів, що впливають на зниження його теплонапруженості) є актуальною, її вирішення й визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язано з науковою тематикою кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка НТУ «ХПІ» в рамках НДР МОН України: «Розробка технічних рішень спеціальної модернізації універсальних верстатів і технологічних баз даних для алмазно-іскрового шліфування важкооброблюваних матеріалів» (№ ДР 0113U000425) та «Розробка техніко-технологічних рішень і дослідних зразків елементів системи «верстат-оснастка-інструмент» плоского торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів» (№ ДР 0115U000524), у яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – удосконалення процесу плоского торцевого шліфування за рахунок управління параметрами зони контакту різальної поверхні круга з деталлю.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану питання в галузі використання процесів плоского торцевого шліфування, встановити основні фактори, що визначають його ефективність і на цій основі сформулювати невирішені питання.

2. Установити геометричні особливості контакту круга з деталлю в умовах процесу плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі обертання шпинделя, визначити чинники, які впливають на значення фізичних і технологічних параметрів зони контакту круга з деталлю та запропонувати залежності для їх розрахунку.

3. Стосовно реалізації глибинної схеми обробки «на прохід» установити особливості формування відхилення від площинності на оброблювальній поверхні деталі, виявити характер впливу на неї умов обробки та запропонувати розрахункові залежності для її визначення.

4. Виявити особливості формування оброблювальної поверхні деталі при застосуванні багатопрхідної схеми обробки (з використанням додаткової поперечної подачі), установити можливість управління значенням висоти залишкових гребінців та умови виключення можливості появи на поверхні деталі зон, не оброблених кругом.

5. Виконати комп'ютерне геометричне моделювання параметрів зони контакту РПК з деталлю в умовах процесу плоского торцевого шліфування з попередніми нахилом осі обертання шпинделя та запропонувати способи шліфування, засновані на визначенні умов обробки з використанням граничних значень вихідних параметрів обробки.

6. Шляхом поєднання експериментальних досліджень та методології 3D моделювання системи «металева покриття – СПА – металофаза» запропонувати комплексний підхід до підвищення ресурсу алмазного правлячого інструмента.

7. Розробити методологію 3D комп'ютерного моделювання напружено – деформованого стану системи «алмазне зерно – зв'язка круга – ОМ» стосовно процесу вібраційного алмазного шліфування й на її основі уточнити роль механічних коливань у плані можливості активації самозаточування зерен круга.

8. Запропонувати технічні рішення щодо практичної реалізації управління параметрами зони контакту круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні, а для поліпшення умов впровадження розробок у виробництво поєднати їх в одному процесі обробки.

Об'єкт дослідження - процес плоского торцевого шліфування різних груп матеріалів алмазно – абразивними кругами.

Предмет дослідження - управління параметрами зони контакту РПК з деталлю.

Методи дослідження. Робота виконана з використанням сучасних положень теорії обробки матеріалів різанням. Для виявлення геометричних особливостей контакту РПК з деталлю в умовах процесу плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі обертання шпинделя та встановлення залежностей для їх розрахунків використовували класичні положення аналітичної геометрії та геометричне комп'ютерне моделювання у середовищі КОМПАС. Для дослідження напружено - деформованого стану (НДС) систем «металева покриття – СПА – металофаза» (пайка алмазних полікристалів у державці олівця) та «алмазне зерно – зв'язка круга - ОМ» стосовно процесу вібраційного алмазного шліфування використовувалася концепція 3D моделювання, заснована на методі скінчених елементів (МСЕ), а оптимізацію результатів розрахунків за розробленими моделями виконували з застосуванням теорії планування багатофакторного експерименту. Експериментальні дослідження проводилися з використанням загальноприйнятих і запропонованих методик на спеціальному стенді на базі плоскошліфувального верстата з вертикальним шпинделем. У роботі застосовувалися положення теоретичної та прикладної статистики,

а також програмне забезпечення SolidWorks, КОМПАС, CorelDRAW, Visio, Maple, ToupView, Statistica, Microsoft Office та його додаток Microsoft Office Excel.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Отримав подальший розвиток метод управління площею зони контакту круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні шляхом нахилу осі обертання шпинделя. Стосовно глибинної схеми обробки встановлено умови реалізації мінімального, проміжного та повного контакту круга з поверхнею деталі (при достатній її ширині) шляхом визначення раціонального співвідношення значень кута нахилу осі обертання шпинделя, глибини шліфування та діаметра круга. Виявлено, що найбільш значима зміна площі та інших параметрів зони контакту круга з деталлю має місце при достатньо малих значеннях кута нахилу осі обертання шпинделя ($\alpha \leq 0^\circ 15'$).

2. Вперше стосовно шліфування «на прохід» з попереднім нахилом осі обертання шпинделя встановлено взаємозв'язок відхилення від площинності поверхонь (увігнутості) з умовами обробки. Це дозволяє одночасно узгоджувати ці умови з допустимими значеннями як площі зони контакту круга з деталлю, так і увігнутості, а отже, сприяє реалізації забезпечення бездефектної обробки при використанні глибинної схеми шліфування.

3. Вперше встановлено роль поперечної подачі при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі обертання шпинделя за багатопрхідною схемою, яка дозволяє працювати з більшими значеннями кута нахилу, а отже, з меншими площами контакту круга з деталлю. Доказана необхідність узгодження величини подачі зі значенням ширини зони контакту різальної поверхні круга з деталлю, що дає можливість управління величиною залишкових гребінців на поверхні деталі та унеможливує появу на ній ділянок, не оброблених кругом.

4. Вперше шляхом 3D моделювання стосовно процесів правки абразивних кругів алмазними олівцями та вібраційного шліфування доказана можливість забезпечення працездатності олівців з синтетичних полікристалів алмазу на рівні природних алмазів та інтенсифікації самозаточування алмазних зерен, що значною мірою сприяє управлінню параметрами зони контакту круга з деталлю.

Практичне значення отриманих результатів для машинобудівної галузі полягає в обґрунтуванні та практичному застосуванні запропонованих залежностей для розрахунків параметрів зони контакту РПК з деталлю в умовах глибинного шліфування з нахилом осі обертання шпинделя як стосовно шліфування «на прохід», так і при багатопрхідній обробці. Запропоновано комплексний підхід до вирішення завдань заміни природних алмазів на СПА в алмазних правлячих олівцях та створення раціональних умов їх використання. Розроблено конструкцію плоскошліфувального верстата з вертикальним шпинделем, об'єднуючою ідеєю якого є підвищення ефективності плоского торцевого шліфування шляхом повного або часткового поєднання в одному процесі обробки умов зниження теплової напруженості в зоні контакту РПК з деталлю. Розробки захищені 12 патентами України на корисні моделі.

Результати досліджень пройшли виробниче впровадження на ПАТ «Полтавський алмазний інструмент» (м. Полтава), що дозволило встановити факт зниження браку при виготовленні алмазних олівців на 11%, підвищення їх загального ресурсу на 20%, та використовуються в навчальному процесі кафедри технології машинобудування ПолтНТУ в дисциплінах «Теорія різання» та «Металорізальні верстати».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведення теоретичних та експериментальних досліджень, модернізація станку для дослідження процесу плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі обертання шпинделя за рахунок використання запропонованих технічних рішень, захищених 12 патентами України. Здобувач брав безпосередню участь у впровадженні результатів досліджень у виробництво.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертації доповідалися на: Міжнародній науково - практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2012 р.); II Міжнародній науково - практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів, 2012 р.); \bar{X} Міжнародній науково-практичній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку (м. Краматорськ, 2012 р, 2013 р.); XII Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції присвяченій 90-річчю проф. Родіна П. Р. «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї - наука – виробництво» (м. Київ, 2012 р.); III Міжнародній науково - технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (м. Харків, 2013 р.); Міжнародній науково - технічній конференції «Сучасні напрями та перспективи розвитку технологій обробки та обладнання у машинобудуванні «МЕХАНООБРОБКА. СЕВАСТОПОЛЬ – 2013» (м. Севастополь, 2013 р.); *XIV* Міжнародній науково - технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Севастополь, 2013 р.); Міжнародній науково - технічній конференції «Наукоёмкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов» (м. Ростов - на Дону, Росія, 2013 р.); *X* Міжнародній науково - технічній конференції «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів та енергетичних установок» (м. Запоріжжя – м. Алушта, 2013 г.); Міжнародній науково - технічній конференції «Високі технології в машинобудівному виробництві та транспортному машинобудуванні» (м. Полтава, 2013 р.); V Международной научно-технической конференции «Современные технологии в газотурбостроении» посвященной 95-летию Национальной академии наук Украины (м. Харків – м. Алушта, 2013 р.); Міжнародній науково - технічній конференції «Машинобудування очима молодих» (м. Кременчук, 2013 р); Міжнародному симпозиумі «Надежность и качество» (м. Пенза, Росія, 2013 р.); International Congress of Precision Machining «ICPM 2013» (м. Мішкольц, Угорщина, 2013 р.); VIII науково-практичній студентській конференції магістрантів НТУ «ХП» (м. Харків, 2014 р., 2015 р.); Міжнародній науково - технічній конференції «Університетська наука-2014» (м. Маріуполь, 2014 р.); Між-

