

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

**Мироненко Олександр Леонідович**

УДК 621.9.042

**УДОСКОНАЛЮВАННЯ 3D МОДЕЛЕЙ ФОРМОУТВОРЕННЯ РІЗАННЯМ  
СПЕЦІАЛЬНИХ КОНІЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛЕС  
ДЛЯ ДВОПАРАМЕТРИЧНИХ ПЕРЕДАЧ**

Спеціальність 05.03.01 - процеси механічної  
обробки, верстати й інструменти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2004

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі "Різання матеріалів та різальні інструменти" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Перепелиця Борис Олексійович,**  
Національний технічний університет "Харківський  
політехнічний інститут", професор кафедри "Різання  
матеріалів та різальні інструменти".

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Дерев'янченко Олександр Георгійович,**  
Одеський національний політехнічний університет, завідувач  
кафедри "Технологія конструкційних матеріалів і  
матеріалознавство".

кандидат технічних наук, доцент  
**Тарасюк Анатолій Петрович ,**  
Українська інженерно - педагогічна академія (м. Харків),  
перший проректор.

Провідна установа: Донбаська державна машинобудівна академія  
Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

Захист відбудеться 27 січня 2005 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 в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий 24 грудня 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О.А.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасне машинобудування вимагає створення спеціальних передаточних механізмів чи окремих зубчатих зачеплень з розширеними функціональними можливостями. Розвиток зубчастих зачеплень в даний час характеризується двома напрямками: вдосконалення традиційних і створення нових типів і видів передач.

На основі існуючих традиційних зубчастих передач не завжди вдається синтезувати прості і надійні регульовані приводи, оскільки по своїй геометричній природі вони є однопараметричними і не мають змоги здійснювати регулювання за декількома параметрами. Тому виникла проблема створення нових двопараметричних зубчастих зачеплень, які могли б не тільки здійснювати безперервну передачу зусилля, але і одночасно змінювати інші параметри, наприклад, міжцентрову відстань, кути схрещування, передаточне відношення.

Основою двопараметричних передач є зубчасті колеса з постійним нормальним кроком і еквідістантними лініями зубів на різних початкових поверхнях обертання. Робочі поверхні таких колес мають ускладнену структуру, і їх формоутворення вивчено недостатньо. Це стримує створення і впровадження нових двопараметричних зубчастих механізмів.

Тому теоретичне дослідження, моделювання та алгоритмізація відомих і можливих процесів формоутворення колес з еквідістантними зуб'ями в комплексі з їх геометричним конструюванням є актуальною науковою задачею, що має важливе практичне значення.

Дану дисертаційну роботу спрямовано на вирішення цієї актуальної задачі стосовно конічних колес з еквідістантними зуб'ями.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження дисертаційної роботи було пов'язано з виконанням держбюджетною науковою тематики кафедри "Різання матеріалів та різальні інструменти" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за темами: ДР №0100U001083 "Розробка теорії тривимірного (3D) геометричного моделювання ріжучих інструментів і процесів формоутворення поверхонь на основі багатопараметричних відображень афінного простору" (1999-2001 р.р.); ДР №0102U000976 "Створення теорії і методики моделювання процесів різання в тривимірному (3D) просторі на основі багатопараметричних афінних відображень"(2002-2004 р.р.). Автор дисертації був виконавцем окремих розділів держбюджетних тем.

### **Мета і задачі дослідження.**

Мета дослідження - удосконалити процеси формоутворення конічних зубчастих колес з постійним нормальним кроком для спеціальних двопараметричних зачеплень.

Задачі дослідження:

1. Провести аналіз геометричних особливостей ліній зубів і бічних поверхонь конічних зубчастих колес з постійним нормальним кроком з метою врахування їх специфіки при моделюванні процесу формоутворення. Знайти межові співвідношення між конструктивними параметрами і їх граничні значення, що визначають область існування конічних зубчастих колес з еквідістантними зубами.

2. Стосовно досліджуваних зубчастих колес конкретизувати загальні положення теорії формоутворення щодо методі копіювання, однопараметричного обгинання і обкатки.

3. Визначити і аналітично описати формоутворювальні рухи, необхідні і достатні для обробки різанням конічних зубчастих колес з постійним нормальним кроком. Ввести додатковий рух довороту інструмента навколо нормалі до лінії зуба. Перевірити та підтвердити математичні описи обчислювальними експериментами.

4. Застосувати методику багатопараметричних відображень і узагальнену структуру верстатного зачеплення стосовно розробки 3D моделей формоутворення і математичних описів, що містяться в них.

5. Виявити загальні і часткові ознаки розроблених 3D моделей і на базі їх скласти класифікацію схем формоутворення. Розробити практичні рекомендації по використанню результатів роботи.

*Об'єкт дослідження* - спеціальні конічні зубчасті колеса з еквідістантними лініями зубів.

*Предмет дослідження* - формоутворення поверхонь зубів вказаних зубчастих колес при обробці різанням.

*Методи дослідження* - наукові положення теорії зубчастих зачеплень, теорії формоутворення різанням, апарат багатопараметричних відображень простору, узагальнена структура відображень для робочих і верстатних зубчастих зачеплень, теоретичні принципи геометричного 3D моделювання. Перевірка одержаних результатів та їх подальший аналіз виконувався із застосуванням сучасних програмних засобів і тривимірної візуалізації.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

1. Визначено області існування конічних зубчастих колес з еквідістантними зуб'ями. Одержано граничні зв'язки між параметрами початкової поверхні, лінії зуба і ширини вінця, що обмежують цю область.

2. Одержано описи кінематики формоутворення, що засновані на методиці відображень. Доведено необхідність додаткового довороту інструмента навколо осі, перпендикулярної до початкового конусу.

3. На основі теорії обгинаючих одержано конкретні математичні описи умов лінійного і точкового торкання інструментальної і формоутворюваної поверхонь.

4. Розроблено нові 3D моделі попереднього формоутворення методами копіювання фасонними різцями та однопараметричного обгинання фасонними фрезами і шліфувальними кругами. Моделі наведено в структурному, математичному і параметричному записах.

5. За допомогою відомої узагальненої структури верстатних зачеплень одержано локальне узагальнення геометричних моделей формоутворення щодо конічних колес з еквідістантними зубами і враховує їх специфіку. Показано, що найзагальнішою є модель з двопараметричним обгинанням і точковим миттєвим торканням поверхонь. Ця модель відповідає обкачувальному остаточному формоутворенню.

