

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Кальченко Володимир Віталійович

УДК 621.923

**НАУКОВІ ОСНОВИ ЕФЕКТИВНОГО ШЛІФУВАННЯ ЗІ
СХРЕЩЕНИМИ ОСЯМИ АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ТА ОБРОБЛЮВАНОЇ ДЕТАЛІ**

Спеціальність 05.03.01 – Процеси механічної обробки,
верстати та інструменти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі металорізальних верстатів та систем Чернігівського державного технологічного університету Міністерства освіти і науки України, м. Чернігів.

- Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Грабченко Анатолій Іванович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф. Семка.
- Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дерев'янченко Олександр Георгійович,
Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри «Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство»;
- доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Лаврінченко Валерій Іванович,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України, м. Київ,
завідувач лабораторії шліфування матеріалів, інструменту із надтвердих матеріалів;
- доктор технічних наук, професор
Калафатова Людмила Павлівна,
Донецький національний технічний університет,
професор кафедри «Металорізальні верстати та інструменти».
- Провідна установа: Запорізький національний технічний університет, кафедра «Верстати та інструменти», Міністерство освіти і науки України, м. Запоріжжя.

Захист відбудеться «25» травня 2006 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64. 050. 12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий «18» квітня 2006 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В сучасному машинобудуванні широко використовуються деталі з високоточними циліндричними, торцевими, сферичними, торовими, гвинтовими і криволінійними поверхнями, остаточна якість яких визначається фінішними операціями. Тому збільшується трудомісткість операцій, здійснюваних на шліфувальних, доводочних та інших верстатах, які оснащені абразивними інструментами.

Ефект схрещування осей абразивного інструмента і оброблюваної деталі є в багатьох способах шліфування, проте, в одних випадках він є негативним явищем, а в інших – позитивним. Наприклад, при урізному шліфуванні циліндричних і ступінчастих валів з паралельними осями на круглошліфувальних верстатах кут схрещування осей деталі та інструмента визначає точність обробки, зі збільшенням якого точність формоутворення знижується. У цій групі способів шліфування кут схрещування негативно впливає на результати шліфування і потрібно визначати максимально допустимі значення цього кута, при яких забезпечується отримання необхідної точності формоутворення поверхонь.

Разом з тим, в останні роки показана можливість і доцільність використання способів шліфування, в яких кут схрещування між осями інструмента і деталі позитивно впливає на процес обробки. У цій групі способів потрібно задавати значний кут схрещування між осями інструмента і деталі. Цей кут є параметром, який визначає ефективність шліфування, від нього залежить величина і розподіл шару, що зрізається, теплонапруженість процесу, розташування і стійкість формоутворювальної ділянки круга. Потрібно визначити раціональні (стаціонарні або керовані) кути схрещування, профілі кругів, їх взаємозв'язок з іншими параметрами для забезпечення високої продуктивності і точності.

Відомо, що впровадження операцій шліфування на верстатах з ЧПК відстає, наприклад, від операцій фрезерування. Головною причиною цього є низька стійкість профілю абразивного інструмента, особливо при шліфуванні криволінійних поверхонь великогабаритних трубвальцевих і листовальцевих валків, які мають високу твердість і великі припуски на обробку. Саме схрещування осей круга і деталі при шліфуванні з поздовжньою подачею циліндричних і криволінійних поверхонь визначає раціональне положення формоутворювальної ділянки. Поєднання цієї ділянки з нормаллю по координаті обробки дає можливість шляхом адаптивного керування компенсувати вплив зносу профілю круга на точність формоутворення і підвищує стійкість абразивного інструмента.

Отже, створення узагальненої наукової бази для шліфування зі схрещеними осями, розробка 3D моделювання і впровадження нових способів такого шліфування з охоптом широкої номенклатури оброблюваних деталей різного призначення є суттєвим резервом інтенсифікації і підвищення ефективності процесів. При шліфуванні циліндричних, торцевих, сферичних, голчастих, торових, гвинтових і криволінійних поверхонь це дозволить суттєво підвищити продуктивність, точність виробів і стійкість інструментів. Це значна наукова і технологічна проблема, що має важливе народногосподарське значення для машинобудування, вальничної, текстильної і автомобільної промисловостей, верстатобудування, трубвальцевого виробництва і енергетики України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводилися відповідно до координаційного плану Державної науково-технічної програми Міністерства освіти і науки України за напрямом «Високоефективні технологічні процеси в машинобудуванні» на 2000-2005 роки, а також відповідно до госпдоговірної і держбюджетної тематики кафедри «Металорізальні верстати та системи» Чернігівського державного технологічного університету, а саме, за госпдоговірною темою № 398 (1998-1999 р.р.) „Розробка технології одночасного шліфування двох торців пружин” та чотирма держбюджетними темами:

№ 47/96 від 01.01.1996 р. „Розробка теоретичних основ шліфування поверхонь обертання орієнтованим інструментом” (1996-1998 р.р.) ДР №0196U003329;

№ 52/99 від 01.01.1999 р. „Розробка теоретичних основ та способів шліфування торців циліндричних деталей орієнтованим і профільованим інструментом” (1999-2001 р.р. ДР № 0199U003860);

№57/02 від 01.01.2002 р. „Розробка теоретичних основ, методів керування процесами та нових способів шліфування криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК” (2002-2004 р.р., ДР №0102U000703);

№63/05 від 01.01.2005 р. „Розробка теоретичних основ ефективного шліфування, профілювання і зносу інструмента при перехрещених осях його та деталі” (ДР № 0205U002013).

Здобувач був відповідальним виконавцем вказаних госпдоговірної та держбюджетних науково-дослідних тем.

Мета і задачі дослідження. Мета дисертації – підвищення ефективності шліфування різноманітних поверхонь деталей за рахунок розробки і реалізації наукових основ специфічного процесу шліфування зі схрещеними осями інструмента і деталі як бази для створення нових способів шліфування і визначення умов та областей їх раціонального застосування.

Для досягнення мети в дисертації вирішуються наступні основні задачі:

1. Виявити потенціал схрещування осей абразивного інструменту і оброблюваної деталі при шліфуванні різноманітних поверхонь та його вплив на процеси зняття припуску, формоутворення, профіль інструменту, характер і інтенсивність його зносу, продуктивність, точність та якість обробки.

2. Запропонувати нову концепцію профілювання абразивного інструмента, яка враховує геометричні параметри деталі і заготовки, а також цикл шліфування і кількість одночасно оброблюваних деталей одним кругом.

3. Визначити потужність різання, тепловий потік і знос профілю круга в залежності від об'єму матеріалу, що зрізається та деформується на основі аналізу розробленої загальної моделі продуктивності шліфування.

4. Розробити новий підхід до керування кутом схрещування і процесом поздовжнього шліфування циліндричних, голчастих і криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК, який дозволяв би компенсувати вплив зносу профіля круга на точність формоутворення.

5. Запропонувати і реалізувати 3D моделі безцентрового шліфування циліндричних і сферичних поверхонь зі стабілізацією положення центрів сфер і осі заготовок циліндричних деталей в процесі зняття припуску і формоутворення.

6. На базі аналізу отриманих загальних 3D моделей розробити і впровадити нові способи шліфування зі схрещеними осями інструмента і деталі.

Об'єкт дослідження – процес шліфування сталевих деталей абразивними інструментами.

Предмет дослідження – процес шліфування з управлінням схрещенням осей абразивного інструмента та оброблюваної деталі і його 3D геометричне моделювання.

Методи дослідження. В теоретичних дослідженнях використані фундаментальні положення теорії різання матеріалів, теорії формоутворення поверхонь, технології машинобудування, геометричного моделювання, теоретичної механіки, опору матеріалів, теорії вірогідності і розділів математичного аналізу. Використані апарат диференціального і інтегрального числення функцій однієї і декількох перемінних, векторної алгебри, математичної статистики, дискретної математики, алгебри логіки і операцій над множинами, методи візуально-орієнтованого програмування. Результати, висновки і рекомендації підтверджені обчислювальними комп'ютерними експериментами з використанням алгоритмів і моделей, розроблених здобувачем.

Експериментальні дослідження виконувалися на модернізованих здобувачем верстатах з використанням сучасної контрольно-вимірювальної апаратури. Достовірність теоретичних положень роботи підтверджується результатами експериментальних досліджень і практикою промислового впровадження.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Висунуто і доведено наукове положення про цілеспрямоване управління схрещуванням осей абразивних кругів і оброблюваних деталей як потужний потенціал впливу на процеси формоутворення поверхонь, фізико-механічні явища, які відбуваються в зоні шліфування, характер та інтенсивність зносу інструменту, точність і якість обробки деталей.

2. Запропоновано наукове положення про можливість і доцільність вирішення прямої і зворотної задач теорії формоутворення за допомогою тривимірних геометричних моделей, які пред-

ставлені у вигляді добутку уніфікованих модулів (циліндричного, прямокутного сферичного). Кожен з модулів являє собою добуток трьох однокоординатних матриць четвертого порядку і має постійне математичне описання не залежно від його функціонального призначення.

3. Розроблено сукупність загальних взаємозв'язаних геометричних 3D моделей для способів шліфування зі схрещеними осями абразивного інструмента і оброблюваної деталі. Запропоновано ієрархію загальних 3D моделей, яка визначається кількістю модулів в добутку, і на їх базі частинні моделі, які описують: а) багато формоутворюваних та інструментальних поверхонь з різною структурою; б) процеси зняття припуску і формоутворення; в) формоутворювальні системи верстатів для шліфування і заточування. Уніфікація модулів і їх матричне представлення спрощують комп'ютерну реалізацію моделей.

4. Запропоновано методику управління схрещенням осей абразивного інструмента і оброблюваної деталі, яка є загальною для широкої номенклатури розповсюджених поверхонь (циліндричних, торцевих, сферичних, торових, гвинтових, голчастих, криволінійних). Вона узагальнює низку способів: шліфування з фіксованим положенням однієї деталі, оброблюваної одним інструментом; безцентрове шліфування зі змінним поточним положенням осі оброблюваної деталі; групове шліфування декількох деталей одним інструментом. Методика може бути використана не тільки для нових способів шліфування зі схрещеними, але і для традиційного шліфування з паралельними осями інструмента і деталі.

5. Запропонована нова концепція профілювання абразивного інструмента, яка враховує кількість одночасно оброблюваних деталей одним кругом, форми заготовки і деталі, цикл шліфування і кут схрещення осей.

6. Теоретично обґрунтовано новий принцип поздовжнього шліфування циліндричних і криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК, коли вісь повороту абразивного круга, перпендикулярну до осі його обертання, поєднують з нормаллю в опорній точці оброблюваної поверхні і круг повертають на кут, який забезпечує участь в зніманні припуску всією його периферією. При компенсації зносу круг переміщується в адаптивному режимі вздовж цієї нормалі, що суттєво зменшує вплив зносу на точність формоутворення.

7. Вперше визначено і регламентовано вплив стабілізації положення центрів сфер і осі обертання заготовок циліндричних деталей в процесі зняття припуску і формоутворення на геометричну точність при безцентровому поздовжньому шліфуванні.

8. Розроблено новий підхід до визначення потужності різання, теплового потоку і зносу профілю круга на базі загальної моделі продуктивності шліфування залежно від об'ємів матеріалу, який зрізається і деформується.

9. Розроблені нові ефективні способи шліфування циліндричних, торцевих, сферичних, голчастих, торових, гвинтових і криволінійних поверхонь зі схрещеними осями інструмента і деталі.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Одержана в дисертації сукупність загальних тривимірних моделей і методик в поєднанні з узагальненою схемою шліфування є науковою базою для створення нових способів і верстатів для ефективного шліфування зі схрещеними осями, а також можуть служити геометричною базою автоматизованих систем проектування і виробництва CAD/CAM технологічного і інструментального призначення.