народному науковому симпозиумі технологів-машинобудівників та механіків «Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях» (м. Ростов - на Дону, Росія, 2014 р.); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2014 р., 2016 р.); Міжнародному науково - технічному семінарі ІНТЕРПАРТНЕР - 2014 «Високі технології: тенденції розвитку» (м. Харків – Одеса, 2014 р., 2015 р., 2016 р.); XV Всеукраїнській молодіжній науково-технічній конференції «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» (м. Житомир, 2015 р.); Міжнародному науковому симпозиумі технологів-машинобудівників «Интегрированные, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке» (м. Ростов - на Дону, Росія, 2015 р.); Міжнародній науково - технічній конференції «Advanced Machining Technologies and Surface Engineering» (м. Ясси, Румунія, 2015 р.); Міжнародній науково-технічній конференції студентів і молодих вчених «Молода наука. Технологія машинобудування» (м. Краматорськ, 2016 р.); Міжнародному науковому симпозиумі технологів-машинобудівників «Перспективные направления развития финишных методов обработки деталей; виброволновые технологии» (м. Ростов - на Дону, 2016 р.). Повністю дисертаційна робота доповідалася на розширених наукових семінарах кафедр технології машинобудування ПолтНТУ та інтегрованих технологій машинобудування імені М. Ф. Семка НТУ «ХП».

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 33 наукових публікаціях, з них: 11 статей у наукових фахових виданнях України (5-у наукометричних базах), дві статті у закордонних виданнях (наукометрична база «SCOPUS»), 12 патентів України на корисні моделі, 8 - у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 212 сторінок: з них 26 рисунків по тексту, 41 рисунок на 28 окремих сторінках, 12 таблиць по тексту, 2 таблиці на 1 окремій сторінці, списку використаних джерел з 182 найменувань на 21 сторінці, 3 додатки на 16 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету й задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячено проблемному аналізу науково-технічної інформації щодо особливостей застосування процесу плоского торцевого шліфування для обробки поверхонь деталей. Враховуючи високу теплонапруженість цього процесу, були виявлені основні умови її зниження й виконаний їх критичний аналіз. Виявлена суттєва роль таких умов, як стан та площа контакту РПК з деталлю, використання вібрацій у зоні обробки, удосконалення умов охолодження зон обробки й правки РПК та ін. У рамках досліджень у цьому напрямку декларується, що дієвим фактором управління параметрами (і в першу чергу площею) зони контакту РПК з деталлю є нахил осі обертання шпинделя. Але інформації щодо визначення параметрів

зони контакту РПК з деталлю недостатньо. Доцільним є реалізація комплексного підходу до використання процесу правки абразивних кругів алмазними олівцями з СПА, який дозволив би управляти параметрами правки РПК на рівні правлячих інструментів з природного алмазу. Потрібно також узагальнити інформацію про рівень НДС в зоні контакту РПК з деталлю при реалізації процесу шліфування з вібраціями з точки зору встановлення їх ролі в активації самозаточування шліфувальних кругів. Установлена наявність деяких резервів для поліпшення умов охолодження зон шліфування та правки. Невизначеність наведених питань ускладнює роботу технолога при розробці операцій плоского торцевого шліфування.

Таким чином, дані аналізу дозволили встановити невирішені питання в даній предметній області й указали на існування можливості суттєвого підвищення ефективності процесу плоского торцевого шліфування шляхом удосконалення та повного або часткового поєднання в одному процесі умов зниження теплової напруженості в зоні контакту РПК з деталлю. У подальшому ці умови були прийняті до розробки й склали напрямок досліджень.

У **другому розділі** викладені загальні методичні підходи до виконання досліджень, а також наведено ряд методик із зазначенням використаних технічних пристроїв для удосконалення умов зниження температури обробки.

В основу покладено комплексний підхід до виконання досліджень в області алмазно-абразивної обробки. Він полягає в поєднанні суто аналітичних досліджень зони контакту РПК з деталлю з її геометричним комп'ютерним моделюванням у середовищі КОМПАС. Для дослідження НДС зон пайки та контакту алмазного зерна з ОМ в умовах введення в зону обробки механічних коливань використовувалося 3D моделювання цих систем. Експериментальні дослідження проводилися на спеціальному стенді на базі модернізованого на універсально-заточувального верстата мод. 3Д642Е (рис. 1. 1 – станина верстата; 2 – стіл верстата; 3 – шпindelний вузол; 4 – додатковий електродвигун; 5 – торцевий шліфувальний круг; 6 – муфта пружна (під захисним кожухом) 7 – ванна; 8 – струмоз'ємник (під захисним кожухом); 9 – блок автоматики; 10 – контрольні прибори; 11 – захисний кожух). Модернізація полягала в оснащенні верстата додатковою вертикальною шпindelною головкою та рядом пристроїв для реалізації запропонованих оригінальних технічних рішень. Це суттєво розширило технологічні можливості верстата, оскільки він отримав функції плоскошліфувального верстата з прямокутним столом. Верстат мав можливість здійснювати чорнове, чистове та прецизійне плоске шліфування алмазно-абразивними торцевими кругами, пристрій для нахилу осі шпинделя у межах $0 - 5^\circ$, що давало можливість реалізації запропонованих способів шліфування, спеціальну пружну муфту для створення довільних механічних коливань у зоні шліфування, спеціальний пристрій для подачі ТР у зону обробки в умовах відсутності порожнистої конструкції шпинделя, спеціальне багатомісне касетне пристосування для шліфування (заточування) лезових інструментів у пакеті, пристрій для правки абразивних кругів, коли правлячий олівець запропонованої конструкції знаходиться в суці-

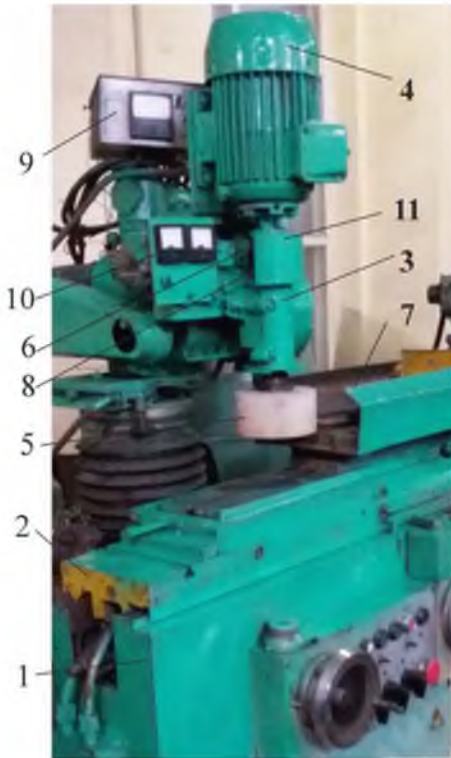


Рисунок 1-Стенд для досліджень

льному шарі ТР, пристрій для електрофізико-хімічної правки кругів на металевих зв'язках, пристрій для реалізації методики оцінки ступеня наповнення зон шліфування або правки ТР та ін. Для оптичних досліджень (стану РПК, оброблювальної поверхні деталей, дефектів алмазних олівців після пайки та ін.) застосовували мікроскоп МБС 9. Візуалізацію об'єктів що розглядалися, забезпечували за допомогою цифрової камери TopCam UCMOS01300KPA. При 3D моделюванні НДС систем, що розглядалися, використовувалися сучасні пакети прикладних програм типу «COSMOS».

Для обробки результатів експериментальних досліджень використовувалися методи математичної статистики та планування багатофакторного експерименту.

У **третьому розділі** наведено результати теоретичних досліджень з визначення геометричних параметрів зони контакту РПК з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі обертання шпинделя.

В основу досліджень покладена глибинна схема шліфування (рис. 2), яка має більш широкі можливості в плані управління площею контакту РПК з деталлю, а також створює умови для захисту кромки круга від утворення забірної конуси (при реалізації подачі на глибину на подвійний хід столу верстата). З використанням положень аналітичної геометрії та геометричного комп'ютерного моделювання в середовищі КОМПАС досліджувався вплив умов обробки на номінальні значення параметрів зони контакту РПК з деталлю. Установлено, що ці умови визначаються в основному трьома факторами, а саме, кутом α нахилу круга, глибиною шліфування t і діаметром круга d_k . У міру збільшення значення кута α при незмінній глибині різання t частина РПК, яка буде контактувати з деталлю, зменшується.