6. Складено теоретично обґрунтовану класифікацію схем формоутворення.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

1. Теоретичні результати роботи забезпечують повний набір інформації, необхідної для практичної реалізації процесів формоутворення конічних колес з еквідістантними зуб'ями: кінематичну схему, особливості і параметри початкового положення заготовки та інструменту, кількість рухів і функціональні зв'язки між їх параметрами.

2. Для попереднього формоутворення рекомендується обробка фасонними різцями, фасонними фрезами і фасонними шліфувальними кругами, для остаточного формоутворення - обробка спеціальними обкатувальними інструментами (шевером, обкатником, зубчастим хоном).

3. Кінематичну схему формоутворення слід вибирати з розробленої класифікації з урахуванням характеру технологічної операції.

4. Одержані в дисертації геометричні 3D моделі можуть бути практично використані в сучасній генеративній технології нарощування RPTM. Це особливо ефективно при необхідності швидкого виготовлення і випробування прототипів спеціальних зубчастих колес і заснованих на них нових механізмів і пристроїв.

5. Використовуючи початкові дані про оброблюване колесо і рекомендовані алгоритми розрахунку одно- і двопараметричних огинаючих, можна одержати числову інформацію про поверхні колес і про точки або лінії їх дотику з інструментом. Тим самим можна оцінити геометричну точність формоутворення і керувати нею.

6. Математичні описи меж області існування конічних зубчастих колес з еквідістантними зуб'ями рекомендується практично використовувати при конструюванні двопараметричних зачеплень і заснованих на них нових механізмів, зокрема при розробці пакетів програм і компактних спеціальних CAD/CAM систем. Для вибору параметрів колеса рекомендовано інтервали їх граничних значень і зв'язки між ними.

Результати і рекомендації дисертації впроваджено в Інституті машин і систем НАН України і Мінпромполітики та на Харківському заводі верстатобудування ОАО "ХАРВЕСТ" із загальним економічним ефектом 55 тис. грн. Матеріали дисертації використовуються в учбовому процесі при вивченні курсів "Основи 3D моделювання в теорії обробки різанням", "Основи CAD/CAM/CIM"

### **Особистий внесок здобувача.**

Основні результати роботи здобуто особисто автором. Серед них:

- огляд і аналіз наукової і патентної інформації, визначення актуальності і конкретних задач роботи;

- визначення граничних геометричних умов та області існування конічних зубчастих колес з еквідістантними лініями зубів, обробка результатів, пов'язаних з обчислювальними експериментами;
- розробка методики застосування математичного апарату відображень простору і узагальненої структури верстатних зачеплень стосовно задач формоутворення вказаних конічних колес;
- складення рівнянь кінематики для попереднього і остаточного формоутворення в операторному, матричному і параметричному записах;
- розв'язання задач одно- і двопараметричного обгинання з включенням результатів в 3D моделі формоутворення;
- узагальнення часткових схем формоутворення в теоретично обґрунтованій класифікації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації докладалися на міжнародних науково-технічних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків, 1995, 1997, 2002, 2003 р.р.), "Нові технології в машинобудуванні" (м. Харків – Рибальське, 2001р.), на міжнародних науково-технічних семінарах "Високі технології в машинобудуванні" (м. Харків, 1996, 1997 р.р.), "Interpartner 99", "Interpartner – 2002" (м. Алушта). У повному обсязі дисертаційна робота докладалася на розширеному засіданні наукового семінару кафедри "Різання матеріалів і різальні інструменти" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

**Публікації.** Основні результати дисертації викладено у 8 статтях, опублікованих у фахових наукових виданнях, затверджених ВАК України, а також у 6 тезах доповідей на конференціях. Всього 14 публікацій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота містить вступ, 5 розділів основної частини, загальні висновки, список використаної літератури і додатки. Повний обсяг дисертації складає 152 сторінки, з них 39 ілюстрацій по тексту, 7 таблиць по тексту, 3 додатки на 5 сторінках, 122 використаних літературних джерел на 13 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**Вступ.** Обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і задачі досліджень.

**Перший розділ** містить огляд літератури. Аналіз літератури і патентної інформації свідчить про необхідність створення регульованих зубчастих зачеплень, які могли б не тільки здійснювати безперервну передачу моменту, але і одночасно змінювати міжцентрову відстань, кути схрещування і передаточне відношення. Автором зубчастих колес з постійним нормальним кроком є В. Р. Ковалюх. У його роботах доведено можливість регулювання параметрів у вищій кінематичній парі завдяки використанню нового класу двопараметричних зачеплень, заснованих на колесах з постійним нормальним кроком. Дослідження і конструкторські розробки В. Р. Ковалюх,

Р. В. Ковалюха, Н. Э. Тернюка, Д. О. Волонцевіча, А. В. Устїненко, Н. А. Ткачука, В. І. Лавінського, С. С. Зубатого, Е. Б. Кондусової та ін. показали переваги і перспективи вказаних нових двопараметричних зачеплень для створення нових механізмів.

Разом з тим, вивчення літератури показало, що конструювання зубчастих колес з постійним нормальним кроком і заснованих на них нових зачеплень та зубчастих механізмів в своєму розвитку випереджає технологію їх формоутворення. Відставання технології стримує подальший розвиток механізмів з поліпшеними експлуатаційними властивостями. У найбільшій мірі процеси формоутворення різанням вивчено для сферичних колес. Формоутворення зубів конічних колес з постійним нормальним кроком досліджено недостатньо.

У літературі відсутня систематизація можливих способів формоутворення конічних колес з постійним нормальним кроком. Потрібна розробка сукупності взаємозв'язаних 3D моделей формоутворення поверхонь зубів вказаних колес з повним набором математичних описів. Потрібно вивчити загальні і часткові ознаки вказаних 3D моделей і на їх базі скласти класифікацію схем формоутворення.

Різні питання формоутворення слід досліджувати на єдиній сучасній математичній базі багатопараметричних відображень простору. Доцільно використати розроблені в останні роки узагальнену структуру відображень для верстатних зубчастих зачеплень і узагальнені 3D моделі формоутворення і зняття припуску при різанні.

**У другому розділі** виконано аналіз геометричних особливостей конічних колес з постійним нормальним кроком. Для аналітичного опису ліній зубів використано умову еквідистантності, сформульовану В.Р. Ковалюхом. Відмінність полягає в застосуванні до неї апарату багатопараметричних відображень простору як загальної методичної бази, що об'єднує всі розділи дисертації і полегшує формалізацію й уніфікацію рішень. Лінію зуба розглянуто як траєкторію заданої початкової точки в її складному русі на початковому конусі. Відповідно до методики багатопараметричних відображень лінія зуба має наступні структурні, матричні і параметричні описи:

де  $\vec{R}_1$  і  $\vec{r}_1$  – радіус-вектор и початкової точки (прообразу) і точок лінії зуба (образу),

$\vec{u}, \vec{\psi}$  – оператори паралельного перенесення і обертання,  $\vec{E}$  – координатний оператор.