2. Запропонований метод компенсації зносу шліфувального круга на верстатах з ЧПК керованим переміщенням його вздовж нормалі до оброблюваної поверхні підвищує стійкість круга, який працює в режимі самозаточування, і спрощує керуючі програми, які тепер не залежать від величини припуску, що знімається, зміни діаметра круга і його профілю внаслідок зносу.

3. Складені алгоритми і програми комп'ютерного розрахунку форм повідного і шліфувального кругів в залежності від профілю і параметрів оброблюваної поверхні, заготовки і припуску, що знімається, при безцентровому шліфуванні циліндричних, торових і сферичних поверхонь.

4. Створена теоретична наукова база використана для розробки нових способів шліфування циліндричних, торцевих, сферичних, голчастих, торових, гвинтових і криволінійних поверхонь зі схрещеними осями деталі і круга. На способи одержано 6 патентів України, 3 рішення про видачу патентів України і оформлено 7 заявок на винаходи. З метою реалізації нових способів спроекто-

вані і виготовлені експериментальні установки для дослідження процесів обробки неповних сферичних, голчастих, торцевих і криволінійних поверхонь.

5. Розроблені і впроваджені у виробництво практичні рекомендації з використання наукових розробок на Чернігівському ВАТ «ЧЕКСІЛ-Аріадна», Чернігівському науково-виробничому об'єднанні «МАГР», Прилуцькому заводі «ПОЖСПЕЦМАШ», Харківському заводі верстатобудування ВАТ «ХАРВЕРСТ», ВАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ).

Загальний економічний ефект від впровадження результатів роботи склав більше 360 тис. грн.

Результати і методики дисертації використовуються в навчальному процесі на кафедрі металорізальних верстатів та систем Чернігівського державного технологічного університету.

Особистий внесок здобувача. Теоретичні і експериментальні дослідження, розробка алгоритмів і програмного забезпечення, модельні випробування виконані здобувачем самостійно. Постановка задач і аналіз результатів дослідження зроблені разом з науковим консультантом. Роботи по підготовці патентів і деяких статей виконані з участю співавторів. Розробка технічної документації, модернізація устаткування і проведення виробничих випробувань виконані разом із співробітниками кафедри «Металорізальні верстати та системи» Чернігівського державного технологічного університету. Визначальні наукові і практичні результати одержані здобувачем самостійно.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися й одержали позитивну оцінку на 16 міжнародних конференціях і семінарах: «Високі технології в машинобудуванні: сучасні тенденції розвитку» (Харків-Алушта 1998, 1999, 2000); «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків: ХДПУ–1999, 2000, 2002, 2003, 2004); «Проблеми теорії і практики технології машинобудування, механічної і фізико-технічної обробки» (Харків: ХНПК «ФЭД»–2000); «Технологія машинобудування: проблеми і перспективи» (Севастополь: СевДТУ, –2000); «Високі технології в машинобудуванні: розвиток і кадрове забезпечення» (Харків-Алушта, 2001, 2002); «Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, навколишнє середовище. Micro CAD – 2001» (Харків: ХДПУ, – 2001); „Машинобудування та металообробка – 2003” (Кіровоград: КДТУ – 2003); «Високі технології: тенденції розвитку» (Харків-Алушта: НТУ „ХП”, 2003, 2005).

У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на кафедрах: «Металорізальні верстати та системи» Чернігівського державного технологічного університету, «Інтегровані технології машинобудування» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», на спеціальному засіданні XIV міжнародного науково-технічного семінару «Високі технології: тенденції розвитку» (Алушта, 2005).

Публікації. За результатами роботи опубліковано 69 наукових праць, з них 46 у фахових виданнях ВАК України, 34 без співавторів, 7 в інших виданнях, 6 деклараційних патентів України на винахід, 10 – матеріали міжнародних конференцій і семінарів.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 7 розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації включає 489 сторінок, з них 79 ілюстрацій по тексту, 67 ілюстрацій на 61 сторінці, 4 таблиці по тексту, 5 таблиць на 10 сторінках, 6 додатків на 89 сторінках, 297 літературних джерел на 32 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і задачі досліджень, визначена наукова новизна і практичне значення результатів досліджень. Структурно-логічна схема досліджень представлена на рис. 1.

В першому розділі розглядається стан питання шліфування з паралельними і схрещеними осями інструмента і деталі, а також 3D моделювання процесів зняття припуску і формоутворення поверхонь.

Абразивна обробка і її 3D моделювання зробили значний крок свого розвитку завдяки роботам наукових центрів і колективів багатьох вітчизняних вчених, серед яких: А.К. Байкалов, В.М. Бакуль, М.К. Беззубенко, Г.В. Бокучава, В.М. Вerezуб, Ю.М. Внуков, А.П. Гавриш,

А.І. Грабченко, О.Г. Дерев'янченко, В.І. Дікушин, В.Л. Доброскок, Л.П. Калафатова, В.І. Кальченко, В.В. Коломієць, О.Б. Кондусова, С.М. Корчак, А.В. Кривошея, В.К. Кулик, В.І. Лавриненко, Г.Б. Лур'є, М.П. Мазур, В.І. Марчук, Є.М. Маслов, П.Г. Матюха, П.П. Мельничук, Ю.К. Новосьолов, Б.О. Перепелиця, Ю.М. Петраков, В.Т. Портман, А.Ф. Раб, Н.С. Равська, С.П. Радзевич, П.Р. Родін, Є.В. Рижов, М.Ф. Семко, М.Е. Тернюк, М.Д. Узунян, С.С. Шахновський, В.О. Федорович, Л.М. Філімонов, І.Х. Чеповецький, Ф.С. Юнусов, А.В. Якимов, П.І. Ящерицин та інші.

Роботи перерахованих учених присвячені дослідженню процесів зняття припуску, формоутворення, профілювання інструменту, його зносу, продуктивності, точності і якості шліфування поверхонь з паралельними або перпендикулярними осями інструмента та деталі. Мало досліджень направлено на вивчення потенціальних можливостей процесу шліфування зі схрещеними осями. Разом з тим останніми роками показана доцільність способів шліфування, в яких керування кутом схрещування між осями позитивно впливає на процес.

Аналіз відомих 3D геометричних моделей процесу зняття припуску і формоутворення поверхонь показує, що вони охоплюють обробку окремих груп деталей: торцевих, криволінійних та інших. Сучасне машинобудування потребує з'єднання високого рівня і якості виробів з високою продуктивністю і гнучкістю виробництва. Це забезпечується, зокрема, застосуванням автоматизованих систем проектування і виробництва CAD/CAM, геометричним ядром яких повинні бути ефективні і універсальні 3D моделі.

У країнах з розвиненим машинобудуванням виражена тенденція розвитку тривимірного (3D) геометричного моделювання. Проте існуючі 3D моделі не достатньо враховують специфічні особливості абразивного інструмента, точність формоутворення і зняття припуску при шліфуванні поверхонь. В сучасних умовах, коли вітчизняне машинобудування намагається стати конкурентноздатним, гнучким і високоефективним, ця проблема набуває народногосподарського значення.

Проведений аналіз дозволив визначити основні задачі наукових досліджень.



Рис. 1. Структурно-логічна схема досліджень

В другому розділі запропоновано класифікацію функціонального призначення схрещування

осей абразивного інструменту та оброблюваної деталі при шліфуванні різноманітних поверхонь і його вплив на процес зняття припуску, формоутворення, профіль інструменту, характер і інтенсивність його зносу, продуктивність, точність та якість обробки.

Структура формоутворювальної системи шліфувального верстата має дві підсистеми, які здійснюють формоутворення абразивного інструмента 1 і поверхні деталі 2 (рис. 2).

На рис. 2: $\vec{E}_{\hat{a}}$ – інструмент для правки абразивного круга; $\hat{O}\hat{N}\hat{E}$ і $\hat{O}\hat{N}\hat{A}$ формоутворювальні системи верстата для правки абразивного інструмента $\vec{E}$ і обробки деталі $\vec{A}$.

Рис.2. Структура формоутворювальної системи шліфувального верстата

Радіус-вектор $\vec{r}_{\hat{e}}$ робочої поверхні абразивного інструмента, який при правці є оброблюваною деталлю 2¹ (табл., 2), описується рівнянням

$$\vec{r}_{\hat{e}} = M_{\hat{e}\hat{a}} \cdot \vec{a}^4, \quad (1)$$

де $\vec{a}^4 = (0, 0, 0, 1)^{\hat{O}}$ – радіус-вектор початку координат, який збігається з точкою алмазного олівця 1¹ при профілюванні робочої поверхні абразивного круга 2¹; $M_{\hat{e}\hat{a}}$ – матриця переходу з системи координат точки 1¹ алмазного олівця, яка профілює круг, в систему координат $O_u X_u Y_u Z_u$ абразивного круга 2¹.

Радіус-вектор $\vec{r}_{\hat{A}\hat{E}}$ точок оброблюваної поверхні деталі 2 знаходимо з рівняння

$$\vec{r}_{\hat{A}\hat{E}} = M_{\hat{A}\hat{E}} \cdot M_{\hat{e}\hat{a}} \cdot \vec{a}^4, \quad (2)$$

де $M_{\hat{A}\hat{E}}$ – матриця переходу з системи координат $O_u X_u Y_u Z_u$ заправленого абразивного інструмента 1 (табл., 2) в систему координат $OXYZ$ деталі 2.

Аналіз, розробленої нами загальної схеми формоутворювальних систем верстатів (табл., 11) при шліфуванні зі схрещеними осями інструмента 1 і деталі 2, показав, що загальна матриця переходу

$$M = M_{\hat{A}\hat{E}} \cdot M_{\hat{e}\hat{a}} \quad (3)$$

з системи координат шліфувального круга в систему координат деталі є добутком 15-ти однокоординатних матриць четвертого порядку (4), що відповідає груповій обробці торців циліндричних деталей.

$$\begin{aligned} M = & [M_3(z) \cdot M_6(\theta) \cdot M_2(y)] \cdot & \leftarrow \tilde{N}^{\hat{o}} \\ & \cdot [M_3(z_b) \cdot M_6(\theta_b) \cdot M_2(y_b)] \cdot & \leftarrow \tilde{N}^{\hat{o}} \\ & \cdot [M_3(z_{c1}) \cdot M_2(y_{c1}) \cdot M_1(x_{c1})] \cdot & \leftarrow \tilde{D}^{\hat{i}}, \\ & \cdot [M_4(\varphi) \cdot M_5(\psi) \cdot M_1(x_2)] \cdot & \leftarrow S^{\hat{i}} \\ & \cdot [M_3(z_{\hat{e}}) \cdot M_6(\theta_{\hat{e}}) \cdot M_2(y_{\hat{e}})] & \leftarrow \tilde{N}^{\hat{e}} \end{aligned} \quad (4)$$

де $\hat{I}_1, \hat{I}_2, \hat{I}_3$ – матриці лінійних переміщень вздовж осей X, Y, Z ; $\hat{I}_4, \hat{I}_5, \hat{I}_6$ – матриці кутових поворотів відносно осей X, Y, Z (Д.Н. Решетов, В.Т. Портман «Точность металлорежущих станков», М.: Машиностроение, 1986, 336 с.); y_b, θ_b, z_b – координати $OXYZ$ оброблюваної деталі 2 (табл., 11) в системі координат $O_b X_b Y_b Z_b$ барабана 4, який подає деталі; X_{c1}, Y_{c1}, Z_{c1} , δ_2, ψ, φ – координати $O_b X_b Y_b Z_b$ барабана та $O_{\hat{e}} X_{\hat{e}} Y_{\hat{e}} Z_{\hat{e}}$ круга 1 в системі координат $O_{\hat{N}} X_{\hat{N}O} Y_{\hat{N}O} Z_{\hat{N}O}$ станини; Z_u, θ_u, y_u – координати точок робочої поверхні круга в його системі координат.

