

Міністерство освіти України  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”

На правах рукопису

Палагута Віктор Андрійович

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ  
ПРОДУКТИВНОСТІ ЧИСТОВОЇ ОБРОБКИ  
ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС  
ДИСКОВИМИ ОБКАТОЧНИМИ ІНСТРУМЕНТАМИ**

Спеціальність 05.03.01 Процеси механічної обробки,  
верстати та інструменти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ - 1995

Ав 32.726



00755727 (X)

28404701111

Национальный научно-технический институт Украины

дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі "Технологія машинобудування"  
Дніпродзержинського державного технічного університету

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор С.П. Радзевич

Офіційні опоненти:

1. доктор технічних наук, професор Ю.М. Сухоруков
2. кандидат технічних наук А.В. Кривошея

Провідне підприємство

Авіаційний науково-технічний комплекс "Антонов"

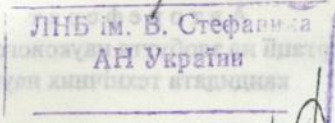
Захист відбудеться "11" Вересня 1995 р., о 15<sup>00</sup> годині на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.09 при  
Національному технічному університеті України  
"Київський політехнічний інститут"

за адресою: 252056, м. Київ-56, пр. Перемоги, 37, корпус 1

Відгук на автореферат у двох примірниках, які завіряються печаткою,  
просимо надсилати за вказаною адресою на ім'я вченого секретаря  
спеціалізованої ради

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці університету

Автореферат розісланий "4" серпня 1995 р.



Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

доктор технічних наук, професор

Н.С. Равська

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** В більшості сучасних машин та механізмів, верстатів та приладів для передавання крутного моменту використовуються циліндричні зубчасті колеса. Збільшення бистрохідності, передаточного крутного моменту, зниження шуму та вібрації залежать від рівня технології їх чистової обробки. Одним з прогресивних технологічних методів чистової обробки циліндричних зубчастих коліс є шевінгування, зубохонінгування та чистове розмірне калібрування (оброблення бокової поверхні зубців методом поверхневого пластичного деформування). Ці процеси здійснюються при беззаязорному зачепленні зубчастого колеса що обробляється та дискового інструменту в умовах обкату, вісі обертання яких перехрещуються в просторі. Широке застосування чистова обробка коліс обкатними інструментами дискового типу отримала в цілому ряду галузей спеціального машинобудування, особливо в автомобільній, літакобудуванні, тракторобудівній та верстатобудівній.

Важливою задачею підвищення експлуатаційних характеристик циліндричних зубчастих коліс, на вирішення якої спрямована дисертаційна робота, є проблема підвищення ефективності чистових зубообробних операцій шляхом використання інструментів з оптимальними геометричними і конструктивними параметрами та за рахунок вдосконалення кінематики процесу формоутворення робочих поверхонь зубців коліс.

**Мета роботи.** Підвищення ефективності чистових зубообробних операцій шляхом синтезу процесу обробки дисковими обкаточними інструментами з оптимальними конструктивними параметрами та кінематики формоутворення що відображає геометричну сторону процесу обробки на основі дослідження диференціальних характеристик геометрії дотикаючихся в верстатному зачепленні бокових поверхонь зубців деталі та вихідної інструментальної поверхні з урахуванням обмежень, що накладаються типом інструменту та способом обробки.

**Наукова новизна.** З ціллю дослідження процесу формоутворення робочих поверхонь зубців коліс досліджена внутрішня та зовнішня локальна геометрія поверхонь  $D$  зубців які оброблюються, для котрих перша та друга основні квадратичні форми (перша та друга диференціальні форми Гауса), задані через конструктивні параметри циліндричного зубчастого колеса. Знайдена допоміжна твірна поверхня у вигляді косозубої рейки, з використанням якої одержано рівняння вихідної інструментальної поверхні (ВІП). Здійснено детальне дослідження геометрії дотику поверхонь  $D$  та  $I$  в диференціальній око-

лиці точки їх дотику в локальній рухомій системі координат, початок якої поєднаний з точкою дотику. Утворений замкнений цикл послідовних перетворень систем координат (в прямому та зворотному напрямках), пов'язаних з зубчастим колесом, дисковим зубообробним інструментом, точкою дотику бокових поверхонь зубців деталі та інструменту та т. і. Детально проаналізовані умови взаємної локальної орієнтації евольвентних гвинтових бокових поверхонь зубців деталі та інструменту. Визначений напрямок найвигіднішого відносного миттєвого переміщення поверхонь деталі та інструмента, котре забезпечить найбільшу гранично досягаєму продуктивність формоутворення. Отримані рівняння для погодження частоти обертання дискового інструменту з вектором руху подачі, яке забезпечить напрямок вектору швидкості різання перпендикулярно напрямку мінімального діаметру дійсних гілок індикатриси конформності поверхонь  $D$  та  $I$ . На основі проведених досліджень виконаний синтез технологічних параметрів процесу зубообробки.