$u$  і  $\psi$  – параметри операторів  $\vec{u}$  і  $\vec{\psi}$ ,  $R_1$  і  $\alpha$  – радіус основи і кут початкового конуса.

Умова еквідистантності ліній зубів, сформульована В. Р. Ковалюхом, в параметрах відображень включає зв'язок між параметрами

і формулу для поточного кута  $\beta_i$  між дотичною до лінії зуба і твірною початкового конусу:

де  $\Delta u$  і  $\Delta \psi$  – прирости параметрів лінії зуба,

$\alpha$  – початковий кут між дотичною до лінії зуба і твірною початкового конусу,

$R_i$  – поточний радіус початкового конусу.

Умова еквідистантності обмежує можливі інтервали значень конструктивних параметрів конусу, які визначають область існування колеса й особливості двопараметричного зачеплення. У другому розділі визначено і вивчено вказані інтервали

Рис. 1. Лінія зуба на початковому конусі

а) для початкового конусу:

б) для зуба:

За допомогою обчислюваних експериментів виконано дослідження допустимих діапазонів параметрів. Обчислювальні експерименти проведено в три етапи. На кожному етапі два з трьох основних конструктивних параметрів  $\beta$ ,  $\epsilon$ ,  $R_l$  фіксувалися, і будувалися лінії зубів при зміні третього параметру. За допомогою експериментів встановлено взаємозв'язок параметрів лінії зуба з шириною вінця конусу  $B$ . При більших значеннях початкового кута  $\beta$  при незмінних  $R_l$  і  $\epsilon$  подовжуються лінії зубів, збільшується інтервал значень  $\psi$  і зменшується ширина вінця. При збільшенні радіусу основи конуса  $R_l$  при незмінних  $\beta$  і  $\epsilon$  лінія зуба стає протяжнішою. Так, при  $\epsilon = \text{const} = 45^\circ$  і  $\beta = \text{const} = 50^\circ 10'$  зміна радіусу  $R_l$  від 30 до 150 мм приводить до збільшення ширини вінця конуса  $B$ , відповідній довжині конкретної лінії зуба, від 11.31 до 54.45 мм. При зміні кута конуса  $\epsilon$  лінія зуба витягується або звужується, і, відповідно, змінюється ширина вінця. Наприклад, при  $R_l = \text{const} = 75$  мм. і  $\beta = \text{const} = 50^\circ 10'$  при збільшенні кута конуса  $\epsilon$  значення  $B$  змінюються з 4.86 мм до 153.63 мм. Обчислювані експерименти виявили також ступінь впливу параметрів  $\beta$ ,  $\epsilon$ ,  $R_l$  на найбільші значення довжини лінії зуба  $L_{max}$  і ширини вінця  $B_{max}$ . На рис. 2 показано лінії різних довжин і різні ширини вінця для фіксованого значення  $R_l = 100$  мм. Аналіз графіків показав, що одну і ту ж довжину  $L_{max}$  (а значить, і ширину  $B_{max}$ ) можна одержати різними поєднаннями параметрів  $\beta$ ,  $\epsilon$ .

Рис. 2. Лінії зубів і ширина вінця кінцевого колеса при  $R_l = \text{const}$ ;  $\epsilon = \text{const}$

Максимально можливу ширину зубчастого вінця  $B_{max}$  можна виразити через максимальне значення незалежного параметра лінії зуба  $u$ :

Математичний опис і аналіз ліній зубів дали можливість розробити засновану на них 3D модель попереднього формоутворення западин між зубами фасонними різцями за методом копіювання. У цій моделі формоутворювальним елементом (прообразом) є лінія – різальна кромка фасонного різця, яка рухається уздовж лінії зуба оброблюваного колеса. Бічна поверхня зуба (образ) утворюється як траєкторія фасонної різальної кромки.

Заготовка кінцевого колеса рівномірно обертається з параметром (кутом повороту)  $\psi$ , а фасонний різець нерівномірно прямолінійно переміщується уздовж твірної конуса з параметром  $u$  (довжина переміщення) і додатково повертається навколо нормалі до початкового конуса на кут



$\beta_{\text{доо}}$ . Параметри  $\psi$ ,  $u$ ,  $\beta_{\text{доо}}$  пов'язано умовою постійності нормального кроку. Рух фасонного різця відносно заготовки описується структурним рівнянням

де  $\bar{r}_1$  і  $\bar{r}_2$  – радіус-вектори точок оброблюваного колеса і інструменту,  
 $\bar{R}_1$  і  $\bar{R}_2$  – координатні оператори (для призматичного різця  $\bar{R}_2 = 0$ );  
 $\bar{\varepsilon}$ ,  $\bar{\beta}$  – оператори початкового положення,  $\bar{\psi}$ ,  $\bar{u}$ ,  $\bar{\beta}_{\text{доо}}$  – оператори рухів.

Матричне рівняння містить уніфіковані матриці радіус-векторів і операторів:

Приклади матриць:

Передня поверхня різця проводиться через початкову точку лінії зуба під вибраним переднім кутом. Фасонна різальна кромка в даній задачі визначається як проекція заданого профілю западини між зубами на передню площину. Етап знаходження профілю відрізняється від традиційного, тому що кінематична формоутворювана поверхня не припускає ковзання по собі. Для попередньої обробки западини можна також застосувати копіюючу протяжку, калібруюча частину якої є сукупність фасонних різців.

**У третьому розділі** розроблено 3D моделі формоутворення западин між зубами дисковими і пальцевими фрезами або фасонними шліфувальними кругами (рис. 3). Ці інструменти засновано на інструментальній поверхні обертання з фасонним профілем, що має миттєвий лінійний дотик з формоутворюваною поверхнею западини. В цьому випадку поверхня западини знаходиться як однопараметрична огинаюча сімейства інструментальних поверхонь при відносному русі. Значить, при обробці не враховується двопараметричний характер майбутнього робочого зачеплення оброблюваного кінцевого колеса. Обробка западини здійснюється послідовно, із застосуванням поділу. При моделюванні розв'язується зворотна задача формоутворення, при якій визначається не інструментальна, а формоутворювана поверхня зуба при заданому відносному русі інструменту. Під час обробки інструмент обертається навколо своєї осі для здійснення процесу різання (це ковзання інструментальної поверхні по собі на формоутворення не впливає) і рухається уздовж лінії зуба. Рух подачі інструменту повинен включати прямолінійне переміщення уздовж твірної з параметром  $u$  і обертання навколо осі початкового конуса з параметром  $\psi$ . В процесі подачі дискового інструменту уздовж лінії зуба - початкове значення кутової координати повинне залишатися незмінним тільки в осьовій площині початкового конуса (воно визначається значенням кута  $\psi$ ). У площині, перпендикулярній до нормалі початкового конуса, що містить вісь інструменту, необхідно здійснювати його безперервний додатковий доворот для відстежування змінного кута нахилу лінії зуба  $\beta_i$ . Дійсно, вектор сумарної швидкості подачі інструменту уздовж лінії зуба в поточній точці дотику його середнього кола з початковою поверхнею повинен співпадати по напрямку з вектором дотичної до лінії зуба, тобто складати з поточною твірною початкового конуса