У випадку реалізації вертикальної подачі S_g «на хід столу верстата» послідовно реалізуються обидві схеми обробки. Відомо, що при звичайній (неглибинній) схемі шліфування повний контакт РПК з деталлю має місце при $\alpha=0$. Але при цьому основна маса припуску знімається тільки частиною РПК (на якій, як відомо, утворюється забірний конус). Торцева частина РПК ніби підчищає оброблювальну поверхню. При глибинній схемі шліфування, коли є занурення РПК в тіло деталі на глибину t , повний контакт РПК з поверхнею виробу може мати місце і при $\alpha>0$. Важливою характеристикою в таких умовах є довжина контакту РПК з деталлю (W , рис. 3). Як видно з рисунку 3, у міру зростання кута α довжина W буде зменшуватися (при $t = const$) за залежністю $W = t / \sin \alpha$. Аналіз схеми обробки вказує на існування конкретних сполучень параметрів α , d_k та t , при яких, за умови, що ширина оброблю-

ваної поверхні деталі не менше діаметра круга ($B_d \geq d_k$), РПК буде повністю контактувати з деталлю. При цьому $W = d_k$.

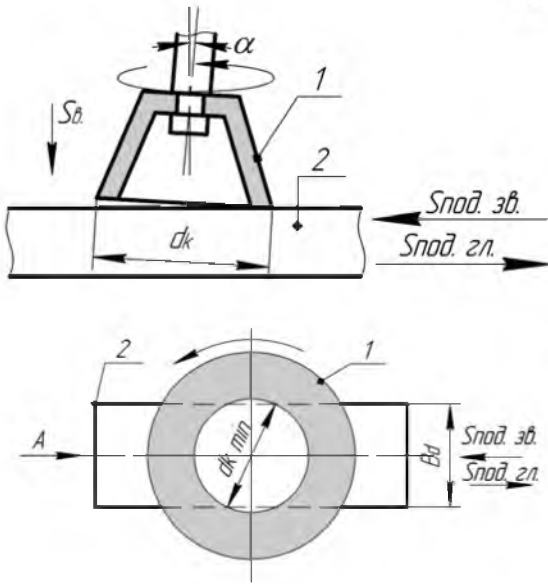


Рисунок 2- Схеми шліфування

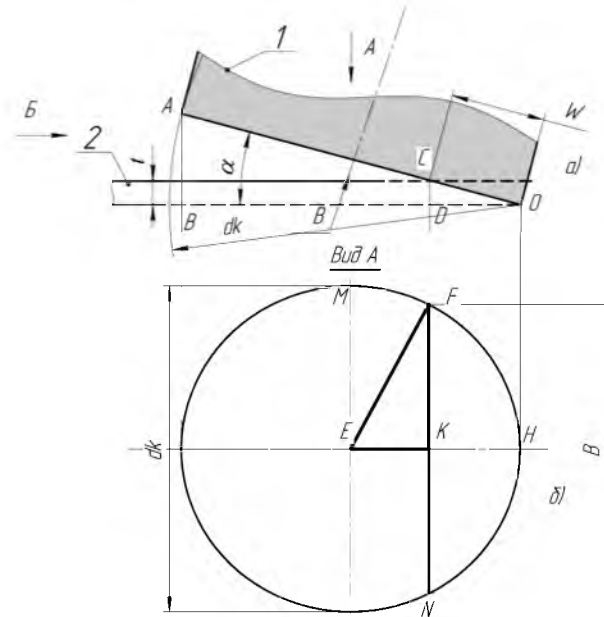


Рисунок 3 - Схема для розрахунку лінійних параметрів зони контакту РПК з деталлю

При симетричному шліфуванні умова повного контакту РПК з деталлю має вигляд: $\alpha = \arcsin t/d_k$. З використанням канонічного рівняння еліпса та формули Гюйгенса отримані аналітичні залежності для визначення ширини (B) та довжини дуги (L) зони контакту РПК з деталлю, необхідні для розрахунку площі:

$$B = \sqrt{d_k^2 - \frac{4 \cdot \left(\frac{d_k}{2} \cdot \cos \alpha - \frac{t}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2}{\cos^2 \alpha}}, \quad (1)$$

$$L = 2 \cdot \sqrt{\frac{B^2}{4} + \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}} + \frac{1}{3} \cdot \left(2 \cdot \sqrt{\frac{B^2}{4} + \frac{t^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}} - B\right). \quad (2)$$

Одним з суттєвих недоліків схеми плоского торцевого шліфування з попереднім нахилом осі шпинделя є те, що на плоскій поверхні деталі неминуче формуються відхилення форми. У даних умовах відповідно до особливостей кінематики має місце окремий випадок відхилення від площинності – увігнутість (Δ). Неврахування цього факту може призвести до значного відсотка браку виробів. Для випадку шліфування «на прохід» технологу важливо знати значення увігнутості Δ на тому етапі обробки, коли круг повністю контактує з поверхнею деталі. Чим більше ширина (B_d) оброблюваної поверхні, тим більші значення відхилення від площинності будуть мати місце при постійних інших параметрах. Аналітична залежність має вигляд

$$\Delta = \frac{d_k}{2} \cdot \sin \alpha - \sqrt{\left(1 - \frac{B_d^2}{d_k^2}\right) \cdot \frac{d_k^2}{4} \cdot \sin^2 \alpha}. \quad (3)$$

Цей параметр потрібен технологу й для визначення кількості проходів при чистовій обробці з метою забезпечення технічних вимог креслення щодо відхилення Δ .

Довжину дуги контакту РПК з деталлю треба визначати за формулою (2), узявши до уваги той факт, що глибина є сумарною ($t = t_{\Sigma} = \Delta$), а $B = B_d$.

Одним із прийомів додаткового зниження площі контакту РПК з деталлю є застосування багатопрохідної схеми обробки (з додатковою поперечною подачею $S_{\text{ноп.}}$). На оброблюваній поверхні при кожному проході формуються ділянки з увігнутістю, унаслідок чого на плоскій поверхні утворюються залишкові гребінці певної висоти. При цьому й увігнутість, і залишкові гребінці характеризуються параметром H (рис. 4).

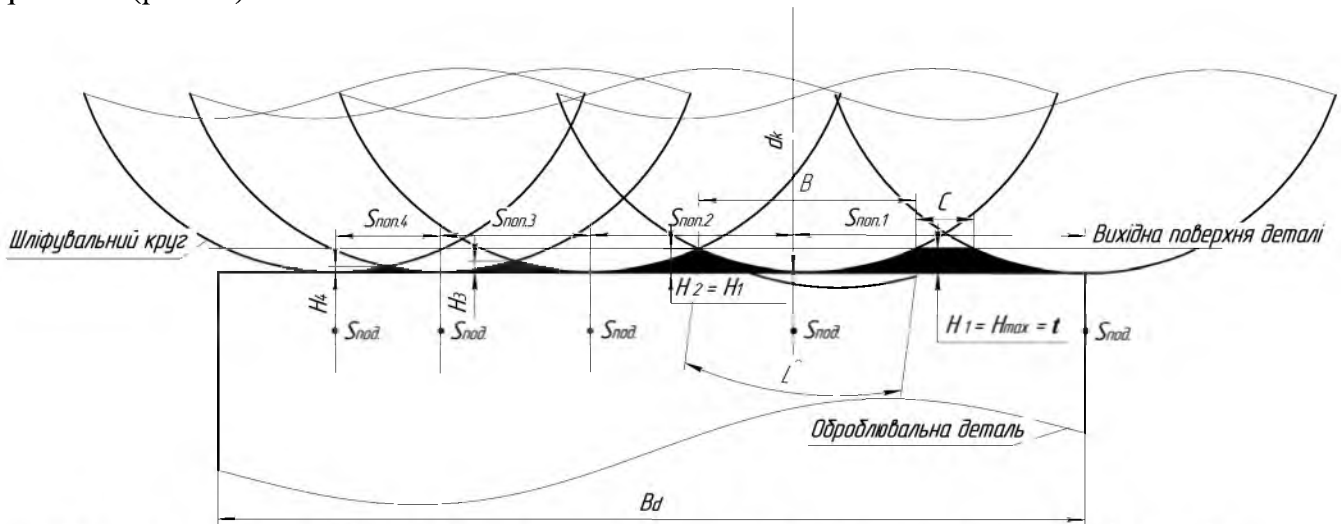


Рисунок 4 - Вплив $S_{\text{ноп.}}$ на формування поверхні при багатопрохідному шліфуванні.