**Практична цінність.** Розроблений метод чистової обробки циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами в умовах обкату дозволяє для кожного конкретного колеса спроектувати новий інструмент з оптимальними конструктивними параметрами, або вибрати раціональний з номенклатури тих, що є в наявності. В подальшому вирішена задача синтезу технологічних параметрів процесу обробки циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами в умовах обкату. Розроблені та впроваджені у виробництво способи зубообробки, дискові інструменти та способи їх переточування та контролю зубчастих коліс - більша кількість виконаних розробок визнана як винаходи та захищена авторськими свідоцтвами СРСР.

**Апробація роботи.** Основні положення та окремі розділи дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: Всесоюзній конференції "Интенсификация технологических процессов механической обработки" (м. Ленінград, 1986 р.); XII конференції молодих вчених Інститута надтвердих матеріалів АН УРСР "Получение и применение сверхтвердых материалов" (м. Київ, 1987 р.); Всесоюзній конференції "Лезвийная обработка закаленных зубчатых колес" (м. Москва, 1987р); наукових конференціях Волгоградського політехнічного інституту (1987р., 1989 р.); школі-семінарі "Применение прогрессивных технологий и инструментов для финишной обработки материалов" (м. Одеса, 1987 р.); семінарі "Высокопроизводительные сложнопрофильные инструменты из сверхтвердых материалов в технологии машиностроения" (м. Київ, 1988 р.); науково-технічній конференції "Совершенствова-

ние конструкций и процессов изготовления режущего и мерительного инструментов и технологической оснастки" (м. Киров, 1988 р.); республіканській науково-технічній конференції "Сверхтвердые материалы и инструменты в ресурсосберегающих технологиях" (м. Київ, 1989р.) науково-технічних конференціях Дніпродзержинського індустріального інституту (1989 р., 1990 р.); науково-технічній конференції "Ресурсосберегающие и энергосберегающие технологии в машиностроении" (м. Одеса, 1994 р.); науково-технічній конференції "Новые технологии и системы обработки в машиностроении" (м. Севастополь, 1994 р.).

Окремі роботи експонувались на різних виставках та ярмарках і відзначені дипломом II ступеня та медаллю ВДНГ України.

**Публікації.** По результатам виконаних досліджень опубліковано 28 робіт, серед яких 2 брошури та 11 авторських свідоцтв на винаходи, решта – наукові статті, доповіді, тези доповідей.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, п'яти глав, основних висновків, списку використаної літератури, який включає 125 найменувань, додатку, та викладена на 220 сторінках машинописного тексту з 37 рисунками та 66 таблицями.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Багаторічна практика використання зубчастих коліс сприяла створенню та вдосконаленню різноманітних способів формоутворення робочих поверхонь зубців і їх фінішної обробки: шеверами, зубчастими хонами, накатниками методом ППД.

Над розробкою теоретичних основ процесу фінішної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами та над вдосконаленням технології процесу плідно працювали Адам Я.І., Ананьєв Н.Т., Бабак В.Ф., Єріхов М.Л., Калашніков С.Н., Клепиков В.Д., Копф І.А., Кривошея А.В., Кузоватов В.С., Літвін Ф.Л., Мільштейн М.З., Петрухін С.С., Родін П.Р., Романов В.Ф., Сахаров Г.Н., Сторчак М.Г., Сухоруков Ю.М., Тайц Б.А. та інші.