кут  $\beta_i$ . Вісь інструменту у будь-який момент часу повинна бути перпендикулярна дотичною до лінії зуба, тобто складати з поточною утворюючою поточний кут  $\frac{\pi}{2} - \beta_i$ . Тим часом, без примусового довороту цей кут уздовж лінії зуба залишається постійним і рівним початковому значенню  $\frac{\pi}{2} - \beta$ , що порушує вказану вище умову. Значить, для забезпечення еквідистантності траєкторії центру дискового інструменту і лінії зуба кінематика формоутворення повинна ще включати безперервний доворот інструменту при його подачі  $\bar{\beta}_{\dot{a}i\dot{a}}$  на кут  $\beta_{\dot{a}i\dot{a}} = \beta - \beta_i$ , рівний різниці початкового і поточного значень кута нахилу лінії зуба.

Рис. 3. Формоутворення при однопараметричному обгинанні

Оператор доворота задано матрицею

Структура складного руху інструменту щодо умовно нерухомої заготовки містить ті ж оператори, що і при обробці фасонним різцем. Воно описується рівнянням з поточними параметрами  $u, \psi, \bar{\beta}_{\dot{a}i\dot{a}}$ :

Обернутий рух оброблюваного колеса щодо інструменту в структурному, матричному і параметричному запису має вигляд:

(тут значок "T" означає транспонування).

Сукупність рівнянь однопараметричного руху інструментальної поверхні дискового інструменту і рівнянь самої цієї поверхні задає в просторі сімейство цих поверхонь, одержаних у фіксовані моменти часу. У кожен такий момент інструментальна і формоутворююча поверхні дотикаються по лінії (характеристиці огинаючої), множина яких і представляє шукану однопараметричну огинаючу поверхню зуба кінцевого колеса. В усіх точках ліній миттєвого дотику (характеристик огинаючої) повинна виконуватися умова дотику:

або у вигляді визначника:

де  $\bar{N}$  - нормаль до інструментальної поверхні;

$\bar{V}^{(u)}$  - вектор швидкості обернутого руху.

Змінні, що входять до визначника, одержано диференціюванням рівнянь інструментальної поверхні і обернутого руху, наприклад,

Таким чином, 3D модель поверхні зуба, одержаної обгинанням інструментальної поверхні дискової модульної фрези або фасонного шліфувального круга, представлено сукупністю рівнянь інструментальної поверхні, рівнянь прямого руху і умови дотику.

Достовірність запропонованої 3D моделі була перевірена обчислювальними експериментами. Перевірялися математичні описи прямого і обернутого рухів, швидкості і точок дотику інструментальної і формоутвореної поверхонь, одержаних розрахунками. Масиви числової інформації з ілюстраціями наведено в тексті дисертації.

У третьому розділі викладено також один з варіантів геометричної моделі знімання припуску при обробці западин інструментами, заснованими на інструментальних поверхнях обертання при однопараметричному обгинанні. Перетин формованої інструментом області і суцільного тіла конічної заготовки як двох множин точок простору є шаром, що знімається при обробці зубчастого колеса. Ця множина точок западини між зубами, одержаної при обробці.

У четвертому розділі розроблено 3D моделі формоутворення обкатувальними інструментами, засновані на двопараметричному обгинанні. Кінематика двопараметричного зачеплення конічного і циліндричного колес містить ті ж рухи, що і при однопараметричному обгинанні плюс обкатувальні обертання ланок навколо своїх осей з параметрами  $\varphi_1$   $\varphi_2$ , зв'язаними передаточним відношенням  $i = \varphi_2 / \varphi_1$ . Використаний в даній роботі теоретичний підхід М. Л. Еріхова до синтезу зачеплень з точковим контактом містить рівняння відносних рухів (прямого і обернутого). За допомогою багатопараметричних відображень простору в дисертації одержано математичні описи цих рухів.

Структура прямого руху включає наступні однопараметричні рухи (рис. 4):

Рис. 4. Верстатне зачеплення при обкатувальному формоутворенні

1. Обертання  $\bar{\varphi}_2$  циліндричного колеса разом з його репером 2 навколо осі  $z_{2 \ \bar{\epsilon}\bar{n}\bar{o}}$  у репері  $2_{\ \bar{\epsilon}\bar{n}\bar{o}}$ ; перехід  $\beta$  від репера  $2_{\ \bar{\epsilon}\bar{n}\bar{o}}$  до реперу  $2'$ .

2. Обертання  $\bar{\beta}_{\bar{a}\bar{i}\bar{a}}$  циліндричного колеса разом з його репером 2 в репері  $2'$  навколо осі  $x'_2$  щодо нерухомого репера  $2'$ ; паралельне перенесення  $\bar{i}$  циліндричного колеса разом з його репером 2 щодо нерухомого репера  $2'$  (в репері  $2'$ ) уздовж  $z'_2$ ; перехід  $\bar{R}_2$  від репера  $2'$  до реперу  $2''$ .

3. Перехід  $\bar{\epsilon}$ ,  $\bar{R}$  від репера  $2''$  до реперу 1.

4. Обертання  $\bar{\psi}$  циліндричного колеса в репері 1 навколо осі  $z_1$ .

5. Обертання  $\bar{\varphi}_1$  циліндричного колеса разом з репером 1 в репері  $1_{\ \bar{\epsilon}\bar{n}\bar{o}}$  навколо  $z_{1 \ \bar{\epsilon}\bar{n}\bar{o}}$ .

Послідовність дій операторів в багатопараметричному відображенні:

Перетворюючими параметрами є тут поточні кути поворотів  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\beta_{\bar{a}\bar{i}\bar{a}}$ , а координатними

параметрами - кути  $\varepsilon, u, \beta$  і радіуси  $R$  і  $R_2$ . Відповідно, структурне, матричне і параметричне рівняння прямого руху циліндричного твірного колеса відносно конічного оброблюваного колеса мають вигляд (рис. 5):

За методикою перетворень відображень за допомогою транспонованих матриць одержано також описи обернутого руху:

Рис. 5. Початкове положення і кінематика при двопараметричному обгинанні

При обкатувальній обробці колес застосовані циліндричні колеса з аркоподібними або бочкоподібними зубами. Це знаходиться у відповідності з відомими рекомендаціями, що забезпечують відсутність інтерференції при точковому контакті.