Дослідження матриці (4) показало, що вона є загальною і при послідовному обнулінні аргументів ряду матриць може бути використана для опису 3D моделей оброблюваних поверхонь. Загальна 3D модель (2), (4) дає можливість розраховувати за однією програмою частинні 3D моделі

різних поверхонь деталей, що спрощує процес 3D моделювання. До недоліків викладеної вище загальної 3D моделі відноситься необхідність використовувати її незалежно від того, чи описуємо ми пласку лінію і аргументи 13 матриць дорівнюють нулю, або проводимо групову обробку ряду деталей, де працюють всі 15 матриць. Тому виникла необхідність створення ієрархії загальних 3D моделей.

Аналіз загальної матриці M переходу (4) показав, що вона складається з ряду функціональних модулів: $\tilde{N}^{\hat{e}}$ – модуль інструмента, $S^{\hat{i}}$ – модуль орієнтації інструмента відносно деталі, $\hat{D}$ – модуль перетворення системи координат, $\tilde{N}^{\hat{o}}$ – транспортно-подавальний модуль, $\tilde{N}^{\hat{o}}$ – модуль формоутворення. При розробці будь-якої системи важливим чинником є створення її елементної бази, в нашому випадку це модуль, з яких вона складається.

Аналіз формоутворювальних систем верстатів показав, що залежно від їх типів обробка здійснюється в циліндричній, прямокутній і сферичній системах координат. Тому пропонується в якості модулів формоутворення застосовувати циліндричний C^{ϕ} (5), прямокутний P^{ϕ} (6) і сферичний S^{ϕ} (7), кожний з яких є добутком трьох однокоординатних матриць четвертого порядку.

$$\begin{aligned} \tilde{N}_{z_{\hat{o}}, \theta_{\hat{o}}, y_{\hat{o}}}^{\hat{o}} &= [M_3(z_{\hat{o}}) \cdot M_6(\theta_{\hat{o}}) \cdot M_2(y_{\hat{o}})] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z_{\hat{o}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \theta_{\hat{o}} & -\sin \theta_{\hat{o}} & 0 & 0 \\ \sin \theta_{\hat{o}} & \cos \theta_{\hat{o}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y_{\hat{o}} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \theta_{\hat{o}} & -\sin \theta_{\hat{o}} & 0 & -\sin \theta_{\hat{o}} \cdot y_{\hat{o}} \\ \sin \theta_{\hat{o}} & \cos \theta_{\hat{o}} & 0 & \cos \theta_{\hat{o}} \cdot y_{\hat{o}} \\ 0 & 0 & 1 & z_{\hat{o}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\hat{D}_{z_{\hat{o}}, y_{\hat{o}}, x_{\hat{o}}}^{\hat{o}} = [M_3(z_{\hat{o}}) \cdot M_2(y_{\hat{o}}) \cdot M_1(x_{\hat{o}})] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \tilde{o}_{\hat{o}} \\ 0 & 1 & 0 & \acute{o}_{\hat{o}} \\ 0 & 0 & 1 & z_{\hat{o}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} S_{\varphi_{\hat{o}}, \psi_{\hat{o}}, x_{\hat{o}}}^{\hat{o}} &= [M_4(\varphi_{\hat{o}}) \cdot M_5(\psi_{\hat{o}}) \cdot M_1(x_{\hat{o}})] = \\ &= \begin{pmatrix} \cos \psi_{\hat{o}} & 0 & \sin \psi_{\hat{o}} & \cos \psi_{\hat{o}} \cdot x_{\hat{o}} \\ \sin \varphi_{\hat{o}} \cdot \sin \psi_{\hat{o}} & \cos \varphi_{\hat{o}} & -\sin \varphi_{\hat{o}} \cdot \cos \psi_{\hat{o}} & \sin \varphi_{\hat{o}} \cdot \sin \psi_{\hat{o}} \cdot x_{\hat{o}} \\ -\cos \varphi_{\hat{o}} \cdot \sin \psi_{\hat{o}} & \sin \varphi_{\hat{o}} & \cos \varphi_{\hat{o}} \cdot \cos \psi_{\hat{o}} & \cos \varphi_{\hat{o}} \cdot \sin \psi_{\hat{o}} \cdot x_{\hat{o}} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

Під модулем розуміється – 3D геометрична модель, яка описує переміщення (положення) точки або їх сукупність в тривимірному просторі і має ряд функціональних призначень: формоутворення деталі та інструмента, його орієнтацію, транспортування і подачу деталі в зону обробки і перетворення систем координат. Модуль можна представити у вигляді добутку трьох однокоординатних матриць четвертого порядку (5, 6, 7). При кодуванні модулів (4, 5, 6, 7) в нижньому індексі вказуються аргументи цих матриць у порядку їх розташування в добутку, а верхній індекс вказує функціональне призначення модуля.

Рівень ієрархії загальних 3D моделей визначається числом модулів, які входять в загальну матрицю переходу $M = M_{\hat{A}\hat{E}} \cdot M_{\hat{e}\hat{a}}$ (табл.) при описанні радіус-вектора $\vec{r}_{\hat{A}\hat{E}}$ оброблюваної поверхні.

Модуль формоутворення, який розташований на першому рівні ієрархії загальних 3D моделей (табл., 1), забезпечує геометричне моделювання поверхонь, наприклад, циліндричної $\tilde{N}^{\hat{O}}$. $\ddot{O}$ (табл., 1), ліній, наприклад, криволінійної твірної, при $y = y(z)$, $x = \theta = 0$ (табл., 1), а також формоутворення поверхонь 2 (табл., 1) точковим інструментом 1, наприклад при токарній обробці, або правці круга 2¹ алмазним олівцем 1¹ (табл., 2). Модуль формоутворення, який розташований на першому рівні ієрархії, присутній у всіх модульних 3D моделях оброблюваних поверхонь (табл.). Це підтверджує, що він є головним і може бути циліндричним $\tilde{N}^{\hat{O}}$, прямокутним $\hat{D}^{\hat{O}}$, або сферичним $S^{\hat{O}}$. Інструментальний модуль $\tilde{N}^{\hat{e}}$ також присутній у всіх рівнях ієрархії (табл., 2-12), окрім першого, де застосовується точковий інструмент. Розташування інструментального модуля від другого до п'ятого рівнів залежить від складності формоутворювальної системи верстата. Інструментальний модуль може бути циліндричним $\tilde{N}^{\hat{E}}$, наприклад, для шліфувального круга 1 (табл., 2-7), прямокутним $\hat{D}^{\hat{E}}$, для абразивних брусків 1 (табл., 9), або сферичним $S^{\hat{E}}$. Модуль орієнтації, як правило, сферичний $S^{\hat{I}}$ і розташовується перед інструментальним $\tilde{N}^{\hat{E}}$ (табл., 3-12).

При геометричному моделюванні поверхонь (табл., 1) радіус-вектор $\vec{a}_4 = (0,0,0,1)^{\hat{O}}$ початкової точки в рівнянні (2) збігається з оброблюваною поверхнею. Циліндричний модуль формоутворення $\tilde{N}_{z-\theta-y}^{\hat{O}}$ (табл., 1) включає три рухи формоутворення і є загальним для ряду поверхонь. Для геометричного опису поверхні на три рухи формоутворення накладається один функціональний зв'язок, що забезпечує отримання семи видів поверхонь, одна з яких, циліндрична, приведена в табл., 1. При кодуванні поверхні до коду формоутворювальної системи верстата, наприклад $\tilde{N}^{\hat{O}}$, додається, після точки, буква $\ddot{O}$ (табл., 1), яка позначає, що формоутворена поверхня $\tilde{N}^{\hat{O}}$. $\ddot{O}$ – циліндрична.

Другий рівень загальних моделей (табл., 2), де працює добуток двох модулів $C_{z_{\tilde{n}} \square \theta \square y_{\tilde{n}}}^{\delta} \square C_{z_{\tilde{e}} \square \theta_{\tilde{e}} \square y_{\tilde{e}}}^{\tilde{e}}$, що входять в радіус-вектор $\bar{r}_{\tilde{A}\tilde{E}}$ і код формоутворювальної системи верстата, описує загальну частину ряду поверхонь, які обробляються відомими способами при паралельних осях інструмента і деталі. Система зв'язків, яка відповідає формоутворенню циліндричної поверхні $C^{\delta} \tilde{N}^{\tilde{e}} \cdot \tilde{O}$, наведена в табл., 2.

Перспективним при обробці однієї зафіксованої деталі одним інструментом є третій рівень (табл., 3-9), де працює добуток трьох модулів $\tilde{N}^{\delta} \cdot S^{\tilde{f}} \cdot C^{\tilde{E}}$. Порівняно з другим рівнем додається модуль орієнтації $S^{\tilde{f}}$ інструмента 1 відносно деталі 2, який має різне функціональне призначення при обробці поверхонь. Так при шліфуванні циліндричних і ступінчастих валів методом копіювання, де схрещення осей знижує точність формоутворення, за допомогою модуля орієнтації визначають допустимі значення схрещення осей (рис. 10). Шліфування методом копіювання увігнутих та опуклих поверхонь зі схрещеними осями дозволяє застосувати нову концепцію профілювання інструменту, яка враховує не лише форму оброблюваної деталі, а і заготовки. За допомогою модуля орієнтації визначають оптимальні кути схрещення осей (рис. 12), які забезпечують зняття припуску з постійною глибиною різання вздовж профіля круга, рівномірне його завантаження та знос. При поздовжньому шліфуванні циліндричних, голчастих і криволінійних поверхонь схрещення осей забезпечує зняття припуску всією периферією та фіксує положення формоутворювальної ділянки шліфувального круга, суміщення якої з нормаллю дає можливість компенсувати вплив зносу профіля на точність формоутворення (рис. 13).

Групово обробка з круговою подачею деталей описується модульними 3D моделями 4-го і 5-го рівнів ієрархії. 4-тий рівень при паралельних осях (табл., 11, $\varphi = \psi = \tilde{O}_2 = 0$), а 5-тий, з орієнтацією інструмента відносно оброблюваної деталі (табл., 11, 12). За допомогою модуля орієнтації $S^{\tilde{f}}$ визначають оптимальні кути схрещення осей і форми кругів, які забезпечують підвищення продуктивності та точності при обробці торців (рис. 3, б, рис. 4), сферичних та циліндричних поверхонь при безцентровому шліфуванні (рис. 6).

На базі аналізу запропонованих модульних 3D моделей з орієнтацією інструмента по твірній, напрямній і навколо нормалі розроблені нові способи шліфування (табл., 3-12).

При визначенні інструментальної поверхні $\bar{r}_{\tilde{e}}$ її розраховують за допомогою зворотної матриці $\tilde{I}_{\tilde{A}\tilde{E}}^{-1}$ із співвідношення

$$\bar{r}_{\tilde{e}} = \tilde{I}_{\tilde{A}\tilde{E}}^{-1} \cdot \bar{r}_{\tilde{A}\tilde{E}}, \quad (8)$$

що спрощує розрахунки при вирішенні прямої і зворотної задач теорії формоутворення за рахунок використання добутку одних і тих же модулів і матриць четвертого порядку, які описують матрицю переходу $\tilde{I}_{\tilde{A}\tilde{E}}$, але взятих в добутку (4), в зворотному порядку з аргументами зі зворотним знаком.