В роботі виконано аналіз способів обробки циліндричних зубчастих коліс та прогресивних конструкцій дискових обкаточних інструментів, що використовуються у промисловості. Зазначено, що процес фінішної зубообробки досліджений ще не в достатній мірі. На підставі проведеного аналізу сформульована ціль роботи і показано, що для її реалізації потрібно вирішити такі задачі: визначити елементи внутрішньої та зовнішньої локальної геометрії поверхні Д циліндричного зубчастого колеса яке оброблюється та вихідної інструментальної поверхні І інструменту; утворити замкнений цикл послі-

довних перетворень систем координат; дослідити умови дотику та взаємної орієнтації евольвентних гвинтових поверхонь деталі та інструменту; установити оптимальний напрямок взаємних переміщень поверхонь деталі та інструменту; розробити систему автоматизованого проектування технологічного процесу чистової обробки циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами.

Щоб скористатися диференціально-геометричним методом формоутворення поверхонь при механічній обробці деталей (цей метод, розроблений проф. С.П. Радзевичем, дає можливість вирішення задачі синтезу найвигіднішого методу та засобів формоутворення поверхонь деталей), для заданої пари поверхонь  $D$  та  $I$  визначені коефіцієнти першої та другої основних квадратичних форм (першої та другої диференціальних форм Гауса). Використання першої основної квадратичної форми  $\Phi_{1d}$  дозволяє в простій, наочній і компактній формі розрахувати необхідні для синтезу параметри процесу обробки. Гаусові коефіцієнти квадратичної форми  $\Phi_{1d}$  мають вигляд:

$$\begin{cases} E_d = 1, \\ F_d = m_d z_d \cos\alpha / 2 \sin\beta_d \cos\beta_d, \\ G_d = m_d^2 z_d^2 (\sin^2\alpha \sin^2\beta_d - \cos^2\alpha) / 4 \sin^2\beta_d \cos^2\beta_d. \end{cases} \quad (1)$$

Для досліджуваного випадку вираз (2) можна записати так:

$$\Phi_{1d} \Rightarrow dU^2 + (m_d z_d \cos\alpha / 2 \sin\beta_d \cos\beta_d) dU dV + (m_d^2 z_d^2 (\sin^2\alpha \sin^2\beta_d - \cos^2\alpha) / 4 \sin^2\beta_d \cos^2\beta_d) dV^2. \quad (2)$$

Гаусові коефіцієнти квадратичної форми  $\Phi_{2d}$  дають можливість в кожній точці поверхні  $D$  розраховувати елементи зовнішньої геометрії її локальної дільниці: головні та нормальні кривизни довільних плоских перерізів та ін. Для евольвентної гвинтової поверхні  $D$  зубчастого колеса коефіцієнти форми  $\Phi_{2d}$  знайдено:

$$L_d = 0, \quad M_d = 0, \quad N_d = (m_d z_d \sin\alpha) / 2. \quad (3)$$

Таким чином отримано, що для поверхні  $D$  циліндричного зубчастого колеса друга диференціальна форма гауса має вигляд:

$$\Phi_{2d} \Rightarrow ((m_d z_d \sin\alpha) / 2) dV^2. \quad (4)$$

Кривизна поверхні  $D$  деталі в довільній точці  $K$  на ній розглядається як кривизна відповідної лінії на ній. Радіуси кривизн поверхні  $D$  визначимо за наведеним квадратним рівнянням:

$$(L_d N_d - M_d^2) R^2 + (E_d N_d - 2F_d M_d + G_d L_d) R + E_d G_d - F_d^2 = 0, \quad (5)$$

$$\text{де: } R_d = K_d^{-1}, \quad R_{1d} = K_{1d}^{-1}, \quad R_{2d} = K_{2d}^{-1}.$$

Із рівняння (5), визначимо головні радіуси кривизни поверхні  $D$ :

$$R_{1d} = \infty, \quad R_{2d} = U_d \operatorname{ctg}\tau_d. \quad (6)$$

Для довільного плоского нормального перерізу поверхні  $D$ , площина  $S_d$  якого утворює кут  $\psi$  з площиною  $S_{1d}$  першого головного нор-

мального перерізу, справедлива формула Ейлера:

$$R_d = R_{1d} / \cos^2 \psi + R_{2d} / \sin^2 \psi. \quad (7)$$

При розв'язанні задачі синтезу параметрів процесу формоутворення циліндричних зубчастих коліс інструментами дискового типу необхідно врахувати вихідне обмеження, згідно якого ВІП інструменту є евольвентною гвинтовою поверхнею. Неодмінною умовою правильного зачеплення циліндричного зубчастого колеса і дискового зубообробного інструменту при обробці методом обкату є правильне зачеплення кожного з них із своєю допоміжною твірною рейкою.