Формоутворювана поверхня зуба конічного колеса утворюється як огинаюча двопараметричного сімейства поверхонь. Термін "двопараметричне" обґрунтовано тим, що на зачеплення накладається вимога одночасного виконання двох умов торкань, відповідних двом відносно незалежним параметрам рухів. У нашому випадку одним з таких параметрів (для обкатки) є поточний кутовий поворот  $\varphi_1$ , ( $\varphi_2=f(\varphi_1)$ ), а іншим (для руху уздовж лінії зуба) – поточна довжина уздовж твірної конуса  $u$  ( $\psi=f_1(u)$ ,  $\beta_{одод}= f_2(u)$ ). Відомо, що умовою дотику є умова перпендикулярності вектора поточної швидкості і вектора нормалі до інструментальної поверхні, що рухається.

Отже в нашій задачі сумісне виконання двох умов дотику  $\bar{V}_{\varphi_1} \bar{N} = 0$ ,  $\bar{V}_u \bar{N} = 0$  вимагає, щоб вектори обох швидкостей в точці дотику потрапили в одну і ту саму площину, перпендикулярну вектору нормалі  $\bar{N}$  у цій точці.

Слід додати, що сумарна швидкість  $\bar{V} = \bar{V}_{\varphi_1} + \bar{V}_u$ , відповідна абсолютно незалежному параметру  $t$  (часу), також розташована у вказаній площині.

Умови дотику можна записати з використанням визначників:

$$; \quad , \quad (21)$$

де  $\alpha_x$  і  $\theta$  – параметри інструментальної поверхні,  $\varphi_1$  і  $u$  – незалежні параметри рухів.

Використаний в дисертації апарат багатопараметричних відображень простору має уніфікуючі можливості. При необхідності можна використовувати уніфіковані оператори, структури відображень і функціональні зв'язки між параметрами. Наприклад, в даній задачі для умов дотику можна використати уніфікований запис

де  $\dot{m}_{r_2}^{\alpha_x}$  è  $\dot{m}_{r_2}^{\theta}$  – матриці похідних по параметрах інструментальної поверхні;

$\dot{m}_{r_2}^{\varphi_1}$  è  $\dot{m}_{r_2}^{\psi}$  – матриці похідних по параметрах рухів.

У роботах Р. В. Ковалюха, В. І. Лавінського, Н. А. Ткачука, Д. О. Волонцевіча, А. В. Устіненко запропоновано і реалізовано методику й алгоритм розрахунку та аналізу зв'язаних поверхонь ланок двопараметричних передач з використанням числових методів, зокрема, ітераційного методу. Результати вказаних робіт охоплюють різні двопараметричні передачі, зокрема циліндро-конічну. Вони застосовані для подальших розрахунків міцності, жорсткості і кінечноелементного аналізу ланок передачі. Числовий метод зводиться до рішення системи нелінійних рівнянь, що описують умови точкового сполучення поверхонь зубів.

Одержані в даній дисертації математичні описи по суті є системою нелінійних рівнянь. Вони конкретизують загальні положення теорії зубчастих зачеплень і можуть бути використані при формоутворенні поверхонь зубів конічного колеса з постійним нормальним кроком при двопараметричному обгинанні. Нижче наведено послідовність обчислень при реалізації числового методу з використанням одержаних в даній дисертації математичних описів:

1. Задаються числові значення постійних параметрів.
2. Із заданим кроком задається масив пар числових значень незалежних параметрів рухів  $\varphi_1$  і  $u$ . Всі подальші обчислення виконуються в циклі.
3. Для кожної пари значень  $\varphi_1$  і  $u$  обчислюються значення залежних параметрів рухів  $\varphi_2$ ,  $\psi$ ,  $\beta_{\text{доо}}$  і похідних  $\frac{\partial \psi}{\partial u}$  і  $\frac{\partial \beta_{\text{доо}}}{\partial u}$ .
4. Після підстановки числової інформації з пунктів 1, 2, 3 в умови дотику методом ітерацій спільно розв'язуються ці умови як два нелінійні трансцендентні рівняння. При цьому враховується описані вище особливості похідних, як складних функцій параметрів. Коренями рівнянь є числові значення поверхні бочкоподібного зуба  $\alpha_x$  і  $\theta$ .
5. Підставляючи значення  $\alpha_x$  і  $\theta$  у рівняння, обчислюються значення координат миттєвої точки дотику на поверхні бочкоподібного зуба в репері 2.
6. Переходячи від реперу 2 до реперу 1 по рівняннях, обчислюються координати точки дотику на шуканій поверхні зуба конічного колеса.

Після виконання всіх циклів одержуємо масив координат точок дотику, який визначає шукану поверхню як впорядковану множину таких точок. Ця множина є два сімейства точкових ліній як функцій незалежних параметрів  $\varphi_1$  і  $u$ .

У п'ятому розділі описано практичне використання теоретичних результатів дисертації. Найважливішими і визначними для технології результатами вважаємо параметризацію формоутворення, зв'язки між параметрами, математичні описи і рекомендації по кінематиці і початковому положенню ланок верстатного зачеплення, алгоритми і методику розрахунку

інструментальних та формоутворюваних поверхонь в поєднанні з геометричними умовами формоутворення. Ці теоретичні результати можуть служити основою для призначення маршруту формоутворення, вибору інструментів і верстатів з системами CNC (ЧПУ), складання управляючих програм. Стає можливим розрахунок числової інформації про поверхні, що сполучаються як огинаючі, про їх профілі, про траєкторію точки дотику. На основі аналізу і узагальнення розроблено класифікацію рекомендованих схем формоутворення для обробки конічних зубчастих колес з постійним нормальним кроком. (табл. 1).

Таблиця 1

### Класифікація схем формоутворення

Спільність розглянутих в дисертації способів формоутворення є наслідком особливостей геометрії формоутворюємих поверхонь зубів конічних колес з постійним нормальним кроком. Еквідистантні лінії зубів на конічній початковій поверхні утворюються як результат двох одночасних рухів (прямолінійного і обертального), функціонально пов'язаних між собою. Це значить, що для будь-якого способу формоутворення обов'язковим елементом кінематики повинна бути подача інструменту уздовж лінії оброблюваного зуба, тобто два рухи з параметрами  $u$  і  $\psi$ . Відмінність вказаних способів формоутворення полягає в характері твірної поверхні і параметрів початкового положення. Проте найістотнішими є відмітні ознаки кінематики формоутворення. Так, кінематика обробки западин між зубами кінцевою фасонною фрезою містить лише відносний рух фрези уздовж лінії оброблюваного зуба з параметрами  $u$  і  $\psi$ . Перехід до дискових інструментів супроводжується включенням в рівняння руху додаткового довороту навколо безперервно мінючої своє положення осі на кут  $\beta - \beta_i$ .