Теоретично, у залежності від величини подачі $S_{\text{ноп.}}$, такий параметр, як висота залишкових гребінців H , на поверхні деталі може визначати, в одному випадку, відхилення форми, а в іншому – шорсткість обробки. У міру зменшення $S_{\text{ноп.}}$ висота гребінців буде зменшуватись за залежністю

$$H = \frac{1}{2} \cdot \left[d_k - \sqrt{(d_k^2 - S_{\text{ноп.}}^2)} \right] \cdot \sin \alpha. \quad (4)$$

Площа ($S_{\text{зк.}}$) зони контакту РПК з деталлю залежить в першу чергу від кута α , діаметра круга d_k і глибини обробки t . Для наведених на рисунку 5 основних схем контакту РПК з деталлю, формули для розрахунку площі відповідно мають вигляд:

$$S_{\text{зк1.}} = \frac{1}{2} \cdot \left[L \cdot \frac{d_k}{2} - B \cdot \left(\frac{d_k}{2} - W \right) \right], \quad (5)$$

$$S_{\text{зк2.}} = \frac{\pi}{8} (d_k^2 - d_{\text{мін.}}^2) - S_{\text{сегм.}}, \quad (6)$$

$$S_{\text{зк3.}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\text{min.}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[L_{\text{сезм.}} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B_d^2)} \cdot \frac{B_d}{2} \right], \quad (7)$$

$$S_{\text{зк4.}} = \frac{\pi}{8} \cdot (d_k^2 - d_{\text{min.}}^2) - \frac{1}{2} \cdot \left[L_{\text{сезм.}} \cdot \frac{d_k}{2} - \sqrt{(d_k^2 - B_d^2)} \cdot \frac{B_d}{2} \right] + \frac{1}{2} \cdot \left[L_{\text{н.сезм.}} \cdot \frac{d_{\text{min.}}}{2} - \sqrt{(d_{\text{min.}}^2 - B_d^2)} \cdot \frac{B_d}{2} \right] \quad (8)$$

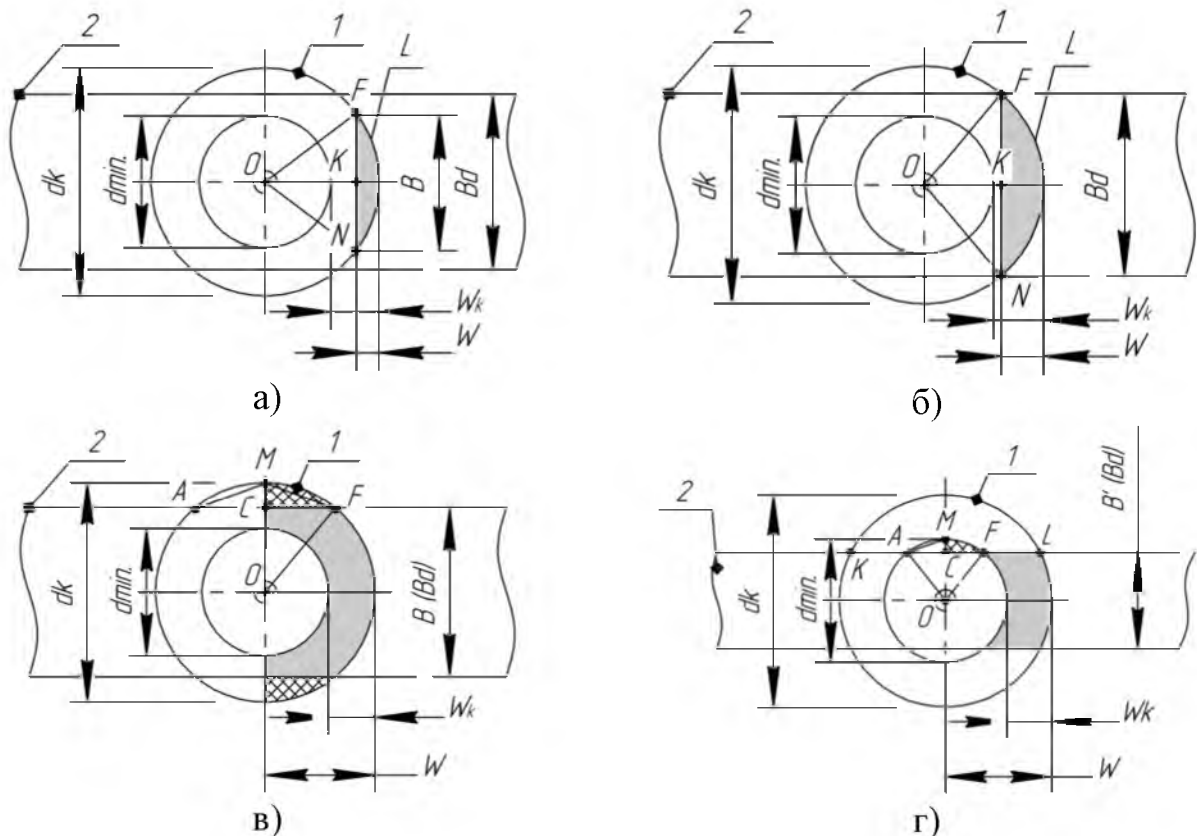
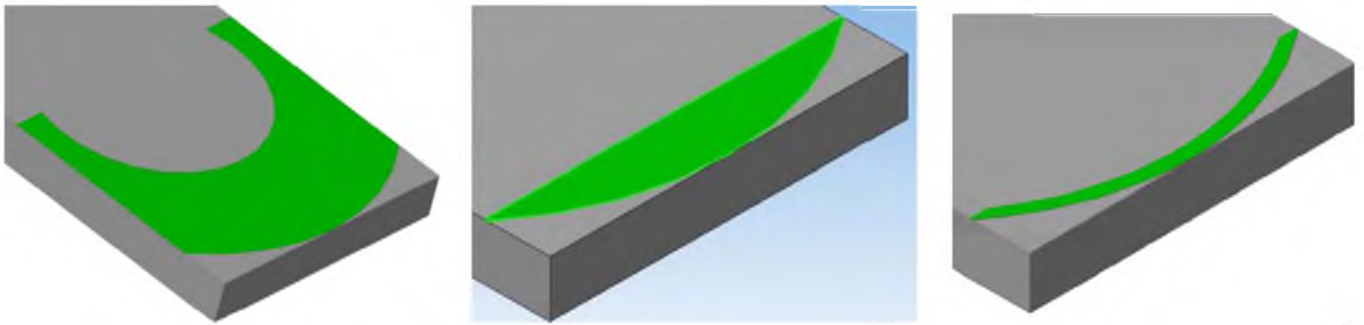


Рисунок 5 - Основні розрахункові схеми для визначення площі контакту РПК (1) з деталлю (2) при умові, що: а) $d_{\text{min.}} \leq B_d \leq d_k$, $B < B_d$, $W \leq W_k$; б) $B = B_d$; в) $W = 0,5 \cdot d_k$, $d_{\text{min.}} \leq B_d (B) < d_k$; г) $W = 0,5 \cdot d_k$, а $B_d (B) < d_{\text{min.}}$

На рисунку 6 наведена графічна ілюстрація можливості управління площею контакту РПК з деталлю (загальні умови обробки: $B_d=250$ мм; $d_k=400$ мм; $\alpha=0,05^\circ$).

На рисунку 7 показано вплив кута α на параметри зони контакту РПК з деталлю. Показовим є те, що в діапазоні кутів $\alpha=0,05^\circ - 4^\circ$ величина площі зони контакту може зменшуватися в сотні разів (рис. 7, в).

Паралельно з аналітичними формулами отримані більш зручні для технологів ступеневі залежності параметрів від умов обробки й запропоновані способи шліфування (захищені трьома патентами України), засновані на регламентуванні значень таких вихідних показників, як увігнутість (Δ), висота залишкових гребінців (H) та площа зони контакту (S):



а) - $t=0,2$ мм; $S_{к.м.}=32356$ мм² б) - $t=0,04$ мм, $S=7980$ мм² в) - $t=0,01$ мм; $S=2746$ мм²

Рисунок 6 - 3D моделі, які відображують деякі можливості управління площею контакту РПК з деталлю при шліфуванні «на прохід». а), б) – обробка за один прохід; в) – обробка за декілька проходів.