Щоб скласти рівняння, яке опише поверхню зубців допоміжної твірної рейки  $T_d$ , котра сполучена з зубчастим колесом, запроваджені такі системи координат:  $X_d^c, Y_d^c, Z_d^c$  - нерухома система координат, зв'язана зі стійкою деталі;  $X_d^r, Y_d^r, Z_d^r$  - рухома система координат, зв'язана з деталлю;  $X_d^p, Y_d^p, Z_d^p$  - система координат, зв'язана з рейкою  $T_d$  деталі.

Для розв'язання задачі синтезу сполученого зачеплення поверхонь  $D$  та  $I$  необхідні аналогічні системи координат:  $X_1^c, Y_1^c, Z_1^c, X_1^r, Y_1^r, Z_1^r, X_1^p, Y_1^p, Z_1^p$ , зв'язані з інструментом. Вісі обертання деталі  $D$  та інструменту  $I$  перехрещуються під деяким кутом  $\Sigma$  і відстоять одна від одної на довжину міжвісьового перпендикуляру  $A$ .

Встановлено, що рівняння бокової поверхні зубців допоміжної твірної рейки  $T_d$  буде мати вигляд:

$$X_d^p \sin \alpha_d + Y_d^p \operatorname{tg} i_d (\cos^2 \alpha_d + 1) / \sin \alpha_d - Z_d^p + r_{v.d} (\pi + \operatorname{inv} \alpha_d) = 0. \quad (8)$$

Поверхні  $D$  деталі та  $I$  інструменту можуть бути утворені при допомозі двох однакових твірних рейок  $T_d$  та  $T_1$ . Форма запису рівнянь бокових поверхонь кожної із них в своїх системах координат відрізняються лише індексами "д" та "і". З урахуванням цього можна зазначити, що коефіцієнти першої та другої квадратичної форми поверхні  $I$  в системі координат, пов'язаній з дисковим зубообробним інструментом будуть мати вигляд, аналогічний рівнянням (1) та (3) і відрізнятимуться лише індексами.

Для створення математичної моделі процесу формоутворення робочих поверхонь зубців, запропоновано досліджувати геометрію дотику поверхонь  $D$  та  $I$  в диференційній околиці точки  $K$  їх дотику в рухомій локальній системі координат, початок якої зв'язаний з точкою дотику поверхонь  $D$  та  $I$  (рис. 1).

Перехід від системи координат  $X_d, Y_d, Z_d$ , до локальної системи координат  $X_d^k, Y_d^k, Z_d^k$  здійснюється так:

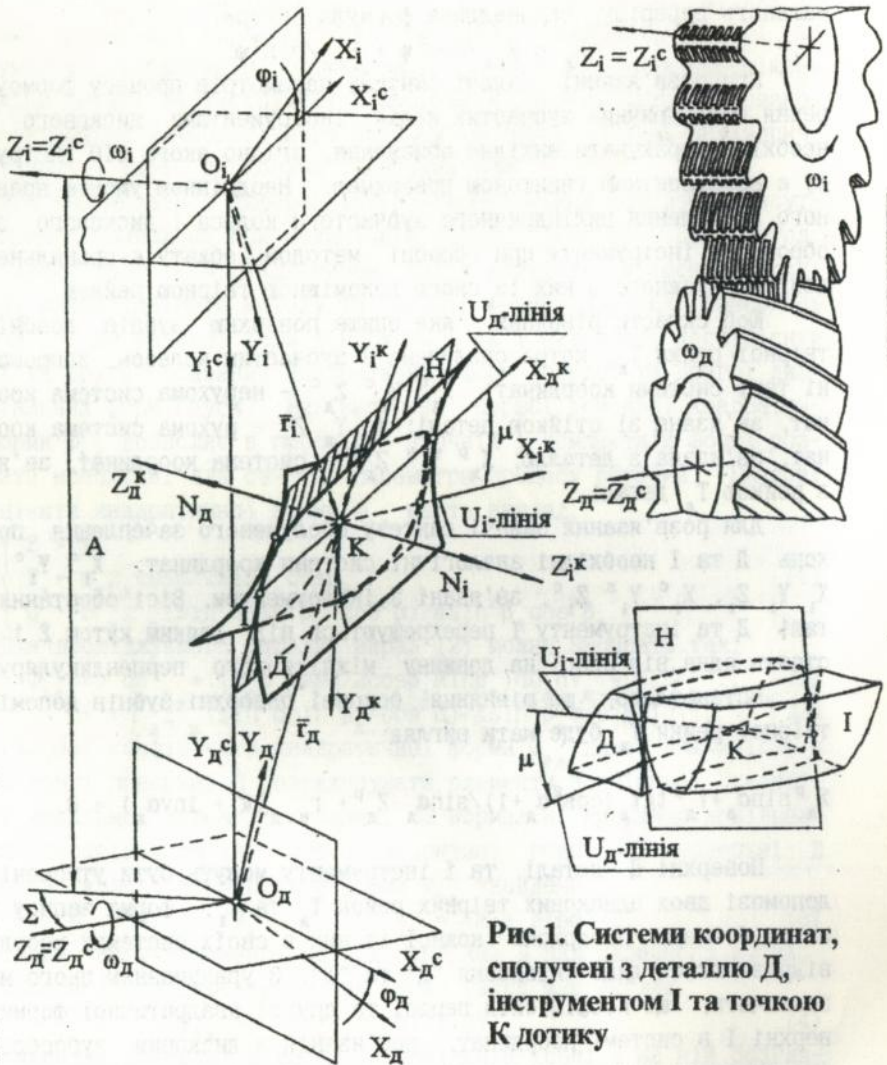


Рис.1. Системи координат, сполучені з деталлю Д, інструментом І та точкою К дотику

$$\begin{bmatrix} X_d^k \\ Y_d^k \\ Z_d^k \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \tau_d \sin V_d & -\cos \tau_d \cos V_d & -\sin \tau_d & -A \\ -\cos V_d & -\sin V_d & 0 & -B \\ \sin \tau_d \sin V_d & -\sin \tau_d \cos V_d & \cos \tau_d & -C \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Встановлено, що в локальних системах координат коефіцієнти квадратичних форм  $\Phi_{1d(k)}$  та  $\Phi_{2d(k)}$  будуть мати вигляд:

$$E_d^k = 1, F_d^k = 0, G_d^k = 1. \quad (10)$$

$$L_{d(1)}^k = 0, M_{d(1)}^k = 0, N_{d(1)}^k = 2 \cos^2 \beta_{d(1)} / m_{d(1)} z_{d(1)} \sin \alpha. \quad (11)$$

Для аналітичного описання процесу чистової обробки циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами в умовах обкату необхідно знати відносну орієнтацію поверхонь Д та І у точці К дотику евольвентних гвинтових бокових поверхонь зубців деталі Д та вихідної інструментальної поверхні І. Отримано, що кут відносної локальної орієнтації  $\mu$  поверхонь Д та І визначається по формулі:

$$\sin \mu = \sin \alpha \sin \Sigma / (\sqrt{1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \beta_D} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \sin^2 \beta_I}). \quad (12)$$

В точці К дотику поверхні Д зуба деталі та евольвентної вихідної інструментальної поверхні І в кожному нормальному перерізі маємо дві дотичні криві. Умови дотику поверхонь Д та І однозначно визначаються при допомозі індикатрис конформності, котра пов'язана з основними квадратичними формами цих поверхонь. Індикатриса конформності - це характеристична крива, що відображає повноту прилягання поверхонь Д та І в довільному нормальному перерізі. Рівняння індикатрис конформності для загального випадку в розгорнутому вигляді записується так:

$$r_k = \sqrt{E_D G_D / (L_D G_D \cos^2 \varphi + M_D \sqrt{E_D G_D} \sin 2\varphi + N_D E_D \sin^2 \varphi) \times \text{sign}(\Phi_{1D} / \Phi_{2D})} + \sqrt{E_I G_I / [L_I G_I \cos^2 (\varphi + \mu) + M_I \sqrt{E_I G_I} \sin 2(\varphi + \mu) + N_I E_I \sin^2 (\varphi + \mu)] \times \text{sign}(\Phi_{1I} / \Phi_{2I})}. \quad (13)$$