Розроблена загальна модель продуктивності шліфування Q поверхонь з осями інструментів і деталей, що схрещуються:

$$Q = \sum_{n=1}^m \frac{1}{T} \cdot \int_{i_1}^{T_n} \left(\int_{\theta_{1ki}}^{i_2} \bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot (R_i - \tilde{E}_{in} \cdot \sin \alpha_{in}) \left[1 - \exp \left(- \frac{\sum b(t, \theta)}{b_i} \right) \right] \cdot d\theta_k \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{dR_{in}}{di} \right)^2 + \left(\frac{dz_{in}}{di} \right)^2 \cdot di} \cdot dT_n, \quad (9)$$

де m – кількість одночасно оброблюваних деталей 2 (табл., 11); T – час обробки деталі; $i_1, i_2, \theta_{2ki}, \theta_{1ki}$ – кутові і радіальні (осьові) координати плями контакту круга 1 і деталі 2; $\bar{V}_{in}$ – вектор швидкості відносного руху круга і деталі; $\bar{n}_{in}$ – вектор нормалі в i -тій точці (рис. 3, а); R_i і z_i – радіус і осьова координата круга в i -тій точці після правки; $\tilde{E}_{in}$ – знос профілю круга в i -тій

точці після обробки n деталей; α_i – кут нахилу дотичної в i -тій точці профілю круга.

Дана модель дає можливість розраховувати локальну Q_E , питому Q_{yin} , миттєву Q_m і середню Q_{cp} продуктивності шліфування. Вона дозволяє враховувати поточний знос $\dot{E}_{in}$ профілю круга, кількість одночасно оброблюваних деталей m , також імовірність видалення матеріалу заготовки $\left[1 - \exp\left(-\frac{\sum b(t, \theta)}{b_i}\right)\right]$, яка розраховується за методикою професора Новосьолова Ю.К.

На базі розробленої загальної моделі продуктивності шліфування визначається потужність різання з виразу

$$N = a \cdot Q, \quad (10)$$

де a – потужність, що витрачається на зняття одиниці об'єму, визначається експериментально на розробленій нами установці, розділ 7, рис. 16. Це дає можливість розраховувати локальну, питому, миттєву і середню потужності шліфування, підставляючи в неї (10) відповідні продуктивності. Знаючи потужність, можемо визначити щільність теплового потоку з виразу

$$q = b \cdot N / F, \quad (11)$$

де F – площа плями контакту круга і деталі; b – коефіцієнт, який враховує скільки тепла переходить в стружку, а скільки в деталь.

Розроблена модель зносу профілю круга, яка враховує обсяги матеріалу, який зрізається і деформується, залежно від величини нормальної складової швидкості $\bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in}$ подачі заготовки по координаті обробки.

$$\dot{E}_{in} = \int \frac{C_{yin} \cdot Q_{yin}^m + C_{qin} \cdot Q_{qin}^b}{k_\alpha \cdot 2\pi \cdot R_{in}} \cdot dT_o, \quad (12)$$

де Q_{yin} – питомий об'єм металу, що зрізається, при $\bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot \tau_i \geq a_{zmin}$; Q_{qin} – питомий об'єм металу, який деформується при $\bar{V}_{in} \cdot \bar{n}_{in} \cdot \tau_i \leq a_{zmin}$; a_{zmin} – мінімальна товщина шару, що зрізається ріжучою кромкою; τ_i – час між контактами ріжучих зерен; C_{yin} , C_{qin} – коефіцієнти питомого зносу абразивного круга, визначаються експериментально (рис. 17).

Розроблено загальну модель похибки шліфування поверхонь зі схрещеними осями кругів і деталей. Сумарний вектор похибки $\bar{\Delta}_{\tilde{n}}$ визначається з виразу

$$\bar{\Delta}_{\tilde{n}} = \bar{\Delta}_b + \bar{\Delta}_i + \bar{\Delta}_{i\delta\alpha\hat{a}} + \bar{\Delta}_E, \quad (13)$$

де похибки: формоутворення $\bar{\Delta}_b$, профілювання круга $\bar{\Delta}_{i\delta\alpha\hat{a}}$, зносу профілю круга $\bar{\Delta}_E$ і положення точки оброблюваної поверхні $\bar{\Delta}_i$ залежно від похибки положення ланок формоутворювальної системи верстата ($\hat{O}\tilde{N}\tilde{A}$ і $\hat{O}\tilde{N}\tilde{E}$, рис. 2).

3D моделювання виконується на базі трьох уніфікованих модулів з постійним математичним описом кожного, що спрощує його процес. Ієрархія загальних моделей дозволяє спростити розрахунки порівняно з відомими загальними моделями для груп деталей. Модульне моделювання дає можливість не тільки аналізу 3D моделей, але і їх синтезу.

В третьому розділі доведено доцільність безцентрового глибинного шліфування циліндричних та сферичних поверхонь зі стабілізацією положення при русі центрів сфер і осі обертання заготовок циліндричних деталей в процесі зняття припуску і формоутворення. Стабілізацію положення забезпечено завдяки використанню нової концепції профілювання шліфувального, повідного кругів і опорного ножа (для сфер опорно-повідного диска). Це підвищило точність за рахунок скасування геометричної похибки формоутворення, яка присутня при обробці без стабілізації.

На рис. 3, б показані розгортки дуг контакту деталей 2 і заготовок 11 з кругами 1, 1₁ на радіусі R_B (табл., 11) нового способу одночасного шліфування двох торців з комбінованою правкою кругів (пат. України № 10636), де на них виділені формоутворювальні ділянки 9, 9₁, які не беруть

участі в знятті припуску 1, при вході заготовки 11 в зону обробки, відсутній контакт між цими ділянками і заготовкою, зазор Δ . Зняття припуску здійснюють торцеві ділянки кругів 12, 12₁, які сполучаються з формоутворювальними. Правка кругів здійснюється алмазними олівцями 8, 8₁, закріпленими на барабані 4, який здійснює подачу заготовок (табл., 11). Одночасно з круговою подачею алмазів здійснюється переміщення шліфувальних кругів вздовж їх осей обертання так, щоб на розгортках дуг контактів алмазів з кругами одержати прямі або монотонні криві, які сполучаються з прямолінійними формоутворювальними ділянками. Модульна 3D модель оброблюваних торцевих поверхонь деталей приведена в табл., 11.

Аналіз обчислювальних експериментів шліфування новим способом торців циліндричних деталей, радіусом $R=13$ мм при кутах орієнтації кругів $\varphi=-0,09^\circ$ і $\psi=0,06^\circ$ (табл., 11), показав, що продуктивність збільшилася на 25%, торцеве биття зменшилося на 30% (рис. 4), неплосинність торців не перевищує 3 мкм, а непаралельність 6 мкм. При однопрохідному шліфуванні торців циліндричних деталей точність формоутворення Z_d (рис. 3, б) залежить від характеру зносу круга, який впливає на фактичний його профіль R_{in} , Z_{in} . Дослідження на ЕОМ математичної моделі (12) зносу круга $\vec{E}_{in}$ (рис. 3, а) дають можливість прогнозувати його профіль після обробки партії деталей. На рис. 5 приведені два профіля круга: 1 – після профілювання його алмазним олівцем при кутах орієнтації круга $\varphi=-0,09^\circ$, $\psi=0,06^\circ$ (табл., 11); 2 – після обробки 80 пальців.

На рис. 3, в представлено новий спосіб (пат. України № 10545) безцентрового шліфування сферичних поверхонь, які отримують за рахунок двох обертань навколо перехрещених осей за допомогою повідного круга 1₁ (рис. 3, в) і опорно-повідного диска 5 (рис. 3, з) (табл., 12). Даний спосіб заснований на тому ж принципі, що і при шліфуванні торців циліндричних деталей (рис. 3, б), де виділена калібрувальна ділянка 9 на шліфувальному крузі 1 (рис. 3, в), який не бере участі в знятті припуску з заготовки 11 діаметром D_3 , але забезпечує формоутворення діаметра сферичної поверхні D_L .

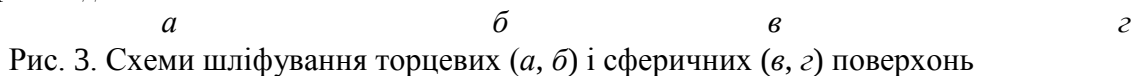


Рис. 6. Алгоритм розрахунку точності формоутворення сферичних і циліндричних поверхонь

Модульна 3D модель поверхні повідного круга описується рівнянням

$$\vec{r}_{EA} = S^O_{\varphi \cdot \psi \cdot x_2} \cdot P^i_{z_{c1} \cdot y_{c1} \cdot x_{c1}} \cdot C^m_{\theta_b \cdot y_B} \cdot \vec{r}_O, \quad (15)$$

де параметри модулів: орієнтації S^O , перетворення P^i і транспортно-подавального $\tilde{N}^m$ – аналогічні приведеним в рівнянні (4).

3D модель шліфувального круга матиме той же вигляд, але в дзеркальному відображенні.

3D моделі оброблюваних циліндричної і сферичної поверхонь приведені в табл., 10, 12, а фрагменти шліфувального 1, повідного 1₁ кругів і опорно-повідного диска 5 (ножа 5₁) приведені на рис. 7.

На рис. 9 показані траєкторії 1, 2 руху осей деталей 2₁ (рис. 7, б) при шліфуванні відомим способом (рис. 9, в) і новим способом (рис. 9, з) (заявка на винахід № 200509627), який забезпечує стабілізацію положення осі деталі в процесі обробки за рахунок використання запропонованої нової концепції профілювання шліфувального і повідного кругів, а також настроювання опорного ножа (заявка на винахід № 200509629). Для цього розроблено математичну модель твірної комбінованої поверхні обертання (рис. 8, а), яка охоплює параметри потоку заготовок і деталей. Твірна (рис. 8, а, 1) описує монотонне зменшення зняття припуску, а (рис. 8, а, 2) ступінчасте, де NE – ділянка чорнового шліфування, EK₁ – чистового, а K₁K₂ – виходжування.

3D моделі інструментальних поверхонь повідного і шліфувального кругів, а також опорного ножа розраховуються за алгоритмом (рис. 6). На рис. 8, б, приведена похибка 1 твірної деталі при обробці відомим способом. При шліфуванні новим способом – геометрична похибка твірної відсутня, оскільки траєкторія 1 руху осі залишається паралельною осі Z (рис. 9, з). Модульна 3D модель оброблюваної поверхні при безцентровому поздовжньому шліфуванні приведена в табл., 10. Запропоновано алгоритм і виконано розрахунок сумарної похибки $\vec{\Delta}_n$ (13) циліндричної поверхні.

Рис. 8. Твірні 1, 2 поверхні обертання, яка охоплює параметри потоку заготовок і деталей а; похибка твірної деталі б

Рис. 9. Траєкторія переміщення осі деталі при шліфуванні відомим в і новим з способами

На базі аналізу частинних 3D моделей розроблено способи безцентрового глибинного шліфування циліндричних та сферичних поверхонь, в яких підвищення продуктивності і точності забезпечено за рахунок стабілізації положення при русі центрів сфер і осі обертання заготовок циліндричних деталей. Розроблено алгоритми і програми комп'ютерного розрахунку раціональних форм повідного і шліфувального кругів залежно від геометричних параметрів оброблюваної деталі, заготовки і припуску, що знімається. Також розроблено спосіб двостороннього шліфування торців циліндричних деталей зі схрещеними осями, де вперше на торцях кругів виконують формоутворювальні ділянки, які при вході заготовок в зону шліфування не беруть участі в знятті припуску, що підвищило точність обробки і стійкість кругів.

Четвертий розділ присвячено особливостям шліфування торців циліндричних пружних стежків на прикладі заточування голчастої гарнітури робочих валиків і барабанів текстильних машин, де доведено вплив напряму результуючої швидкості різання на якість обробки поверхні. Величина задирок на голках не перевищує 0,02 мм, коли при чорновому шліфуванні кут схрещування осей $\alpha_p = 90^\circ$, а при чистовому $\alpha_p = 0^\circ$ (рис. 11).