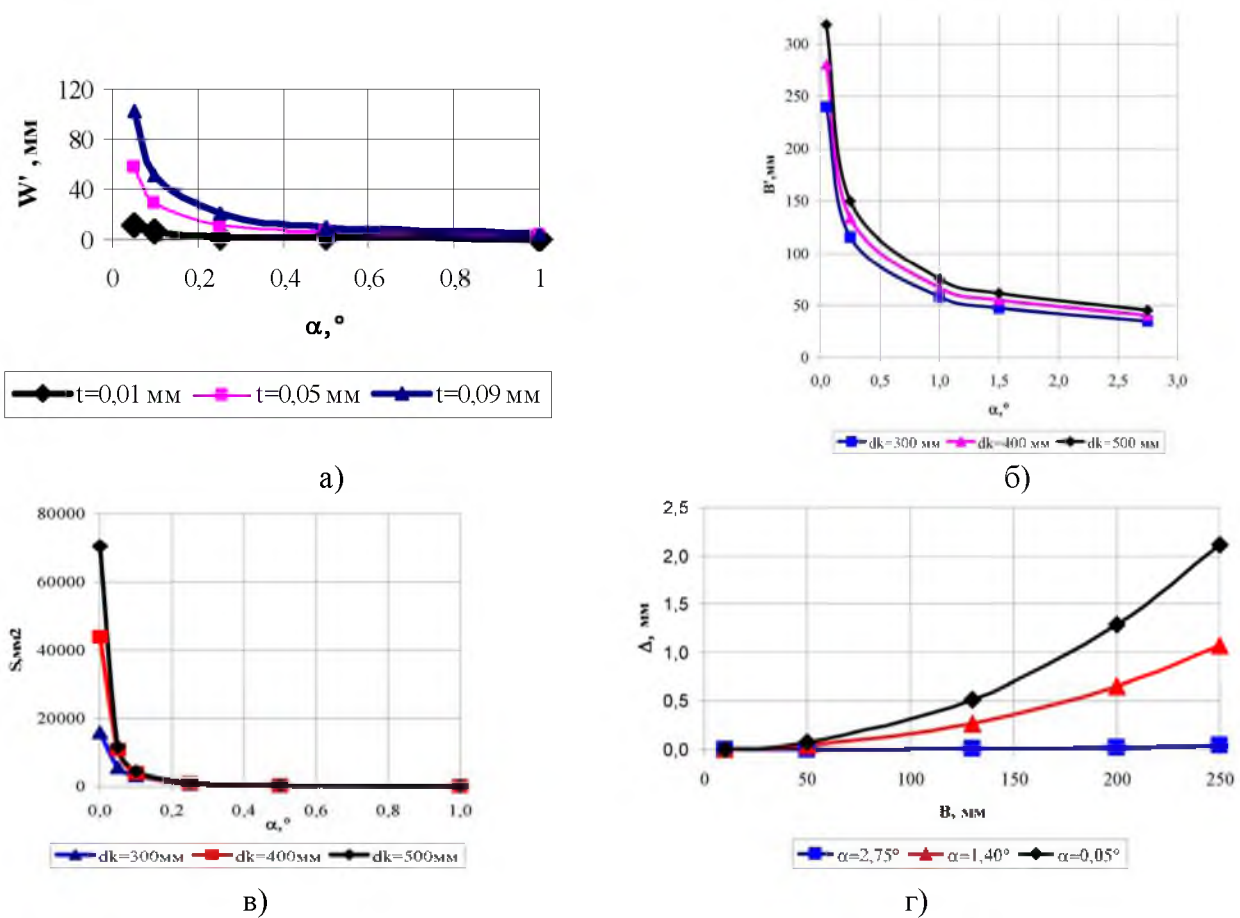


Рисунок 7 - Вплив кута α на W , B , S та Δ (загальні умови: $\alpha=1^\circ$, $d_k=400$ мм, $t=0,05$ мм.)

$$\alpha \leq \frac{[\Delta]}{0,013 \cdot d_k^{-1,196} \cdot B_d^{2,026}}, \quad (9)$$

$$S_{\text{ноп.н.}} \leq B \leq 14,92 \cdot t^{0,50} \cdot \alpha^{-0,48} \cdot d_k^{0,50}, \quad (10)$$

$$S_{\text{ноп.ч.}} \leq 2,039 \sqrt{\frac{[H]}{0,003 \cdot \alpha \cdot d_k^{-0,949}}}, \quad (11)$$

$$\alpha_{\min} = \frac{71,62 \cdot t \cdot d_k^{0,33}}{[S]^{0,67}}. \quad (12)$$

Значення поперечної подачі, розраховане за формулою (10), на етапі попередньої обробки гарантовано забезпечує відсутність на обробленій поверхні ділянок, які будуть залишатися необроблені кругом. Значення поперечної подачі, розраховане за формулою (11), дозволяє забезпечити на етапі чистової обробки потрібний рівень залишкових гребінців H .

У **четвертому розділі** наведено результати теоретико - експериментальних досліджень з удосконалення умов правки РПК алмазними олівцями з СПА. Це позитивно впливає на зниження рівня теплонапруженості в зоні обробки.

На етапі виготовлення олівця здійснювався вхідний контроль якості СПА. В іншому випадку різко зростає вірогідність відбраковування вже повністю виготовленого олівця, що економічно недоцільно. Остання обставина пов'язана з тим, що не тільки СПА різних марок мають різний ступень зносостійкості, але вони можуть мати значний розкид фізико – механічних властивостей і в межах однієї марки. Існуючі способи оцінки абразивної здатності алмазного олівця засновані на визначенні щільності або мікротвердості СПА, мають значну трудомісткість і не можуть дати стабільних результатів. У першому випадку це пов'язано з наявністю в СПА металофази, а в другому — зі складністю виміру мікротвердості алмазу алмазним інденатором.

Запропоновано експрес - метод оцінки абразивної здатності СПА (*патент № 75089, Україна*). Абразивна здатність СПА визначається не шляхом правки ним абразивного круга, а, навпаки, шляхом шліфування його самого алмазним кругом на органічній зв'язці. У якості непрямого критерію оцінки використовують питомі значення одного з вихідних показників процесу шліфування, наприклад, питому потужність шліфування, яка визначається за формулою

$$N_{\text{ит.}} = \frac{N_{\text{max}}}{S_{\text{СПА}}}, \quad (13)$$

де $N_{\text{ит.}}$ – питоме значення потужності шліфування, кВт/см²; N_{max} – максимальне значення ефективної потужності шліфування, кВт; $S_{\text{СПА}}$ – площа контакту РПК з СПА, см².

Для перевірки способу в лабораторних умовах здійснювали шліфування п'яти зразків алмазного полікристала АСБ циліндричної форми (~Ø4,5), мікротвердість яких була заздалегідь відома. Результати експериментів, наведені в таблиці 1, свідчать про істотну залежність питомої потужності від мікротвердості СПА ($H_{\text{СПА}}$), а отже, такий показник, як $N_{\text{ит.}}$ доцільно використовувати в якості непрямого критерію для оцінки абразивної здатності СПА.

За умови, що $N_{\text{ит.}} \geq 20$ кВт/см², питома продуктивність олівців відповідає вимогам ГОСТ 607 – 80.

Рациональні конструкція та умови виготовлення олівця з СПА (*патент № 74681, рис.8*. 1 – СПА; 2 – металеве товстошарове рельєфне покриття; 3 –

державка; 4 – припій) визначені з застосуванням 3D моделювання НДС системи «СПА – металофаза - металеве покриття» (рис. 9).

Таблиця 1 - залежність $N_{num.}$ та Q від $H_{СПА}$

№ з/п	1	2	3	4	5
$H_{СПА}$, ГПа	110	105	100	95	80
$N_{num.}$, кВт/см ²	30,0	26,0	23,0	22,0	15
Q , см ³ /МГ.	140	60	50	40	20

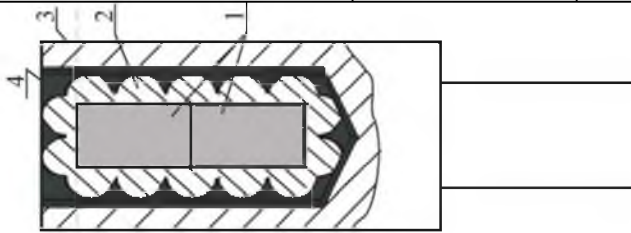
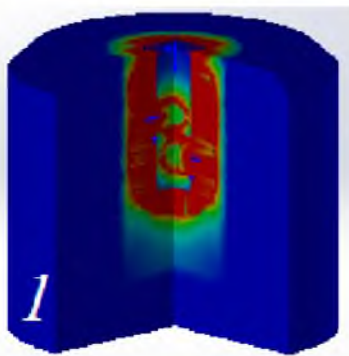
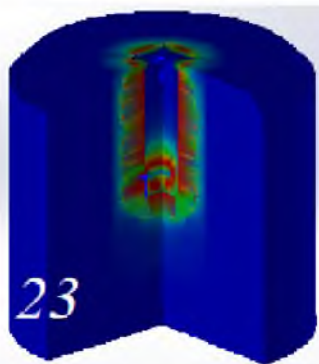


Рисунок 8 - Алмазний олівець з СПА

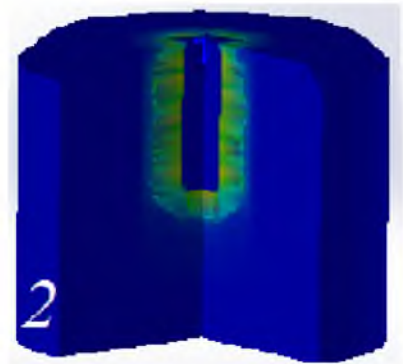
Встановлено, що для запропонованої конструкції олівця для умов високих температур пайки СПА в державці (1000 - 1400°C) вміст металофази в СПА не повинен перебільшувати 4%). Це дозволило забезпечити цілісність СПА при пайці й практично зрівняти працездатність СПА з природним алмазом.