Найскладнішою кінематикою відрізняються способи обкатувального формоутворення, оскільки до перерахованих рухів додаються обкатувальні обертання оброблюваного і виробляючого колес з параметрами обертання  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ , пов'язані один з одним через передаточне відношення  $i$ . Способи формоутворення і можливі принципові кінематичні схеми верстатів діляться на три групи, які відрізняються кількістю забезпечуваних рухів. Кінематична схема на рис. 6а реалізує першу групу способів формоутворення. Інструментом є кінцева фасонна фреза, яка встановлюється в початковому положенні на необхідну глибину фрезерування так, щоб вісь фрези перетинала вісь початкового конуса на його більшому радіусі. Кінематика містить обертання  $\bar{\psi}$  і паралельне перенесення  $\bar{u}$  з параметрами руху уздовж лінії зуба  $u$  і  $\psi$ . Другій групі способів формоутворення відповідає, наприклад, схема на рис. 6б. При визначенні початкового положення дискового інструменту враховується його кутове розташування щодо заготовки. Схеми другої групи повинні забезпечувати три параметри руху ( $\psi$ ,  $u$  і параметр додаткового доворота інструменту

$\beta - \beta_i$ ), щоб вісь інструменту під час обробки схрещувалася з дотичною до лінії зуба під прямим кутом. Обкатувальним способом формоутворення відповідає схема на рис. 5в, яка відмінна від схем двох інших груп початковим положенням інструменту, а також наявністю обкатувальних обертань з параметрами  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ .

Рис. 5. Приклади схем формоутворення: а) копіюючими інструментами; б) дисковими інструментами; в) обкатувальними інструментами

В дисертації одержано структурні рівняння абсолютних рухів для різних кінематичних схем формоутворення. Розроблені схеми формоутворення можуть бути практично використані при виборі або модернізації верстатів з ЧПУ (CNC), а також при проектуванні спеціальних верстатів для обробки зубчастих колес з постійним нормальним кроком.

Для інструментального оснащення технології на операціях попереднього формоутворення рекомендуються фасонні різці, фасонні фрези, фасонні шліфувальні круги. Для остаточного формоутворення слід використовувати відомі різальні і поверхнево-деформуючі інструменти, які застосовуються для обробки інших типів зубчастих колес з еквідистантними лініями зубів, наприклад, сферичних колес. Це, наприклад, шевери, зубчасті хони і поверхнево-деформуючі обкатники. Розроблені в дисертації 3D моделі можуть бути практично застосовані в сучасній інтегрованій технології нарощування RPTM, тобто в технологях прискореного виготовлення прототипів Rapid Prototyping, інструментального забезпечення Rapid Tooling і виробництва виробів Rapid Manufacturing. При конструюванні конічних колес і двопараметричних передач можна використовувати інформацію про діапазони і швидкість зміни параметрів взаємного положення ланок, рекомендації конструктору щодо вибору ліній зубів, ширини вінця та ін.

Можливо також застосування результатів дисертації в математичному й алгоритмічному забезпеченні спеціальних компактних CAD-систем, або пакетів прикладних програм вузького призначення, що враховують специфіку двопараметричних зачеплень і призначені для їх проектування, виготовлення і дослідження.

## ВИСНОВКИ

1. Запропоновані в Україні колеса з постійним нормальним кроком і еквідистантними лініями зубів на початкових поверхнях обертання мають перспективу створення принципово нових зачеплень і зубчастих механізмів з поліпшеними властивостями й експлуатаційними можливостями (у варіаторах швидкості, у трансмісіях замість карданних шарнірів, у пристроях для регулювання взаємного положення елементів, у технологічному оснащенні). Разом з тим, подовжені лінії зубів зазначених колес мають значну кривизну, крутіння й інші особливості. Тому існує актуальна задача

розробки й удосконалювання процесів формоутворення зубчастих коліс з постійним нормальним кроком при обробці різанням.

2. Розроблені в дисертації 3D моделі формоутворення конічних колес з постійним нормальним кроком, котрі враховують специфіку еквидистантних ліній зубів і зв'язок між їх параметрами. Поверхні зубів знайдено як одно- і двопараметричеські сімейства інструментальних поверхонь.

3. Отримані 3D моделі рекомендовано використовувати як теоретичне забезпечення практичних способів механічної обробки конічних коліс з еквидистантними зуб'ями. Стає можливим комп'ютерний розрахунок числової інформації щодо кінематики, формоутворюємих поверхонь, крапок і ліній торкання, результатів формоутворення.

4. Поверхні зубів конічного колеса з постійним нормальним кроком, що задовольняють геометричним умовам двопараметричеського зачеплення в готовій передачі, можуть бути отримані тільки двопараметричеським огинанням при повному збігу верстатного і робочого зачеплень. Для остатньої обробки рекомендується двопараметричеське формоутворення обкатними інструментами з крапковим торканням, а для попередньої обробки - способи копіювання й однопараметричеського огинання (фасонне точіння, фасонне фрезерування і шліфування).

5. Отримані математичні описи, незалежно від їхнього характеру і призначення, засновано на єдиній методичній базі багатопараметричеських відображень і узагальненої структури верстатного зачеплення. Підтверджено доцільність застосування цієї методичної бази в сполученні із сучасною теорією формоутворення.

6. 3D моделі з повним математичним змістом і складені на їхній основі керуючі програми орієнтовано на можливості сучасних багатокординатних верстатів з CNC (ЧПУ) і генеративної технології нарощування RPTM, яка не має обмежень по складності поверхонь. Для вибору, конструюванню і модернізації спеціальних верстатів з CNC рекомендується розроблену в дисертації класифікація схем формоутворення. Граничні співвідношення між конструктивними параметрами та їх значення можуть бути корисними не тільки при формоутворенні, і при конструюванні колес.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Ковалюх Р. В., Перепелица Б. А., Мироненко А. Л. Типовые модели формообразования, основанные на многопараметричеських отображениях, в приложении к нарезанию специальных зубчатых колёс с рабочими поверхностями винтовой структуры. //Сборник "Резание и инструмент в технологических системах", –Харьков: ХГПУ. – 1994. – Вып. 49 – С. 98-100.