Для визначення допустимих відхилень кутів φ_T і ψ_T (рис. 10) схрещування осей OZ барабана 2 і O_{II}Z_{II} ролика 1, обтягнутого абразивною стрічкою, була розроблена методика, яка використовується у виробничих умовах підприємства «ЧЕКСІЛ-Аріадна». Алгоритм розрахунку допустимих

кутів схрещування, розроблений за допомогою модуля точності формоутворення $S_{\varphi_T \cdot \psi_T \cdot \delta_T}^T$, приведений на рис. 10, б. Дана методика дозволяє розраховувати допустимі зміщення ΔX і ΔY (рис. 10, а) установки інструмента 1 при його монтажі на агрегаті. Знаючи ці зміщення, визначаємо максимальну похибку $\Delta_{IO_{max}}$ (рис. 10, а) форми твірної (сідлоподібність, конусоподібність).

Для зняття задирок, одержаних при шліфуванні циліндричної голчастої поверхні периферією круга (табл., 2), розроблено новий спосіб фінішної обробки (пат. України № 10062), в якому круг закріплюється під кутом до осі обертання шпинделя, паралельного осі оброблюваної голчастої поверхні. За один оберт круга його бокові поверхні знімають задирки 8 (рис. 11) на бокових поверхнях голок.

а

б

Рис. 10. Схема шліфування (а) і алгоритм розрахунку (б) допустимих кутів схрещування осей чесального барабана і абразивного інструмента

У табл., 3 показано, розроблений новий спосіб (заявка на винахід 200509613) однопрохідного глибинного шліфування периферією і торцем циліндричного круга 1 голчастої поверхні 3 робочих валиків 2 на установці, виконаній на базі круглошліфувального верстата, де здійснюється як вирівнювання голчастої поверхні гарнітури торцем круга після її намотування, так і чистове шліфування периферією круга. Вона здійснює формоутворення циліндричної голчастої поверхні в чистовому режимі, де припуск, що знімається, залежить від кута повороту ψ круга 1 відносно осі $O_u Y_u$, перпендикулярної до осі обертання деталі. Модульна 3D модель оброблюваної циліндричної голчастої поверхні приведена в табл., 3.

На рис. 11 показано новий спосіб шліфування барабанів і валиків 1 текстильних машин торцем 3 шліфувального круга 4 (заявка на винахід 200509614). Однією з переваг є те, що він виключає геометричну похибку (сідлоподібність 5, рис. 10, а) твірної 2 барабана і валика 1, яка властива при шліфуванні периферією круга (рис. 10). Другою проблемою при заточуванні є виникнення задирок 8 на голках 6, напрям яких збігається з вектором результуючої швидкості різання $\vec{V}_p$ (рис. 11). Заточування торцем круга дає можливість керувати напрямом цього вектора, а отже, і напрямом задирки. При чорновому шліфуванні вісь шліфувального круга переміщують у вертикальній площині на величину, що забезпечує напрям результуючої швидкості $\vec{V}_p$ і задирки 8 паралельний

Рис. 11. Схема шліфування голчастої поверхні торцем круга осі барабана (рис. 11, а), де $\alpha_p = 90^\circ$ у точці В (рис. 11).

При реверсі осьової подачі $\vec{S}_q$, також положенням осі 5 обертання шліфувального круга 4, у вертикальній площині, на верстаті з ЧПК забезпечується напрям результуючої швидкості $\vec{V}_p$ і задирки 8 паралельний осі 7 барабана 1 в протилежну сторону (рис. 11, б), але за рахунок деформації голки у напрямі осьової подачі $\vec{S}_q$ задирка залишається в середній частині її торцевої поверхні і не обриває шерстяні нитки при прочісуванні (рис. 11, б).

При чистовому шліфуванні керуванням напрямом результуючої швидкості різання $\vec{V}_p$ (рис. 11) в точці B_1 , кут $\alpha_p = 0$ добиваються необхідного вістря голки і допустимої величини задирки. Модульна 3D модель оброблюваної голчастої поверхні торцем круга приведена в табл., 4, де X_c, Y_c, Z_c координати $O_u X_u Y_u Z_u$ інструмента в системі $OXYZ$ координат деталі.

Для підвищення продуктивності шліфування запропоновано новий спосіб (заявка на винахід № 200509717), де формоутворення голчастої поверхні здійснюється двома кругами, що обертаються назустріч один одному. Перший з них у напрямі осьової подачі $\vec{S}_q$ забезпечує напрям результуючої швидкості різання $\vec{V}_p$, приведений на рис. 11, а, а другий у протилежному напрямі (рис. 11, б).

В табл., 9 міститься інформація про новий спосіб фінішного заточування барабанів і валиків торцями брусків (заявка на винахід № 200509718), який за рахунок кінематики заточування перешкоджає виникненню задирок на голках. Для цього необхідно, щоб за час контакту бруска з кожною голкою він робив не менше одного оберту відносно нормалі до твірної. Приведена модульна 3D модель оброблюваної голчастої поверхні барабана і система зв'язків, яка необхідна для її опису.

Розроблено методику визначення максимально допустимих кутів схрещування осей деталі та інструмента при шліфуванні циліндричних голчастих поверхонь методом копіювання, а також нові способи заточування, які забезпечують необхідну якість.

У п'ятому розділі доведено доцільність шліфування методом копіювання торових і гвинтових поверхонь з керованим кутом схрещування осей, що дає змогу регулювати профіль формоутворювальної ділянки круга, метод вибору якого охоплений загальним підходом:

1. Інструментальна поверхня шліфувального круга 1 (рис. 12, а) визначається не тільки геометричними параметрами деталі 2 з радіусом жолоба ρ , але і заготовки $\rho_{\zeta} = \rho - \delta$, де δ – припуск, що знімається. При цьому радіус ρ_k профілю інструментальної поверхні в осьовому перетині повинен бути менше радіуса профілю заготовки ρ_{ζ} з урахуванням зміщення припуску δ в осьовій площині заготовки.

2. Зняття припуску δ здійснюється за рахунок узгоджених двох рухів – поперечного і синхронного з ним кутового, відносно прямої перпендикулярної до осей обертання деталі 2 і інструмента 1 (табл., 6), при цьому кінцеве кутове положення ψ_{max} повинно відповідати його положенню при визначенні інструментальної поверхні.

Це забезпечило величину врізання, рівну еквідистантно розташованому припуску δ з урахуванням його зміщення, глибину різання і умови шліфування постійними вздовж профілю, а зняття абразиву при правках зменшилося в 2 і більше разів залежно від геометричних параметрів деталі, що підвищило продуктивність і точність обробки і забезпечило раціональне використання абразиву.

Розроблено модульну 3D модель оброблюваної торової поверхні і систему зв'язків для її описання (табл., 5). При цьому запропонована 3D модель описує не тільки процес формоутворення, але й зняття припуску δ . Поточне значення параметра y в модулі формоутворення $\tilde{N}^{\delta}$ (табл., 5) в процесі зняття припуску дорівнює

$$y = y_c + t_b + \delta + t_{\dot{E}_{in}}, \quad (16)$$

де y_c – відстань між осями круга 1 і деталі 2 при формоутворенні; t_b – поперечне переміщення круга 1, обумовлене зсувами припуску δ ; $t_{\dot{E}_{in}}$ – додаткова подача круга, яка компенсує знос $\dot{E}_{in}$ (12) його профілю в процесі зняття припуску δ .

На рис. 12, а представлено новий спосіб безцентрового шліфування (пат. України № 11073) торових поверхонь внутрішніх кілець вальниць 2 зі схрещеними осями інструмента 1 і деталі 2, з базуванням на жорстких опорах 3 по оброблюваній поверхні з радіусом ρ . При цьому осьова фіксація кільця вальниці 2 в процесі обробки здійснюється по торцю магнітного патрона 4, що обертається.

Рис. 12. Схеми шліфування торових і гвинтових поверхонь

На рис. 12, бведений алгоритм розрахунку раціонального поточного кута орієнтації ψ при шліфуванні торових і гвинтових поверхонь, на базі якого визначені (рис. 12, а) раціональні кути $\psi_{max} = 12^\circ$, $\psi_{min} = 5^\circ$ і лінії контакту круга 1 з деталлю 2, на початку обробки 1 (рис. 12, з) і в кінці обробки 2. Графік залежності кута ψ повороту шліфувального круга від величини припуску δ , який знімається, приведений на рис. 12, д.

На відміну від торових поверхонь, де подача і поворот в процесі зняття припуску здійснюються безперервно, при шліфуванні гвинтових поверхонь поперечна подача і поворот здійснюються

ся в кінці проходу. На рис.12, в показано новий спосіб шліфування внутрішніх гвинтових поверхонь з профілем у вигляді дуги окружності (пат. України № 11740), де дослідженнями 3D моделі (табл., 6) було доведено, що в процесі зняття припуску шліфувальний круг 1 необхідно повертати в сторону, протилежну напрямку гвинтової канавки на кут ψ_{maxn} .

$$\psi_{maxn} = \psi_{max\hat{a}} + 2\varphi, \quad (17)$$

де $\psi_{max\hat{a}}$, ψ_{maxn} – максимально допустимі внутрішнім діаметром D гайки (рис. 12, в) кути схрещування осей в сторону нахилу гвинтової канавки та протилежну їй; φ – кут нахилу гвинтової канавки.

Збільшення кута повороту ψ_{maxn} при синхронній з ним поперечній подачі круга 1 в радіальному напрямі забезпечує зняття більших припусків δ порівняно з поворотом, який збігається з напрямом гвинтової канавки.

На базі аналізу 3D моделей розроблено способи центрового і безцентрового шліфування зовнішніх та внутрішніх торових, а також гвинтових поверхонь, які забезпечують зняття припуску по еквідистантним кривим з постійною глибиною різання і раціональними умовами шліфування вздовж профілю.

У шостому розділі запропоновано нову концепцію поздовжнього шліфування на верстатах з ЧПК циліндричних і криволінійних поверхонь з керованим кутом схрещування осей інструменту і деталі, вибір якого по координаті обробки охоплено загальними принципами:

1. Вісь повороту абразивного круга 1 (рис. 13, а), що перпендикулярна до осі його обертання $O_{II}Z_{II}$, поєднується з нормаллю в опорній точці i оброблюваної поверхні шляхом повороту на кут φ (рис. 13, а, в). Круг 1 з формоутворювальним радіусом R_i переміщується вздовж нормалі в процесі врізання до необхідного розміру ρ_i , контролюваного приладом активного контролю 4. При цьому шліфувальний круг повертається на кут ψ відносно осі OY , який вибирається з умови проходження лінії контакту 3 через точку, яка лежить на торці інструмента. Це забезпечує участь в зніманні припуску δ всієї його периферії.

2. В процесі переміщення Z_{ci} , Y_{ci} (рис. 13, в) шліфувального круга 1 вздовж твірної оброблюваної поверхні компенсація зносу круга здійснюється переміщенням його вздовж нормалі S_{ni} (рис. 13, в) в опорній точці i , що зменшує вплив зносу круга на точність формоутворення. Це підвищує стійкість круга, працюючого в режимі самозаточування, і дає можливість спростити розробку керуючих програм, які тепер не залежать від величини припуску, що знімається, і змін діаметра круга внаслідок зносу. Розроблені модульні 3D моделі, які описують формоутворення циліндричних

в

г

Рис. 13. Схема шліфування криволінійних поверхонь обертання з керованим кутом схрещування осей круга і деталі

поверхонь (табл., 3), криволінійних поверхонь обертання (табл., 7) і поверхонь подвійної кривизни турбінних лопаток (табл., 8). Візуалізація процесу шліфування криволінійної поверхні обертання (рис. 13, б) одержана за допомогою 3D моделі (табл., 7), де 3 – лінія контакту круга 1 з деталлю 2 в процесі формоутворення.