а) $\sigma_{екв.} = 15,50$ ГПа



б) $\sigma_{екв.} = 7,81$ ГПа



в) $\sigma_{екв.} = 1,65$ ГПа

Рисунок 9 - Вплив вмісту металофази в СПА на НДС системи (а – 10,1 %; б – 5 %; в – 0,1 %)

Експериментально встановлено: найбільш ефективно задача охолодження алмаза вирішується стосовно правки абразивних кругів на верстатах із вертикальним шпинделем, коли алмаз (СПА або природний) знаходиться у ванні з суцільним шаром ТР (патент 76444). Експериментальними дослідженнями встановлено, що такий підхід дозволяє на 10 - 20% підвищити ресурс правлячих інструментів.

П'ятий розділ присвячено практичним розробкам для забезпечення умов зниження теплонапруженості в зоні різання при плоскому торцевому шліфуванні.

У ході виконання теоретичних розрахунків, комп'ютерного геометричного та 3D моделювання, лабораторних досліджень розроблено та доведено до рівня винаходів ряд технічних рішень, направлених на удосконалення умов зниження температури в зоні обробки. Зокрема, на базі запропонованої методології 3D комп'ютерного моделювання НДС системи «алмазне зерно – зв'язка круга – ОМ» стосовно шліфування з уведенням у зону обробки механічних коливань, установлена позитивна роль останніх, особливо при шліфуванні надтвердих матеріалів. Фізична суть цього полягає в інтенсифікації процесу самозаточування алмазних зерен завдяки суттєво-

му збільшенню (за інших рівних умов) значень еквівалентних напружень у зоні їх контакту з ОМ (рис. 10).

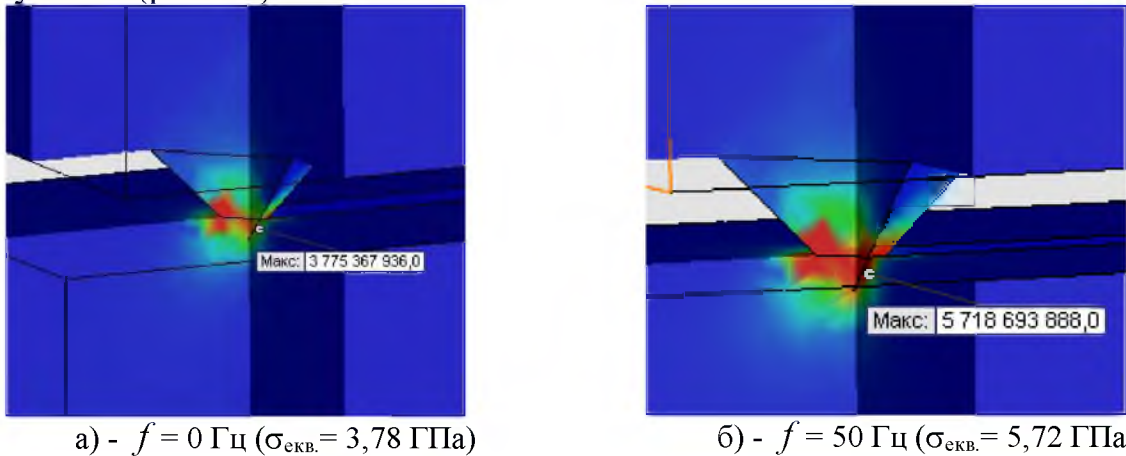


Рисунок 10 – До впливу вібрацій на величину $\sigma_{\text{екв.}}$ в системі «алмазне зерно - зв'язка - ОМ»

Установлена ефективність використання довільних вібрацій, створених, наприклад, за допомогою пружної муфти спеціальної конструкції (*патент № 109911*). По-перше, це приблизно на 20% відсотків підвищує продуктивність обробки, а, по-друге суттєво спрощує застосування процесу вібраційного шліфування на виробництві.

Розроблено пристрій для подачі ТР у внутрішню порожнину шліфувального круга (*патент № 82805, Україна*), який сумісно із застосуванням способу оцінки ступеня наповнення зони шліфування ТР (*патент № 84041, Україна*), дозволяє ефективно вирішити задачу охолодження зони шліфування при відсутності порожнистого шпинделя та ін. У підсумку запропонована конструкція плоскошліфувального верстата з вертикальним шпинделем, у якій можуть бути поєднані як частково, так і повністю практично всі технічні рішення розроблені на основі результатів теоретичних досліджень. Це забезпечує умови зниження теплонпруженості процесу плоского торцевого шліфування й сприяє підвищенню його технологічних можливостей.

У **додатках** наведено акти впровадження розробок на ПАО «Полтавський алмазний інструмент» (м. Полтава), навчальному процесі ПолтНТУ та дані про отримані патенти на корисні моделі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу вдосконалення процесу плоского торцевого шліфування за рахунок управління параметрами зони контакту РПК з деталлю. За результатами досліджень розроблено низку технічних рішень, захищених 12 патентами України на корисні моделі, які можуть бути поєднані в одному процесі шліфування. Вони удосконалюють умови, що безпосередньо впливають на рівень теплонпруженості процесу обробки.

1. Встановлено наявність суттєвого протиріччя між існуючими рекомендаціями щодо вибору кута попереднього нахилу осі обертання шпинделя при реалізації процесу плоского торцевого шліфування. В умовах попереднього нахилу осі обертання

шпинделя значними технологічними можливостями володіє глибинна схема обробки, оскільки при неповному контакті РПК з деталлю зовнішня кромка круга отримує захист від утворення забірною конуса, що робить процес шліфування більш стабільним і прогнозованим.

2. Підтверджено, що попередній нахил осі шпинделя дозволяє в достатньо широких межах управляти значеннями параметрів зони контакту РПК з деталлю. Установлено, що найбільш різка зміна параметрів має місце в зоні малих значень кутів ($<0,25^\circ$). У таких умовах додатковий вплив на параметри мають діаметр круга, глибина обробки та ширина деталі.

3. Для забезпечення технічних вимог щодо відхилення від площинності при реалізації глибинної схеми обробки «на прохід» потрібно мати чітко визначену величину кута нахилу осі шпинделя, причому з урахуванням того, що на відхилення форми плоскої поверхні, окрім нього, мають вплив зовнішній діаметр торцевого круга, а також ширина оброблювальної поверхні деталі.

4. Визначено, що подальше рішення задачі зниження площі контакту РПК з деталлю пов'язано із застосуванням багатопрхідної схеми обробки (з використанням додаткової поперечної подачі). Ключовим моментом при реалізації багатопрхідної схеми обробки є узгодженість між величинами поперечної подачі та ширини контакту РПК з деталлю. Це дає можливість управляти значенням висоти залишкових гребінців і не допускати появи на поверхні деталі зон, не оброблених кругом.

5. Комп'ютерне геометричне моделювання підтвердило коректність отриманих аналітичних залежностей параметрів зони контакту РПК з деталлю від умов реалізації процесу шліфування та дозволило запропонувати способи плоского торцевого шліфування, засновані на визначенні умов шліфування з використанням граничних значень відхилення від площинності, залишкових гребінців та площі зони контакту РПК з деталлю.

6. Шляхом поєднання експериментальних досліджень та методології 3D моделювання системи «синтетичний полікристалічний алмаз – металофаза – металеве покриття» запропоновано комплексний підхід до підвищення ресурсу алмазного правлячого інструмента до рівня природних алмазів. Цей підхід полягає у використанні експрес – методу оцінки абразивної здатності алмазу на попередньому етапі, виявленні раціональних умов високотемпературного закріплення алмазу в державці інструмента, та гарантованого рясного охолодження алмазу в процесі правки круга в суцільному шарі ТР.

7. На базі використання методології 3D комп'ютерного моделювання НДС системи «алмазне зерно – зв'язка круга – оброблювальний матеріал» установлена можливість суттєвого підвищення величини еквівалентних напруг у зоні контакту РПК з деталлю. Це позитивно впливає на інтенсивність самозаточування алмазно – абразивних зерен круга свідченням чого є факт підвищення продуктивності обробки.

8. Запропоновано ряд технічних рішень з удосконалення умов зниження температури в зоні контакту РПК з деталлю. Вони розроблені з можливістю часткового

або повного поєднання в запропонованій конструкції верстата, що поліпшує умови впровадження цих технічних рішень у виробництво і сприяє вирішенню завдання вдосконалення процесу плоского торцевого шліфування. Розробки захищені 12 патентами України на корисні моделі.