Здобувач виконав аналіз властивостей, що розрізняють різні способи формоутворення спеціальних зубчастих колес з робочими поверхнями гвинтової структури.



2. Ковалюх Р. В., Подригало М. А., Кондусова Е. Б., Мироненко А. Л., Третьяк Т. Е. Кинематические схемы формообразования сферических зубчатых колёс с эквидистантными линиями зубьев. // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГТГУ. – 1995-1996. – Вып. 50 – С. 104-109.

Здобувач виконав аналіз особливостей кінематики формоутворення зубчатих колес, заснованих на різних початкових поверхнях, що враховує геометричні особливості таких колес.

3. Ковалюх Р. В., Грабченко А. И., Перепелица Б. А., Мироненко А. Л. Кинематические схемы предварительного формообразования конических колёс с эквидистантными зубьями дисковыми режущими инструментами. // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ. – 1997. – Вып. 51. – С. 71–76.

Здобувач застосував теоретичний принцип проектування інструментів, заснований на однопараметричному обгинанні.

4. Мироненко А. Л. Геометрическая модель съема припуска при формообразовании зубьев специальных конических зубчатых колес дисковыми инструментами // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 53. – С. 104-109.

Здобувач розробив 3D модель зняття припуску при обробці спеціальних конічних зубчастих колес дисковими інструментами.

5. Кондусова Е. Б., Мироненко А. Л., Сашкова Н. В., Федорова О. Н. Алгоритм геометрического моделирования режущего инструмента как композиции из элементов, описанных многопараметрическими отображениями. // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ – 1999. – Вып. 54. – С. 143-146.

Здобувач описав зуборізні інструменти як сукупність фасонних різців.

6. Мироненко А. Л., Ковалюх Р. В., Ткачук Н. А., Перепелица Б. А. Особенности механической обработки специальных конических зубчатых колёс с эквидистантными линиями зубьев для двухпараметрических зацеплений. //Авиационно-космическая техника и технология: Труды Нацаэрокосмического ун-та им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Харьков. – 1999г. –С. 154-158.

Здобувач застосував теоретичний принцип проектування інструментів, заснований на двопараметричному обгинанні.

7. Мироненко А.Л., Кондусова Е.Б., Ковалюх Р.В., Ткачук Н.А. Особенности механической обработки специальных конических зубчатых колёс с эквидистантными линиями зубьев для двухпараметрических зацеплений //Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХГПУ – 2000. – Вып. 57.

Здобувач склав модель огибаючого руху при двопараметричному обгинанні.

8. Мироненко А. Л. Аналитическое описание условий формообразования поверхностей

зубьев специальных зубчатых колёс. //Резание и инструмент в технологических системах. –Харьков: НТУ "ХПИ". – 2004. –Вып. 67. –С. 181-187.

Здобувач сформулював умови формоутворення конічних колес щодо відсутності підрізування.

9. Урбанович В. И. , Кондусова Е. Б., Мироненко А. Л. Алгоритмы геометрического моделирования режущих инструментов, основанные на их систематизации // Труды междунар. конф. “Информационные технологии; наука, техника, технология, образование, здоровье”. –Харьков: ХГПУ. – 1995. – С. 85.

Здобувачем розроблено алгоритм моделювання інструментів для обробки зубчастих колес.

10. Ковалюх Р.В. , Кондусова Е.Б. , Перепелица Б.А. , Мироненко А.Л. О формообразовании специальных зубчатых колёс с эквидистантными линиями зубьев // Труды междунар. конф. “Высокие технологии в машиностроении: диагностика процессов и обеспечение качества”. – Харьков: ХГПУ. – 1996. –С. 65-66.

Здобувачем визначено особливості формоутворення щодо конічних колес з постійним нормальним кроком.

11. Перепелица Б.А., Урбанович В.И., Савченков Б.В., Мироненко А.Л., Лю Мень Чжоу Алгоритм структурного геометрического моделирования рабочих элементов зубообрабатывающих элементов. //Труды конференции "Информационные технологии", –Харьков, ХГПУ, – 1996г. –С. 192.

Здобувач виконав аналіз конструкцій робочих елементів.

12. Мироненко А. Л., Ковалюх Р. В., Грабченко А. И., Перепелица Б. А. Формообразование специальных конических колес с эквидистантными линиями зубьев винтовой структуры фасонными резцами. // Труды междунар. конф. “Высокие технологии в машиностроении: тенденции развития, менеджмент, маркетинг”. –Харьков: ХГПУ. – - 1997. – С. 291.

Здобувач виконав аналітичний опос бокових поверхонь зуба при обробці фасонними різцями.

13. Мироненко А. Л., Ковалюх Р. В., Перепелица Б. А., Кондусова Е. Б. Формообразование зубьев конических колес с постоянным нормальным шагом дисковыми и пальцевыми фасонными инструментами. /Труды конференции "Информационные технологии", – Харьков, ХГПУ, - 1997, –С. 334-338.

Здобувачем визначено кінематику формоутворення.

14. Ковалюх Р.В., Кондусова Е.Б., Кривошея А.В., Мироненко А.Л. Модель двухпараметрического станочного зацепления для обработки специальных колёс с эквидистантными линиями зубьев. /Труды 8-й Международной научно-технической конференции “Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве”. -Харьков: ХНПК “ФЭД”, - 2003, - С. 246-248.

Здобувачем виконано аналіз впливу кута схрещування осей та міжцентрової відстані на взаємне розташування оброблюваного і виробляючого колес.

## АНОТАЦІЇ

**Мироненко О. Л. Удосконалювання 3D моделей формоутворення різанням спеціальних конічних зубчастих колес для двопараметричних передач - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 - процеси механічної обробки, верстати й інструменти. -Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2004.

У дисертації виконано теоретичне дослідження формоутворення різанням поверхонь зубів спеціальних конічних зубчастих колес з постійним нормальним кроком. Вказані колеса на початковому конусі мають подовжені лінії зубів гвинтової структури із змінним параметром гвинта.

На основі загальних положень теорії формоутворення з урахуванням специфіки вказаних колес в дисертації розроблено тривимірні (3D) геометричні моделі формоутворення для попередньої і остаточної обробки зубів. Моделі містять повний математичний опис формоутворюючого елемента, формоутворюючих рухів і умов формоутворення в операторному, матричному і параметричному записі. Забезпечено можливість структурного рішення задач без виведення конкретних параметричних рівнянь і формул.

Для попередньої обробки передбачаються засновані на копіюванні та однопараметричному обгинанні способи формоутворення западин між зубами фасонними різцями, шліфувальними кругами або фасонними фрезами.