Залежність кута повороту шліфувального круга ψ від припуску δ , що знімається, приведено на рис. 13, г.

а

б

в

Рис. 14. Схема шліфування криволінійних поверхонь обертання охоплювальним інструментом

Розроблено універсальний спосіб шліфування опуклих криволінійних поверхонь обертання методом копіювання на верстатах з ЧПК охоплювальним інструментом і 3D геометричні моделі формоутворення зі схрещеними осями кругів 1 і деталей 2 (рис. 14, а).

На рис. 14, в показано графіки залежностей радіуса осьового перетину деталі ρ_{qi} від координати Z_c і радіуса профілю круга ρ . Аналіз графіків показує, що запропонований спосіб шліфування опуклих криволінійних поверхонь обертання охоплювальним кругом дає можливість високопродуктивної обробки методом копіювання на верстатах з ЧПК шківів плоскоремінних передач (рис. 14, б), формувальних валків трубовацьцевих станів та інших деталей (пат. України № 10623). При $X_c=0$ і $R-\rho \leq R_{qmax}$ здійснюється високопродуктивне і точне шліфування сферичних поверхонь методом перехрещених осей (пат. України № 10828).

Запропонована нова концепція поздовжнього шліфування циліндричних і криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК, яка підвищила стійкість круга та дала можливість спростити розробку керуючих програм.

Сьомий розділ присвячено експериментальному дослідженню нових способів шліфування торцевих, голчастих, неповних сферичних, торових і криволінійних поверхонь, а також їх впровадженню у виробництво.

Експериментальні дослідження нового способу шліфування (пат. України № 10636) поверхонь торців абразивними кругами 1, 5 (рис. 15) здійснювались на стенді, виготовленому на базі верстата моделі 3342АДО. Для вимірювання припуску δ , що знімається, по координаті обробки з двох торців деталі діаметром d був розроблений прилад активного контролю деталі, яка обертається або нерухома. Вперше розроблений і виготовлений датчик, який фіксується на барабані, що подає деталі, сережкою 2, в основу роботи якого закладено зміну індуктивного опору котушки 3 при зменшенні розмірів і маси оброблюваної сталевий заготовки 6, яка знаходиться всередині корпусу 4 котушки індуктивності 3 і виконує роль сердечника. На підставі синхронних вимірювань об'ємів металу, що знімаються, (рис. 16, а) і потужності різання (рис. 16, б) визначені коефіцієнти питомої

Рис. 15. Датчик контролю зняття припуску

потужності шліфування (рис. 16, в) по координаті обробки. Це дало можливість, використовуючи розроблені загальні моделі продуктивності (9) і потужності шліфування (10), визначати локальну, питому, миттєву і середню потужності шліфування.

Аналіз осцилограм припуску, що знімається, і потужності шліфування показує, що калібрувальна ділянка шліфувального круга не бере участі в зніманні припуску. Дослідження круглограм похибки форми торців циліндричних деталей при шліфуванні новим способом показує, що неплоскостність не перевищує 4 мкм, а непаралельність – 5 мкм, що узгоджується з теоретичними дослідженнями, приведеними в 3 розділі. Також були виконані дослідження зносу профілю круга за допомогою оптико-волоконного датчика відстані після обробки 80 деталей. Порівняння одержаних профілограм (рис. 17, а) і розрахункових (рис. 5) показує, що розбіжність не перевищує 5%. На підставі профілограм зносу профілю круга і осцилограм зняття припуску були розраховані коефіцієнти питомого зносу C_{yin} (рис. 17, б), які були використані при розрахунках поточного зносу профілю круга залежно від партії деталей (12).

Рис. 16. Осцилограми зняття припуску (а), потужності (б) і коефіцієнта питомої потужності шліфування (в)

Новий спосіб заточування голчастої поверхні робочих валиків і барабанів текстильних машин торцями двох кругів (заявка на винахід № 200509717) впроваджено на верстаті моделі СПТ, який підвищив продуктивність в 2 рази. Впровадження даного способу на підприємстві «ЧЕКСІЛ-Аріадна» м. Чернігів, забезпечило ефект 162 тис.грн.

а

б

Рис. 17. Профілограма а лінійного і значення б питомого зносів абразивного круга

Спосіб фінішної обробки голчастої поверхні торцями брусків (заявка на винахід № 200509718) використано при виготовленні верстата для заточування текстильних барабанів, який складається з трьох вузлів, з масою кожного до 35 кг, що спрощує його транспортування,

установку і наладку у виробничих умовах на агрегаті для прочісування шерсті. До цих вузлів відносяться: напрямна, шліфувальна головка і пульт керування. Верстат в даний час виготовлено і планується його впровадження в 2006 році. Способи шліфування поверхонь обертання зі схрещеними осями інструмента і деталі (пат. України № 10635, № 10623) та методики розрахунку параметрів настройки верстата впроваджено на підприємствах: «Харківський верстатобудівний завод ХАРВЕРСТ», «Новокраматорський машинобудівний завод», Чернігівському НВО «МАГР» та Прилуцькому заводі «ПОЖСПЕЦМАШ» із загальним економічним ефектом 35300 грн.

Спосіб обробки неповних сферичних поверхонь (пат. України № 10828) впроваджено на Прилуцькому заводі «ПОЖСПЕЦМАШ» з економічним ефектом – 17685 грн.

ВИСНОВКИ

1. Сформульовані і реалізовані наукові положення про те, що цілеспрямоване управління схрещуванням осей абразивних кругів і оброблюваних деталей має потужний потенціал впливу на процеси формоутворення поверхонь, фізико-механічні явища, які відбуваються в зоні шліфування, характер та інтенсивність зносу інструменту, точність і якість обробки деталей.

2. Запропоновано наукове положення про можливість і доцільність вирішення прямої і зворотної задач теорії формоутворення за допомогою тривимірних геометричних моделей, які представлені у вигляді добутку уніфікованих модулів (циліндричного, прямокутного, сферичного). Кожен з модулів являє собою добуток трьох однокоординатних матриць четвертого порядку і має постійне математичне описання не залежно від його функціонального призначення.

3. Розроблена методика управління схрещенням осей абразивного інструмента і оброблюваної деталі, яка є загальною для широкої номенклатури розповсюджених поверхонь (циліндричних, торцевих, сферичних, торових, гвинтових, голчастих, криволінійних). Вона узагальнює низку способів: шліфування з фіксованим положенням однієї деталі, оброблюваної одним інструментом; безцентрове шліфування зі змінним поточним положенням осі оброблюваної деталі; групове шліфування декількох деталей одним інструментом. Методика може бути використана не тільки для нових способів шліфування зі схрещеними, але і для традиційного шліфування з паралельними осями інструмента і деталі.

4. Реалізовано нову концепцію профілювання абразивного інструмента, яка враховує кількість одночасно оброблюваних деталей одним кругом, форми заготовки і деталі, точність її поверхні, цикл шліфування і кут схрещування осей.

5. На базі запропонованої методики управління схрещенням осей абразивного інструменту і оброблюваної деталі розроблена загальна модель продуктивності шліфування для деталей з циліндричними, торцевими, сферичними, голчастими, торовими, гвинтовими і криволінійними поверхнями. Вона дає можливість за однією програмою розраховувати локальну, питому, миттєву і середню продуктивності обробки різних поверхонь. Визначення потужності різання, теплового потоку і зносу профіля круга в залежності від об'єму матеріалу, що зрізається та деформується, здійснюється також на основі аналізу розробленої загальної моделі продуктивності шліфування.

6. Розроблено класифікацію функціонального призначення схрещення осей абразивного інструменту і оброблюваної деталі при шліфуванні різноманітних поверхонь і методику визначення їх точності в залежності від кута схрещення. Вона враховує похибки схеми формоутворення, положення і переміщення вузлів верстата, профілювання інструмента і форми круга в результаті його зносу.

7. Запропонований в роботі принцип модульного 3D моделювання і розроблена на його базі сукупність загальних тривимірних моделей формоутворювальних систем шліфувальних верстатів, інструментальних і оброблюваних поверхонь, процесу зняття припуску і точності формоутворення служать геометричною базою автоматизованих систем проектування і виробництва CAD/CAM технологічного і інструментального призначення.

8. Розроблена в дисертації нова концепція поздовжнього шліфування циліндричних і криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК, коли вісь повороту абразивного круга, перпендикулярна до осі його обертання, поєднується з нормаллю в опорній точці оброблюваної поверхні і при ком-

пенсації зносу круг переміщується вздовж цієї нормалі, підвищила стійкість круга і дала можливість спростити розробку керуючих програм, яка тепер не залежить від величини припуску, що знімається, і змін діаметру круга, а також його профілю внаслідок зносу.

9. Завдяки використанню запропонованої нової концепції профілювання шліфувального, повідного кругів і опорного ножа (для сфер – опорно-повідного диска) досягнуто підвищення продуктивності і точності безцентрового глибинного шліфування циліндричних і сферичних поверхонь, за рахунок забезпечення стабілізації положення центрів сфер і осі обертання заготовок циліндричних деталей в процесі зняття припуску і формоутворення. Розроблені алгоритми і програми комп'ютерного розрахунку раціональних форм повідного і шліфувального кругів залежно від геометричних параметрів оброблюваної деталі, заготовки і припуску, що знімається.

10. Реалізація виявленої частини потенціалу схрещення осей дала можливість підвищити точність, а також зменшити припуск, який знімається по координаті обробки при двосторонньому шліфуванні торців циліндричних деталей за рахунок того, що на торцях кругів виконують формоутворювальні ділянки, які не беруть участі в знятті припуску, а його робоча поверхня на верстатах з ЧПК має профіль у вигляді монотонної опуклої кривої.

11. За рахунок керованого положення осі обертання шліфувального круга у вертикальній площині відносно осі обертання робочого валика досягнуто підвищення точності формоутворення і заточування голчастої циліндричної поверхні при обробці на верстатах з ЧПК торцем інструмента. Це дало можливість регулювати напрям вектора результуючої швидкості заточування, який визначає її якість.

Підвищення продуктивності і якості фінішної обробки голчастої поверхні отримано за допомогою керування схрещенням осей інструменту і деталі, де шліфувальні бруски з круговим поступальним переміщенням за час торкання торця голки роблять не менше одного оберту, що перешкоджає виникненню задирок на оброблюваній поверхні. Точність твірної, порівняно з обробкою на верстатах «Oktir» (Італія) і «Vefama» (Польща), де шліфування здійснюється периферією круга, підвищується завдяки руху торців брусків в площині формоутворення. Це перешкоджає виникненню «сідлоподібності» голчастої поверхні, яка утворюється на відомих верстатах і залежить від непаралельності переміщення циліндричного круга відносно осі барабана. Для впровадження виявленого потенціалу схрещення осей розроблено і виготовлено універсальний пристрій, який можна використовувати як при шліфуванні голчастих поверхонь валиків на стаціонарних верстатах, так і при шліфуванні важких голчастих барабанів на їх робочому місці в агрегаті для прочісування. Для цього вузли пристрою (напрямна, шліфувальна головка, пульт з системою управління) виготовлені з масою не більш 30-35 кг, що поліпшило їх транспортабельність і умови наладки при установці на агрегатах.

12. Запропоновано нову концепцію регулювання кривизни формоутворювальної ділянки круга за рахунок орієнтації його по напрямній лінії, що підвищило продуктивність при шліфуванні методом копіювання на верстатах з ЧПК криволінійних поверхонь барабанів пилорам, шківів ремінних передач, формувальних валків трубовальцевих станів, неповних сферичних поверхонь та інших деталей.