9. Результати досліджень впроваджені на ПАТ «Полтавський алмазний інструмент» з економічним ефектом 80028грн.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Клименко В. Г. Состояние вопроса и перспективы применения алмазов, полученных методом CVD / И. Н. Пыжов, А. В. Васильев, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: НТУ «ХПИ», 2011.- Вып. 80.-С. 226-235. *Здобувачем проаналізована перспективність застосування CVD алмазів.*

2. Клименко В. Г. Расширение технологических возможностей процесса плоского торцевого шлифования / А. И. Грабченко, И. Н. Пыжов, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: НТУ «ХПИ», 2012.- Вып. 81.-С. 64-75. *Здобувачем проаналізований стан питання щодо охолодження зони обробки.*

3. Клименко В. Г. До обґрунтування ефективності використання полікристалічних CVD-алмазів для направляючих інструментів / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб.–Харьков: НТУ «ХПИ», 2012.- Вып. 82.-С. 91-98. *Здобувачем показана перспективність застосування CVD СПА в олівцях.*

4. Клименко В. Г. Повышение эффективности процессов финишной обработки деталей ГТД из труднообрабатываемых материалов / А. И. Грабченко, В. А. Коваль, В. А. Федорович, И. Н. Пижов, В. Г. Клименко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий // - Харьков: Технологический центр, 2013. - №3/12 (63). – С.63-68. *Здобувачем проаналізовано вплив вібрацій на процес шліфування.*

5. Клименко В. Г. Деякі шляхи удосконалення процесу плоского торцевого шліфування / А. І. Грабченко, І. М. Пижов, В. О. Федорович, В. Г. Клименко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць.- Харків: НТУ «ХПИ», 2014.- Вип. 9.- С. 63-73. *Здобувачем запропоновані методи поліпшення умов охолодження зони обробки.*

6. Grabchenko A., Fedorovich V., Pyzhov I., Fadee V., Babenko E., Klimenko V. Simulation of Grinding Process of Polycrystalline Superhard Materials // Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, Switzerland. Vol. 581 (2014) pp 217-223. *Здобувачем виконані дослідження по моделюванню НДС в зоні обробки СПА.*

7. Клименко В. Г. Дослідження ширини контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Журнал інженерних наук.– Суми: Вид-во СумДУ, 2015. - Том 2. №1. -С. А10-А15. *Здобувачем виявлені основні фактори і їх вплив на ширину зони контакту.*

8. Клименко В. Г. Дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Журнал інженерних наук.– Суми: Вид-во СумДУ, 2015. -

Том 2. №2. -С. А1-А6. *Здобувачем виявлені основні фактори і їх вплив на площу РПК з деталлю.*

9. Клименко В. Г. Теоретичні дослідження формування залишкових гребінців при багатопрхідній схемі торцевого шліфування з нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво) / Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю. Кондратюка. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – Вип.2(47).-С. 5-13. *Здобувачем встановлена залежність для визначення висоти залишкових гребінців.*

10. Клименко В. Г. Теоретичні дослідження лінійних параметрів зони контакту різальної поверхні круга із деталлю та увігнутості при плоскому торцевому шліфуванні з нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Журнал інженерних наук.-Суми: Вид-во СумДУ, 2016. -Том 3. № 1. - С. А9-А14. *Здобувачем встановлені аналітичні залежності для визначення параметрів.*

11. Клименко В. Г. 3D моделирование напряженно-деформированного состояния при изготовлении алмазных карандашей / И.Н. Пыжов, В.А. Федорович, В. Г. Клименко // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. -Харків: НТУ «ХП», 2016. -Вип. 11.-с. 56-63. *Здобувачем встановлено вплив основних факторів на НДС системи при пайці.*

12. Клименко В. Г. Теоретичні дослідження площі контакту різальної поверхні круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні з попереднім нахилом осі шпинделя / І. М. Пижов, В. Г. Клименко // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. - Харків, НТУ «ХП», 2016.-Вип. 1(26).-С 69-80. *Здобувачем встановлені аналітичні залежності для визначення площі контакту.*

13. Kundrák J., Fedorovich V., Pyzhov I, Markopoulos A., Klimenko V. Some Features of the Surface Micro- and Macroprofile Formation at Flat Face Grinding with Spindle Axis Inclination // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Switzerland. Vols. 809-810 (2015), pp. 45-50, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.809-810.45. *Здобувачем встановлені особливості формування макро - та мікропрофілю.*

14. Пат. 74681 Україна, МПК (2012.01) В24 В 53/00. Спосіб виготовлення алмазного олівця / Грабченко А.І., Пижов І.М., Федорович В.О., Клименко В.Г. Власник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кодратюка - № u 2012 04084; заявл. 03.04.2012; опубл. 12.11.2012. Бюл. № 21. *Здобувачем запропоновано наносити на СПА товстошарове металеве покриття.*

15. Пат. 75089 Україна, МПК (2012.01) В24 В 53/00. Спосіб оцінювання рівня абразивної спроможності синтетичного полікристалічного алмазу/ Грабченко А.І., Пижов І.М., Клименко В.Г. Власник Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кодратюка - № u 2012 04110; заявл. 03.04.2012; опубл. 26.11.2012. Бюл. № 22. *Здобувачем запропоновано використання питомої потужності як критерію для оцінки абразивної спроможності СПА.*

16. Пат. 76437 Україна, МПК (2013.01) В24 В 1/00. Спосіб шліфування надтвердих матеріалів / Алексеєнко Д.М., Грабченко А.І., Пижов І.М., Клименко В. Г. Власник Сумський державний університет. -№ u 2012 05440; заявл. 03.05.2012; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1. *Здобувачем запропоновано ідею нахилу РПК і місце здійснення подачі на глибину.*

17. Пат. 76444 Україна, МПК (2013.01) B24 B 53/00. Спосіб правки торцевих абразивних кругів на шліфувальних верстатах з вертикальним шпинделем / Грабченко А.І., Пишов І.М., Кравченко С.І., Клименко В.Г. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2012 05634; заявл. 08.05.2012; опубл. 10.01.2013. Бюл. № 1. *Здобувачем запропоновано ідею охолодження СПА в суцільному шарі ТР.*

18. Пат. 81400 Україна, МПК (2013.01) B24B7/00 B24B21/00. Плоскошліфувальний верстат / Грабченко А.І., Пишов І.М., Клименко В.Г. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2013 01144; заявл. 30.01.2013; опубл. 25.06.2013. Бюл. № 12. *Здобувачем запропонована ідея поєднання і реалізації в конструкції верстата різних умов зниження теплонапруженості.*

19. Пат. 82805 Україна, МПК (2013.01) B24B55/00. Пристрій для подачі технологічної рідини в зону шліфування / Грабченко А.І., Пишов І.М., Клименко В.Г. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2013 01933; заявл. 18.02.2013; опубл. 12.08.2013. Бюл. № 15. *Здобувачем запропоновано конструкцію змінної оправки з пазами.*

20. Пат. 84041 Україна, МПК (2013.01) B24B 1/00 B24B55/00. Спосіб оцінки ступеня наповнення зони шліфування технологічною рідиною / Грабченко А.І., Пишов І.М., Федорович В.О., Клименко В.Г. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2013 04078; заявл. 02.04.2013; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 19. *Здобувачем запропоновано ідею використання щільності технологічного струму.*

21. Пат. 91976 Україна, МПК (2014.01) B23 Q 3/00 B24 B 3/00. Багатомісцеве касетне пристосування / Алексеєнко Д. М., Пишов І. М., Клименко В. Г. Власник Сумський державний університет. - № у 2014 01461; заявл. 14.02.2014; опубл. 25.07.2014. Бюл. № 14. *Здобувачем запропоновано ідею обробки всіх поверхонь різців в пакеті.*

22. Пат. 92792 Україна, МПК (2014.01) B24 B 1/00. Спосіб плоского торцевого шліфування / Пишов І.М., Клименко В.Г. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2014 00481; заявл. 20.01.2014; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 17. *Здобувачем запропоновано підхід до регламентування увігнутості.*

23. Пат. 95449 Україна, МПК (2014.01) B24 B 1/00. Спосіб плоского торцевого шліфування / Пишов І.М., Клименко В.Г. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 201407305; заявл. 01.07.2014; опубл. 25.12.2014, бюл. № 24. *Здобувачем запропоновано підхід до регламентування висоти гребінців.*

24. Пат. 106941 Україна, МПК (2016.01) B24 B 1/00. Спосіб плоского торцевого шліфування / Пишов І.М., Федорович В.О., Клименко В.Г. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2015 11834; заявл. 30.11.2015; опубл. 10.05.2016, бюл. № 9. *Здобувачем запропоновано підхід до регламентування площі зони контакту.*

25. Пат. 109911 Україна, МПК (2016.01) F16D 3/56. Муфта пружна / Пишов І.М., Федорович В.О., Клименко В.Г. Власник Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». - № у 2016 03941; заявл. 11.04.2016; опубл.