Для остаточного формоутворення рекомендуються 3D моделі двопараметричної обробки обкатувальними різальними або поверхнево-деформуючими інструментами з точковим дотиком інструментальних і формоутворюваних поверхонь.

Завдяки узагальненню кінематики розроблено класифікацію схем формоутворення конічних коліс з постійним нормальним кроком.

Результати дисертації можна використати як теоретичне забезпечення технології обробки конічних коліс з постійним нормальним кроком, зокрема для вибору сучасних верстатів з CNC і розробки керуючих програм. Це сприятиме подальшому вдосконаленню і впровадженню в машинобудуванні нових ефективних зубчатих механізмів. Доцільно сумісне проектування і виготовлення конічних зубчатих коліс з постійним нормальним кроком в єдиній системі. Для цього визначено і рекомендовано області існування вказаних колес, обмежені одержаними в дисертації граничними зв'язками між параметрами і їх числовими значеннями.

Ключові слова: зубчасте колесо, різальний інструмент, формоутворення, 3D моделювання, параметр, верстатне зачеплення, багатопараметричне відображення простору, огинання поверхонь, обкатка.

**Мироненко А.Л. Совершенствование 3D моделей формообразования резанием специальных конических зубчатых колёс для двухпараметрических передач - Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 - процессы механической обработки, станки и инструменты. -Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2004.

В диссертации выполнено теоретическое исследование формообразования резанием поверхностей зубьев специальных конических зубчатых колёс с постоянным нормальным шагом. На начальном конусе колесо имеет удлинённые линии зубьев винтовой структуры с переменными углом наклона и параметром винта. Связь между текущими параметрами линиями зубьев регламентирована условием их эквидистантности. Определены возможные интервалы значений конструктивных параметров начального конуса и линий зубьев определяющих особенности двухпараметрического зацепления.

На основе общих положений теории формообразования с учётом специфики указанных колёс в диссертации разработаны новые геометрические 3D модели формообразования для предварительной и окончательной обработки зубьев. Модели содержат полное математическое описание формообразующего элемента, формообразующих движений и условий формообразования в операторной, матричной и параметрической записи. Обеспечена возможность структурного решения задач без вывода конкретных параметрических уравнений и формул.

Для предварительной обработки предлагаются основанные на копировании или однопараметрическом огибании способы формообразование впадин между зубьями фасонными резцами, шлифовальными кругами и фасонными фрезами.

При фрезеровании или вышлифовании впадин 3D модель формообразования включает инструментальную поверхность вращения, имеющую мгновенное линейное касание с формообразуемой поверхностью впадины. Поверхность впадины находится как однопараметрическая огибающая семейства производящей поверхности при относительном движении. Во всех точках линий мгновенного касания (характеристик огибающей) должно выполняться включенное в модель условие касания. Доказана необходимость дополнительного доворота инструмента вокруг нормали к линии зуба на начальном конусе. Разработан пример 3D модели съёма припуска при обработке впадины между зубьями при однопараметрическом огибании.

Для окончательного формообразования рекомендуются 3D модели двухпараметрической обработки обкаточными режущими или поверхностно-деформирующими инструментами с

точечным касанием инструментальных и формообразуемых поверхностей. В этом случае поверхности зубьев получены как двухпараметрические семейства производящих поверхностей. Один из параметров представляет обкатку, второй – движение вдоль линии зуба. Соответственно кинематика дополнена обкаточными вращениями. В точках мгновенного контакта одновременно должны выполняться два условия касания. Рабочее зацепление в передаче является двухпараметрическим с точечным касанием. Поэтому только двухпараметрическое формообразование обеспечивает совпадение рабочего и станочного зацеплений и может использоваться как окончательное.

Благодаря обобщению кинематики разработана классификация схем формообразования конических колёс с постоянным нормальным шагом. Результаты диссертации могут быть использованы как теоретическое обеспечение технологии обработки, в том числе для выбора современных станков с CNC и разработки управляющих программ. Это будет способствовать дальнейшему совершенствованию и внедрению новых эффективных зубчатых механизмов в машиностроении. Целесообразно совместное проектирование и изготовление в единой системе. Для этого определены и рекомендуются области существования указанных колёс, ограниченные полученными в диссертации граничными связями между параметрами и их числовыми значениями.

Ключевые слова: зубчатое колесо, режущий инструмент, формообразование, 3D моделирование, параметр, станочное зацепление, многопараметрическое отображение пространства, огибающая поверхность.

### **Mironenko A. L. Improvement of 3D models of shape - forming with cutting of special bevel wheels for using in the two - parameters gears.**

Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences on specialty 05.03.01 - Machining processes, machine tools and tools. - National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov, 2004.

The theoretical research of shape-forming with cutting of the teeth surfaces of special bevel wheels with the constant normal pitch is made in the dissertation. The mentioned wheels on the pitch cone have the oblong lines of teeth of screw structure with the variable parameter of screw.

Based on the general statements of the shape-forming theory taking into account the special features of the above wheels, the 3D geometrical models of shape-forming are developed in the thesis for preliminary and final teeth treatment.

Models contain the complete mathematical description of shape-forming element, shape-forming movements and shape-forming conditions in the operator, matrix and parametric record. Provision is made

for the possibility of structural solving of the problems without derivation of the concrete parametric equations and formulas.

For preliminary processing there is suggested the hollows forming between teeth by means of form milling cutters, grinding wheel etc.

For final shape-forming there are recommended the 3D models of two-parameter treatment by means of spinning tools or surface-deforming tools with a spot touch of tools and shape-formed surfaces.

Owing to kinematics generalization the classification of bevel wheel shape-forming schemes with constant standard pitch.

Thesis conclusions may be used as the theoretical provision of the treatment technology of bevel-wheels with constant standard pitch, including for the selection of up-dated machines with CTC and control systems elaboration. This will promote the further joint upgrading and implementation of new efficient gear units in machinery construction. It is expedient to design and make the bevel wheels with constant standard pitch in a uniform system. For this purpose these theses determine and recommend the domains of existence of specified wheels limited by limit connections among the parameters and their numerical values that are obtained in this thesis.

Key words: cutter, shape-forming, bevel wheel, machine-tool gearing, multiparametric mapping of space, envelope, spinning.

Підписано до друку 24.12.2004 р. Формат 145x215.  
Формат паперу 60x84 1/16. Папір ксероксний 80 г/м<sup>2</sup>. Друк - різнографія.  
Обсяг 0,9 авт. арк. Наклад 100 прим. Замовлення № 9178

Віддруковано в типографії ТОВ "Курсор"  
61057, м. Харків, пр. Театральний 11/13  
т. (057) 714-38-74, 706-31-73