13. Для підвищення продуктивності і точності обробки, а також забезпечення раціонального використання абразиву розроблено новий підхід до центрового і безцентрового шліфування зовнішніх і внутрішніх торових поверхонь валків трубовальцевих станів, шарошок бурових доліт, кілець вальниць, а також гвинтових поверхонь гвинтів і гайок кочення, який полягає в тому, що шліфувальний круг правиться по радіусу меншому, ніж радіус заготовки. Величина врізання більше припуску, який знімається, на величину зносу круга і здійснюється за рахунок узгоджених двох рухів круга – поперечного і синхронного з ним кутового. Це забезпечило зняття припуску по еквідистантним кривим з постійною глибиною різання і раціональними умовами шліфування вздовж профілю. Зняття абразиву при правках зменшилося в 2 і більше разів залежно від геометричних параметрів деталі.

14. Нові способи заточування голчастих поверхонь барабанів і валиків текстильних машин, а також методика визначення допустимих кутів схрещування осей абразивного інструмента і чесального барабана впроваджені на Чернігівському підприємстві «ЧЕКСІЛ-Аріадна», нова технологія

обробки опуклих неповних сферичних поверхонь впроваджена на Прилуцькому заводі «ПОЖСПЕЦМАШ» для обробки кранів пожежних машин, новий спосіб шліфування опуклих криволінійних поверхонь обертання охоплювальним інструментом впроваджений в Чернігівському науково-виробничому об'єднанні «МАГР», нова технологія глибинного шліфування поверхонь обертання з осями, що схрещуються, впроваджена при шліфуванні вальцювальних валків на Харківському заводі верстатобудування «ХАРВЕРСТ» і Новокраматорському машинобудівному заводі. Загальний економічний ефект від впровадження результатів роботи склав більше 360 тис. грн.

Результати і методики дисертації використовуються в начальному процесі на кафедрі металорізальних верстатів та систем Чернігівського державного технологічного університету.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Кальченко В.И., Кальченко В.В., Рудик А.В., Ключниченко В.М. Определение толщины срезаемого слоя при шлифовании ориентированным инструментом вероятностным методом // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ», 1998. – Вип. 33. – С. 184 – 187. Здобувачу належить рівняння для визначення товщини шару, що зрізається, імовірнісним методом.
2. Кальченко В.В. Заточка игольчатой поверхности валиков текстильных машин торцом ориентированного инструмента // Високі технології в машинобудуванні. – Харків, 1998. – С. 139 – 141.
3. Кальченко В.В. Определение геометрической погрешности шлифования торцов профилированным и ориентированным инструментом // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Машинобудування. – К.: НТУУ «КПІ», 1999. – Вип. 37. С. 138 – 142.
4. Кальченко В.В. Определение производительности двухстороннего шлифования торцов цилиндрических деталей профилированными и ориентированными кругами // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 53. – С. 66 – 71.
5. Кальченко В.В. Глубинное шлифование игольчатой поверхности ориентированным кругом // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ, – 1999. – Вып. 54. – С. 130 – 134.
6. Кальченко В.В. Определение мощности торцового шлифования профилированным и ориентированным кругом // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ, – 1999. – Вып. 55. – С. 145 – 147.
7. Кальченко В.В., Пасов Г.В. Визначення температури на торцях циліндричної деталі при двосторонньому шліфуванні // Вісник Житомирського інженерно-технологічного інституту. Технічні науки. – Житомир: ЖІТІ, – 1999. – Вип. 11. – С. 72–76. Здобувачу належить методика розрахунку температури на торцях циліндричних деталей, які обертаються чи не обертаються в процесі обробки.
8. Кальченко В.В., Пасов Г.В., Лясота В.Ю. Активний контроль зняття припуску при шліфуванні торців циліндричних деталей, які не обертаються // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький: Технологічний університет Поділля, 1999. – Вип. №3. – С. 165-167. Здобувачу належать методика та рівняння для визначення лінійного зносу, а також швидкості елементарного зносу при обробці деталей, які обертаються під час шліфування.
9. Кальченко В.В. Визначення потужності шліфування орієнтованим інструментом // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 1999. – № 9. – С. 120 – 126.
10. Кальченко В.В. Определение температур на торцах деталей при шлифовании профилированными и ориентированными кругами // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 1999. – Вип. № 9. – С. 222 – 226.
11. Кальченко В.В. Влияние профиля ориентированного круга на производительность шлифования торцов // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 2000. – Вип. № 100. – С. 104 – 107.

12. Кальченко В.В. Підвищення продуктивності шліфування торців циліндричних деталей // Вісник технологічного університету Поділля. Хмельницький: 2000, №3. Ч.2(22) – С. 29 – 35.
13. Кальченко В.В. Износ и контроль профилей кругов при двухстороннем шлифовании торцов // Високі технології в машинобудуванні. – Харків, 2000.– Вип.1(3). – С. 139 –141.
14. Кальченко В.В. Повышение производительности двустороннего шлифования торцов за счет комбинированной правки абразивных кругов // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 2000. – Вип. № 110. – С. 107–113.
15. Кальченко В.В. Профилирование и износ ориентированного круга при заточке игольчатой поверхности // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 56. – С. 82 – 86.
16. Кальченко В.В. Формообразование торцов деталей ориентированным инструментом // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 57. – С. 100 – 104.
17. Кальченко В.В. Заточка игольчатой поверхности профилированными и ориентированными кругами // Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета им. Н.Е.Жуковского (ХАИ). Выпуск 14. – Харьков: Государственный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2000. – С. 265 – 268.
18. Кальченко В.В., Пасов Г.В. Визначення температур на торцях циліндричної деталі при двосторонньому шліфуванні профільованими і орієнтованими кругами // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2000. – №10. – С. 13 – 18. Здобувачу належить методика для визначення миттєвої і локальної температур на будь якій ділянці оброблюваного торця циліндричної деталі в процесі переміщення її відносно круга.
19. Кальченко В.В., Рудик А.В., Пасов Г.В., Лясота В.Ю. Заточення торцевих фрез на верстатах з ЧПК з урахуванням зносу // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2001. № 12. – С. 89 – 95. Здобувачу належить методика визначення зносу шліфувального круга та температури в зоні обробки при шліфуванні торців циліндричних деталей, наприклад голок на чесальному барабані.
20. Кальченко В.В. 3D моделирование обрабатываемых поверхностей при шлифовании со скрещающимися осями кругов и деталей // Високі технології в машинобудуванні. – Харків, 2001. – Вип.№1(4) – С.149-153.
21. Кальченко В.В. Общая (3D) модель формообразующих систем станков при шлифовании поверхностей со скрещающимися осями кругов и деталей // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2001. – Вып. 59. – С.118–123.
22. Кальченко В.В. Трехмерное геометрическое моделирование погрешности шлифования поверхностей со скрещающимися осями кругов и деталей // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2001. – Вып. 60. – С. 90 – 95.
23. Кальченко В.В. Общая трехмерная (3D) модель поверхностей кругов при шлифовании со скрещающимися осями инструмента и деталей // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2001. – №6. – С. 114–118.
24. Кальченко В.В. Определение температуры на торцах иглол при шлифовании со скрещающимися осями круга и рабочего валика // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем. – Краматорськ: ДДМА, 2001. – Вип. 11.– С. 156 – 161.
25. Кальченко В.В., Пасов Г.В., Рудик А.В., Лясота В.Ю. Обчислення керуючих координат шліфувального круга при різних схемах його руху // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2001. – Вип. № 13. – С. 73 – 77. Здобувачу належить спосіб шліфування криволінійних поверхонь прокатних валків з постійною глибиною різання по координаті обробки та математичне забезпечення для розрахунку керуючих програм при обробці на верстатах з ЧПК.
26. Кальченко В.В. Тривимірне моделювання зняття припуску і формоутворення при шліфуванні торців зі схрещеними осями кругів та деталей // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2001. - Вип. № 2. – С.96 – 100.

27. Кальченко В.В. Повышение точности шлифования торцов пружин демпфера диска сцепления // *Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал* – Харків: НТУ «ХПІ», 2000. – Вип. 1. – С. 192–198.

28. Кальченко В.В. 3D моделирование профилирования круга, съёма припуска и формообразования при шлифовании наружных торцовых поверхностей со скрещивающимися осями инструмента и детали // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2002. – № 9. – С. 114 – 118.

29. Кальченко В.В., Рудик А.В. Шліфування криволінійних поверхонь обертання абразивним інструментом з кутовою орієнтацією на верстатах з ЧПК // *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*. – Чернігів: ЧДТУ, 2002. – Вип. № 15. – С. 69 – 74. Здобувачу належить методика розрахунку раціонального положення лінії контакту деталі та інструмента при шліфуванні зі схрещеними осями в залежності від припуску, що знімається.

30. Кальченко В.В. 3D моделирование шлифования винтовых поверхностей на станках с ЧПУ с управляемым углом скрещивания осей круга и ходового винта качения // *Резание и инструмент в технологических системах*. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2002 – Вип. 61. – С.84 – 89.

31. Кальченко В.В., Пасов Г.В., Лясота В.Ю. Визначення топографії шліфувального круга на верстаті // *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*. – Чернігів: ЧДТУ, 2002. – Вип. №18. – С.31 – 36. Здобувачу належить методика розрахунку допустимого зносу шліфувального круга при обробці партії деталей.

32. Кальченко В.В. 3D моделирование скоростного и глубинного шлифования криволинейных поверхностей вращения на станках с ЧПУ со скрещивающимися осями круга и детали // *Резание и инструмент в технологических системах*. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2002. – Вип.62. – С.59 – 65.

33. Кальченко В.В. Шліфування внутрішніх торцових поверхонь на верстатах з ЧПК зі схрещеними осями зовнішнього кільця шарикопідшипника і круга // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2002. – Вип.2. – С.70 – 74.

34. Кальченко В.В. Шлифование торцовых поверхностей с управляемым углом скрещивания осей круга и детали // *Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем*. – Краматорськ: ДДМА, 2002. – Вип.12.– С.226 – 233.

35. Кальченко В.В. Трёхмерное моделирование шлифования кольцевого желоба переменного профиля на станке с ЧПУ со скрещивающимися осями круга и трубопрокатного валка // *Високі технології в машинобудуванні*. – Харків, – 2002. – Вип.1, (5). – С.147 –153.

36. Кальченко В.В. Трёхмерное моделирование шлифования винтовой канавки на станке с ЧПУ со скрещивающимися осями гайки качения и круга. // *Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2002. – №1. – С. 192 – 198.

37. Кальченко В.В. 3D моделирование глубинного шлифования поверхностей вращения на станках с ЧПУ со скрещивающимися осями круга и валка. // *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»* Машинобудування. – К.: НТУУ “КПІ”, 2002. – Вип. 43. – С. 123 –126.

38. Кальченко В.В. Шліфування опуклих торцових поверхонь на верстатах з ЧПК з перехрещеними осями круга і деталі // *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – Вип. 12. – С. 261 –267.

39. Кальченко В.В. Шлифование вогнутых и выпуклых криволинейных поверхностей вращения на станках с ЧПУ одним инструментом со скрещивающимися осями его и детали // *Резание и инструмент в технологических системах*. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2003. – Вип. 65. – С.65-72.

40. Кальченко В.В. Безцентрове поздовжнє шліфування циліндричних поверхонь зі стабілізацією положення вісі обертання деталей. // *Вісник Тернопільського державного технічного університету*, 2003. – Том 8. – № 3. – С. 83 – 90.

41. Кальченко В.В. Общая трехмерная (3D) модель производительности шлифования поверхностей со скрещивающимися осями инструментов и деталей. // *Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2003. – №1, – том 2. – С. 238 – 243.