12.09.2016, бюл. № 17. *Здобувачем запропоновано залежність для визначення кутового кроку пальців.*

26. Клименко В. Г. Підвищення ефективності використання правлячих алмазних олівців / І. М. Пишов, В. Г. Клименко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Наукове видання. Тези доповідей XX Міжнародної науково - практичної конференції. –Харків: 2012. У чотирьох частинах, ч. 1. -С. 133. *Здобувачем встановлені умови підвищення працездатності олівців.*

27. Клименко В. Г. Підвищення ефективності використання алмазних олівців на плоскошліфувальних верстатах / А. І. Грабченко, І. М. Пишов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали \bar{X} Міжнародної науково-практичної конференції. – Краматорськ: 2012. –С. 26. *Здобувачем запропонований комплексний підхід до охолодження СПА при правці.*

28. Клименко В. Г. Перспективи застосування процесів шліфування матеріалів з нано - і субмікрокристалічною структурою / І. М. Пишов, В. Г. Клименко // «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї - наука – виробництво». Матеріали XII Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції присвяченої 90-річчю проф. Родіна П.Р. -22—25 жовтня 2012 року. – Київ: 2012. –С. 48-51. *Здобувачем сформульовані основні підходи до шліфування наноматеріалів.*

29. Клименко В. Г. Підвищення ефективності плоского торцевого шліфування / А. І. Грабченко, І. М. Пишов, В. Г. Клименко // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении «Механообработка. Севастополь – 2013». Материалы Международной научно-технической конференции (Севастополь, 20 – 24 мая 2013 года). *Здобувачем сформульовані основні умови підвищення ефективності процесу.*

30. Клименко В. Г. Комп'ютерне моделювання зони контакту торцевого круга з деталлю на плоскошліфувальних верстатах / А. І. Грабченко, І. М. Пишов, В. Г. Клименко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – Краматорськ: 2013. –С. 62. *Здобувачем запропонована ідея використання геометричного моделювання.*

31. Клименко В. Г. Моделирование процесса вибрационного алмазного шлифования / А. И. Грабченко, В. А. Федорович, С. С. Кронов, И. Н. Пишов, В. Г. Клименко // Научоёмкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов. Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции. – Ростов - на Дону: 2013. –С. 40-45. *Здобувачем розроблена методика 3D моделювання для вібраційного шліфування.*

32. Клименко В. Г. Особливості визначення поперечної подачі при багатопрохідному плоскому торцевому шліфуванні / Матеріали X Міжнародної науково-практичної студентської конференції магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (05–08 квітня 2016 року. У трьох частинах. Частина 1. – Харків: 2016. –С. 118-119. *Здобувачем встановлено зв'язок подачі з шириною контакту РПК з деталлю.*

33. Клименко В. Г. Теоретичні дослідження площі контакту круга з деталлю при плоскому торцевому шліфуванні / Н. В. Тьєн, В. Г. Клименко, І. М. Пишов // Молода

наука. Технологія машинобудування. Збірник наукових праць Міжнародної науково-технічної конференції студентів і молодих вчених Краматорськ: ДДМА, 2016. –С. 128-130. *Здобувачем виконано геометричне комп'ютерне моделювання зони контакту.*

АНОТАЦІЇ

Клименко В. Г. Удосконалення процесу плоского торцевого шліфування за рахунок управління параметрами зони контакту круга з деталлю. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2017 р.

Дисертація присвячена вдосконаленню процесу плоского торцевого шліфування за рахунок управління параметрами зони контакту круга з деталлю, які безпосередньо впливають на зниження теплонапруженості в зоні обробки. Для цього зроблено:

– аналіз лінійних параметрів та площі зони контакту РПК з деталлю та отримано залежності для їх визначення із застосуванням підходів аналітичної геометрії та геометричного комп'ютерного моделювання, що дало можливість запропонувати способи шліфування, засновані на управлінні величиною кута нахилу шпинделя з метою регламентування значень таких параметрів процесу шліфування, як увігнутість, висота залишкових гребінців та площа контакту РПК з деталлю;

– 3D моделювання систем стосовно процесів правки абразивних кругів алмазними олівцями та вібраційного шліфування й доказана можливість забезпечення працездатності олівців з СПА на рівні природних алмазів та інтенсифікації самозаточування алмазних зерен, що значною мірою приєє управлінню параметрами зони контакту круга з деталлю;

– на основі аналізу отриманих особливостей та закономірностей управління параметрами зони контакту РПК з деталлю запропоновані оригінальні технічні рішення щодо підвищення ефективності процесу плоского торцевого шліфування шляхом удосконалення факторів, що впливають на зниження його температури в зоні обробки.

Ключові слова: плоске торцеве шліфування, торцевий шліфувальний круг, плоскошліфувальний верстат, нахил осі шпинделя, параметри зони контакту, температура обробки, увігнутість, залишкові гребінці, правка круга, алмазний олівець, комп'ютерне моделювання.

Клименко В. Г. Совершенствование процесса плоского торцевого шлифования за счет управления параметрами зоны контакта круга с деталью. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», 2017 г.

Диссертация посвящена совершенствованию процесса плоского торцевого шлифования за счет управления параметрами зоны контакта РПК с деталью, которые непосредственно влияют на снижение температуры в зоне обработки. Это прежде всего управление площадью контакта РПК с деталью за счет наклона оси шпинделя; обеспечение эффективности управления параметрами зоны контакта РПК с деталью путем усовершенствования процесса правки алмазными карандашами из СПА; управление процессом самозатачивания зерен круга за счет создания произвольных вибраций в зоне обработки; улучшение условий охлаждения зоны обработки технологической жидкостью.

С применением подходов аналитической геометрии и геометрического компьютерного моделирования выполнен анализ линейных параметров и площади зоны контакта РПК с деталью, и получены зависимости для их определения. Это дало возможность предложить способы шлифования, основанные на управлении величиной угла наклона шпинделя с целью регламентирования значений таких параметров процесса шлифования, как вогнутость, высота остаточных гребешков и площадь контакта РПК с деталью.

Предложен комплексный подход к повышению работоспособности правящих карандашей и доведение ее до уровня природных алмазов. Он заключается в создании соответствующих условий как на этапе изготовления правящих карандашей, так и на этапе его эксплуатации. Решение задачи на этапе изготовления карандаша стало возможным благодаря использованию методологии 3D моделирования напряженно деформированного состояния системы «СПА – металлофаза - металлическое покрытие» в условиях высокотемпературного закрепления СПА в корпусе карандаша.

На базе использования методологии 3D моделирования системы «алмазное зерно – связка – ОМ» доказана целесообразность использования произвольных вибраций в зоне шлифования и предложена конструкция упругой муфты для их реализации.

На основе анализа полученных особенностей и закономерностей управления параметрами зоны контакта РПК с деталью предложены оригинальные технические решения, направленные на повышение эффективности процесса плоского торцевого шлифования путем совершенствования факторов, влияющих на снижение температуры в зоне обработки. Эти решения признаны изобретениями и могут частично или полностью использоваться в предложенной конструкции плоскошлифовального станка, защищенной патентом Украины на полезную модель. Результаты исследований внедрены в реальное производство.

Ключевые слова: плоское торцевое шлифование, торцовый шлифовальный круг, плоскошлифовальный станок, наклон оси шпинделя, параметры зоны контакта, температура обработки, вогнутость, остаточные гребешки, правка круга, алмазный карандаш, компьютерное моделирование.

Klimenko V.G. Improvements in flat face grinding process due to controlling the parameters of contact zone between grinding wheel and workpiece. – The manuscript.

The thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.03.01 – machining processes, machines and tools. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2017.

The dissertation is devoted to improvements in flat face grinding process due to controlling the parameters of contact zone between grinding wheel and workpiece that directly affect thermal stress reduction in the processing zone. For this purpose:

Using the approach of analytic geometry and geometric computer-aided modelling and simulation, the linear parameters and the area of contact zone between wheel working surface and workpiece are analysed and the dependences for their determination are obtained. This has made it possible to propose methods of grinding, based on controlling of spindle axis inclination for the purpose of regulation of values of such parameters of grinding process as concavity, height of residual ridges and area of the contact between wheel working surface and workpiece.

Through 3D modelling and simulation of the systems regarding the process of dressing abrasive wheels with diamond dressers and vibration grinding, the possibility of providing the workability of diamond dressers made of synthetic polycrystalline diamond at the level of natural diamonds and the intensification of self-sharpening diamond grains is proved that contributes significantly to the control of the parameters of contact zone between grinding wheel and workpiece.

On the basis of the analysis of obtained features and dependences of controlling of parameters of the contact zone between wheel working surface and workpiece, the original technical solutions in order to enhance the efficiency of flat face grinding process by means of improving the factors affecting its temperature decrease in grinding zone are proposed.

Keywords: flat face grinding, face grinding wheel, flat grinding machine, spindle axis inclination, parameters of contact zone, processing temperature, concavity, residual ridges, dressing of wheel, diamond dresser, computer-aided modelling and simulation.