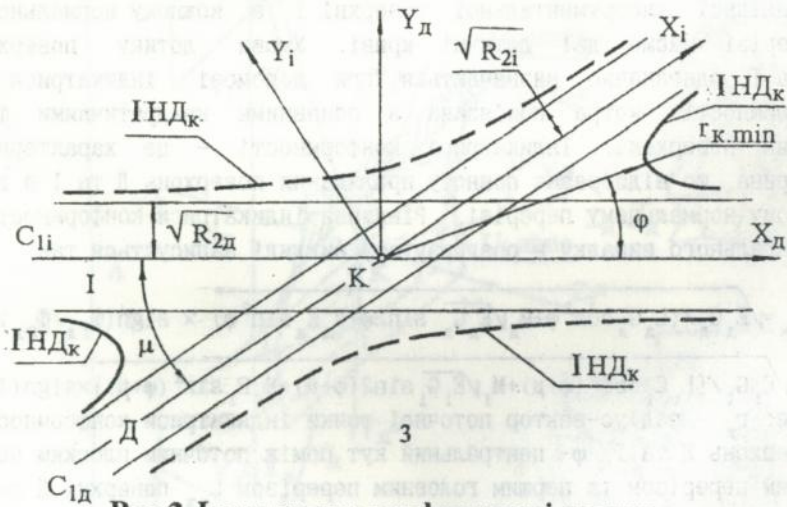
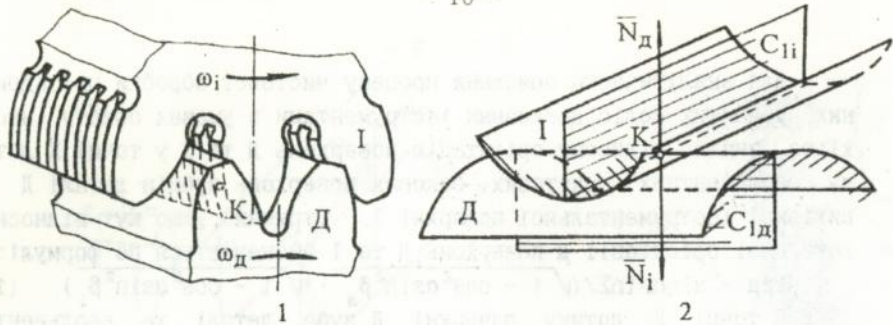
де:  $r_k$  - радіус-вектор поточної точки індикатрис конформності поверхонь Д та І,  $\varphi$  - центральний кут між поточним плоским нормальним перерізом та першим головним перерізом  $S_{1D}$  поверхні Д деталі.

Для дослідженого випадку встановлено, що індикатриса конформності має вигляд:

$$r_k = \sqrt{R_{2D}} / \sin \varphi + \sqrt{R_{2I}} / \sin (\mu - \varphi). \quad (14)$$

На рис. 2.3 показана індикатриса конформності для випадку дотику двох евольвентних гвинтових поверхонь Д та І (рис. 2.1), які в локальній околиці точки К дотику зображаються як контакт двох випуклих параболічних циліндрів (рис. 2.2).

Із властивостей індикатрис конформності відомо, що в диференціальній околиці точки К орієнтація мінімального діаметру  $d_{k, \min}$  дійсних гілок індикатрис конформності показує напрямок найбільш повного взаємного прилягання поверхонь Д та І. Отже продуктивність формоутворення робочих поверхонь Д зубців деталі досягне свого найбільшого значення тільки в тому випадку, коли напрямок відносного переміщення поверхонь Д та І в кожному мить буде перпендикулярним напрямку мінімального діаметру дійсних гілок індикатрис конформності. При цьому ширина строки проходу сягне свого найбільшого гранично досягаемого значення і як наслідок зросте



**Рис.2. Індикатриса конформності дотику евольвентних гвинтових поверхонь Д та І**

продуктивність формоутворення поверхні Д.

При обробці циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами в умовах обкату верстатне зчеплення деталь-інструмент можна розглядати як гвинтову зубчасту передачу. Вектор швидкості різання складається з двох складових - швидкості відносного ковзання поверхонь зубців деталі Д і інструменту І, та швидкості відносного їх ковзання вздовж профілю зубців деталі.