42. Кальченко В.В., Рудик А.В. Моделювання процесу шліфування поверхонь обертання інструментом, орієнтованим навколо головної нормалі на верстатах з ЧПК // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2004. – Вип. № 21. – С.68 – 73. Здобувачу належить 3D модель похибки профілю заготовки в залежності від кута перехрещення осей під час зняття припуску.

43. Кальченко В.В., Рудик А.В. Теоретичні дослідження товщини шару, який зрізається різальною кромкою при шліфуванні орієнтованим абразивним інструментом // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2005. – Вип. №22. – С.67 – 76. Здобувачу належить методика визначення товщини шару, що зрізається під час обробки з перехрещеними осями деталі та інструмента.

44. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Рудик А.В., Венжега В.І. Контроль зняття припуску з деталей, які обертаються під час обробки, на двосторонніх торцешліфувальних верстатах // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005 – Вып. 68.– С.241 – 246. Здобувачу належить методика контролю поточного зняття припуску при одночасній обробці двох торців деталей, що обертаються або не обертаються під час обробки на двосторонніх торцешліфувальних верстатах.

45. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Рудик А.В., Венжега В.І. Определение составляющих силы резания при шлифовании ориентированным абразивным инструментом // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2005 – Вып. 69.– С. 105 – 110. Здобувачу належить методика визначення сил різання при шліфуванні поверхонь деталей з урахуванням не лише ріжучих, а й деформуючих зерен.

46. Кальченко В.В. Модульне 3D моделювання формоутворюючих систем шліфувальних верстатів, інструментів та оброблюваних поверхонь // Вісник Тернопільського державного технічного університету, 2005. – Том 12. – № 2. – С. 68 – 79.

47. Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10062 В24В МКл⁷ 15/38 “Спосіб заточування голчастої поверхні барабанів і валиків текстильних машин” / В.І. Кальченко, В.В. Кальченко, С.І. Фень, – 2003043249. Опубл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. Здобувач запропонував орієнтацію положення двох шліфувальних кругів відносно осі обертання з метою зменшення дисбалансу.

48. Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10636 В24В МКл⁷ 5/04 “Спосіб одночасного шліфування двох торців циліндричних деталей” / В.В. Кальченко, О.В. Жадан, – 200505125. Опубл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. Здобувач запропонував виділити на торцях шліфувальних кругів калібруючі ділянки, які не беруть участь в процесі зняття припуску.

49. Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10635 В24В МКл⁷ 5/04 “Спосіб глибинного шліфування поверхонь обертання” / В.В. Кальченко, А.В. Ларін, – 200505124. Опубл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. Здобувач запропонував концепцію розташування шліфувального круга та його орієнтацію відносно нормалі.

50. Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10623 В24В МКл⁷ 5/04 “Спосіб шліфування випуклих криволінійних поверхонь обертання” / В.В. Кальченко, О.М. Ніколенко, – 200505081. Опубл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. Здобувач запропонував методику регулювання положення точки контакту круга і деталі в осьовій площині.

51. Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10545 В24В МКл⁷ 11/02 “Спосіб безцентрового шліфування сферичних поверхонь” / В.В. Кальченко, А.В. Рудик, О.С. Сластьоненко, – 200504515. Опубл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. Здобувач запропонував виділити на торцях шліфувальних кругів калібруючі ділянки, які не беруть участь в процесі зняття припуску.

52. Деклараційний патент України на винахід (корисну модель) № 10828 В24В МКл⁷ 1/00 “Спосіб обробки неповних сферичних поверхонь” / В.В. Кальченко, А.В. Рудик, Є.О. Івашко, – 200506710. Опубл. 15.11.2005р. Бюл. № 11. Здобувач запропонував методику розташування осей обертання круга і деталі, яка забезпечує максимальну продуктивність обробки.

53. Кальченко В.В. Влияние профилей кругов и их износа на рабочий цикл двустороннего шлифования торцов // Материалы докладов научно-технической конференции «Технология маши-

ностроения: проблемы и перспективы» (2-6 октября 2000г. Севастополь) - Севастополь: СевГТУ, 2000. – С.35 – 41.

54. Кальченко В.В. Шліфування кільцевого жолоба на верстатах з ЧПК з перехресними осями круга і деталі // Інформаційні технології: Наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я.: Тези доповідей міжнародн. науково-прикладної конференції (16-17 травня 2002 р. Харків): - Харків: НТУ «ХПІ», 2002.- С. 109 - 110.

55. Кальченко В.В. Шлифование выпуклых криволинейных поверхностей вращения на станках с ЧПУ охватывающим инструментом со скрещивающимися осями его и детали // Высокие технологии: тенденции развития, материалы XIII международного научн.-техн. семинара (12-17 сентября 2003г, Харьков - Алушта) Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. – С. 99 – 104.

56. Кальченко В.В. Шліфування опуклих торових поверхонь на верстатах з ЧПК з перехресними осями круга і деталі // Машинобудування та металообробка -2003.: Тези доповідей Першої Міжнародної науково-технічної конференції (17-19 квітня, Кіровоградський держ.техн.ун-т.) – Кіровоград: КДТУ, 2003.–№12.–С.82– 84.

57. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Рудик А.В., Венжега В.І. Контроль зняття припуску під час обробки, на двосторонніх торцешліфувальних верстатах // Высокие технологии: тенденции развития.: Материалы XIV международного научно-технического семинара (12-17 сентября 2005 г. Харьков-Алушта) – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – С. 5 – 7. Здобувач запропонував методику вимірювання об'єму припуску, який знімається з двох торців одночасно.

АНОТАЦІЇ

Кальченко В.В. Наукові основи ефективного шліфування зі схрещеними осями абразивного інструмента та оброблюваної деталі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2006.

У дисертації вирішено науково-технічну проблему підвищення ефективності абразивного шліфування різноманітних поверхонь за рахунок раціонального профілювання та перехрещення осей інструмента і деталі в процесі зняття припуску і формоутворення. Вперше на базі трьох модулів розроблено ієрархію загальних 3D геометричних моделей формоутворювальних систем верстатів, процесу зняття припуску, формоутворення, інструментальних і оброблюваних поверхонь. Запропоновано нову концепцію профілювання абразивного інструмента і відповідну загальну 3D геометричну модель, які враховують кількість одночасно оброблюваних деталей одним кругом, форму заготовки і оброблюваної деталі, цикл шліфування та кут схрещення осей інструмента і деталі. Теоретично обґрунтовано новий принцип поздовжнього шліфування циліндричних і криволінійних поверхонь на верстатах з ЧПК з компенсацією зносу шліфувального круга. Вперше визначено і регламентовано вплив стабілізації положення центрів сфер і осей обертання циліндричних деталей на геометричну точність при безцентровому поздовжньому шліфуванні. Розроблено нову концепцію визначення потужності різання, теплового потоку та зносу профілю круга на базі загальної моделі продуктивності шліфування в залежності від об'ємів металу, що зрізається і деформується. На базі аналізу модульних 3D моделей розроблено та впроваджено у виробництво нові способи шліфування.

Ключові слова: шліфування, профілювання, перехрещення осей, модуль, 3D геометричні моделі, формоутворення, продуктивність.

Кальченко В.В. Научные основы эффективного шлифования со скрещивающимися осями абразивного инструмента и обрабатываемой детали. – Рукопись.

Диссертация 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, 2005.

В диссертации решена научно-техническая проблема повышения эффективности абразивно-

го шлифования разнообразных поверхностей за счет рационального профилирования и скрещивания осей инструмента и детали в процессе снятия припуска и формообразования. Впервые на базе трех модулей разработаны общие 3D геометрические модели формообразующих систем шлифовальных станков, их точности, процесса съема припуска, формообразования, инструментальных и обрабатываемых поверхностей. Предложена новая схема шлифования со скрещивающимися осями абразивного инструмента и обрабатываемой детали, которая является общей для широкой номенклатуры распространенных формообразуемых поверхностей (цилиндрических, торцевых, сферических, торовых, винтовых, игольчатых, криволинейных). Новая схема обобщает не только объекты обработки, но и многие способы шлифования: шлифование с фиксированным положением одной детали, обрабатываемой одним инструментом; бесцентровое шлифование с переменным текущим положением оси обрабатываемой детали; групповое шлифование нескольких деталей одним инструментом. Схема может быть использована не только для способов со скрещивающимися осями, но и для традиционного шлифования с параллельными осями при расчете допускаемых отклонений взаимного положения осей, обеспечивающих требуемую точность. Разработана иерархия общих модульных 3D моделей и на их базе частные модели, описывающие формообразующие системы шлифовальных станков при правке абразивных кругов и при шлифовании со скрещивающимися осями цилиндрических, торцевых, сферических, игольчатых, торовых, винтовых, криволинейных и других поверхностей. Эти модели представляют собой произведение унифицированных модулей, а каждый из них – произведение трех однокоординатных матриц четвертого порядка. Это упрощает расчеты при решении прямой и обратной задач теории формообразования. Предложена новая концепция профилирования абразивного инструмента и соответствующая общая 3D геометрическая модель, которые учитывают количество одновременно обрабатываемых деталей одним кругом, форму заготовки и обрабатываемой детали, цикл шлифования и угол скрещивания осей инструмента и детали. Впервые определено и регламентировано влияние стабилизации положения центров сфер и оси вращения цилиндрических деталей, в процессе съема припуска и формообразования, на геометрическую точность при бесцентровом продольном шлифовании. Разработана новая концепция определения мощности резания, теплового потока и износа профиля круга на базе общей модели производительности шлифования в зависимости от объемов срезаемого и деформируемого металла. На базе анализа модульных 3D моделей разработаны и внедрены новые эффективные способы шлифования цилиндрических, торцевых, сферических, игольчатых, торовых, винтовых и криволинейных поверхностей со скрещивающимися осями инструмента и детали.

Ключевые слова: шлифование, профилирование, скрещивание осей, модуль, 3D геометрические модели, формообразование, производительность.

Kalchenko V.V. Scientific bases of the effective polishing with the crossing axes of abrasive instrument and processed detail. – Manuscript.

Thesis for doctor's degree in technical sciences on specialty 05.03.01 – machining processes, machines and tool. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2005.

The thesis resolves the scientific and technical problem how to increase the efficiency of the various surfaces abrasive polishing due to rational profiling and crossing the axes of the instrument and the detail in the process of machining allowance removal. General 3D geometrical models of the polishing machine-tools shaping systems, their accuracy, process of machining allowance removal, shaping, instrumental and processed surfaces have been developed based on 3 modules for the first time. There has been developed the hierarchy of the general module 3D models and on their base particular models, describing the form-building systems of polishing machines in the process of abrasive discs correction and crossing axes polishing with the of cylindrical, butt end, spherical, needle-shaped, smooth, spiral, curvilinear and other surfaces. These models represent the uniform modules product, and each of them is a product of three one-coordinate matrices of the fourth order. It simplifies calculations in solving primal and invert problems of the form-building theory. A new conception of abrasive instrument profiling and a proper general 3D geometrical model have been offered. They take into account a number of parts, simultaneously processed with one disk; a blank form and a form of a processed detail; a polishing cycle and a crossing angle of instrument and part axes. For the first time there has been defined and regulated a stabilization effect of

sphere center position and cylindrical parts rotation axis in the process of machining allowance removal and form-building on geometrical accuracy in case of centreless polishing longitudinal polishing. There has been developed a new determination methodology of cutting capacity, heat flow and disk profile wear based on a general model of polishing output depending on the volume of cutting and deforming metal. Based of the module 3D models analysis there have been developed and introduced new effective polishing methods of cylindrical, butt end, spherical, needle-shaped, spiral and curvilinear surfaces with a crossing angle of instrument and part axes.

Key words: polishing, profiling, crossing of axes, module, 3D geometrical models, form-building, productivity.