В роботі розглянуто випадок, коли точка К дотику поверхонь Д та І співпадає з полюсом верстатного зчеплення. Вектор швидкості різання розташований в спільній площині дотику поверхонь Д та І, яка співпадає з боковою поверхнею зубців допоміжної твірної рейки. Він складається з вектору швидкості відносного ковзання зубців деталі Д та інструменту І та з вектору відносного переміщення деталі та інструменту в напрямку, паралельному площині, що проходить через точку К та є дотична до їх початкових циліндрів. Друга

складова являє собою вектор швидкості подачі. Отримано систему рівнянь, яка пов'язує величини та напрямки швидкості різання, швидкості ковзання та швидкості подачі:

$$\begin{cases} V_p^k \cos\varphi = -V_{ck} \cos\eta_d + V_s (\cos(\theta + \beta_d) \cos\eta_d - \sin(\theta + \beta_d) \sin\eta_d \sin\alpha); \\ V_p^k \sin\varphi = V_{ck} \sin\eta_d - V_s (\cos(\theta + \beta_d) \sin\eta_d - \sin(\theta + \beta_d) \cos\eta_d \sin\alpha); \end{cases} \quad (15)$$

Розв'язуючи систему (15) відносно  $V_s$  та  $\theta$ , визначимо ті значення вектора подачі, при яких вектор швидкості різання буде спрямований перпендикулярно мінімальному діаметру індикатриси конформності - цим забезпечується збільшення продуктивності формоутворення.

Як приклад, оцінювати ефективність формоутворення циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами можна за допомогою одного з критеріїв - продуктивності формоутворення. Запропонований підхід оцінки ефективності є правомірним, тому що зубообробна операція є чистовою, а ефективність чистових операцій оцінюють по продуктивності формоутворення. Продуктивність формоутворення буде тим більше, чим ширше строка формоутвореного рядка  $S_{np}$ . Для розрахунку величини  $S_{np}$  введена формула:

$$S_{np} = 2R_d \arccos(R_d / (R_d + R_1) + [h] / (R_d + 0.5[h])) / ((R_d + R_1)(R_d + [h])), \quad (16)$$

де:  $R_{d(i)}$  - нормальний радіус кривизни поверхні зуба  $D$  деталі та інструмента  $I$  в перерізі, що проходить через точку  $K$  перпендикулярно напрямку їх відносного переміщення;  $[h]$  - величина допуску на точність обробки

В результаті виконаних досліджень розв'язана задача синтезу найвигоднішого процесу формоутворення бокових поверхонь зубців при обробці циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами. Основою математичного забезпечення системи автоматизованого проектування технологічного процесу фінішної обробки коліс є диференціально-геометричний метод формоутворення поверхонь при механічній обробці деталей, котрий адаптований та розвинений стосовно до обробки циліндричних зубчастих коліс в умовах обкату.

### ГОЛОВНІ ВИСНОВКИ

В дисертації на основі диференціально-геометричного методу формоутворення поверхонь при механічній обробці деталей розроблено метод чистової обробки циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами в умовах обкату, який дозволяє для кожної конкретної деталі аналітичним шляхом вирішити задачу синтезу конструктивних параметрів інструменту, раціональних технологічних наладок та визначити шляхи подальшого підвищення ефективності процесу фінішної обробки. Для цього:

1. Аналітично описана та досліджена геометрія поверхонь зубців що

обробляються циліндричних зубчастих коліс; встановлені перша та друга основні квадратичні форми (диференціальні форми Гауса), записані через конструктивні параметри поверхні  $D$  деталі, котрі дозволяють в простій та наочній формі визначати елементи внутрішньої та зовнішньої локальної геометрії поверхні  $D$  зуба деталі.

2. На основі другого способу утворення вихідних інструментальних поверхонь знайдена допоміжна твірна поверхня у вигляді косозубої рейки. З використанням цього рішення аналітично отримано узагальнене рівняння вихідної інструментальної поверхні дискового зубообробного інструменту. Раніше подібна задача розв'язувалась для випадку обробки прямозубого колеса, що дає рішення часткової задачі.

3. Виконано детальне дослідження локальної геометрії вихідної інструментальної поверхні в диференціальній околиці поточної точки дотику поверхонь  $D$  та  $I$ , яке використовується для аналізу умов формоутворення та синтезу найвигіднішого процесу чистової зубообробки циліндричних зубчастих коліс.

4. Вперше запропоновано досліджувати верстатне зачеплення деталь-інструмент в локальній рухомій системі координат з початком в точці дотикання евольвентних гвинтових бокових поверхонь зубців деталі  $D$  та інструмента  $I$ . Це дозволяє на базі диференціально-геометричного методу формоутворення поверхонь при механічній обробці деталей створити математичну модель процесу формоутворення робочих поверхонь зубців коліс в простій формі.

5. Виведення залежностей для розрахунку локальних характеристик геометрії дотику поверхонь  $D$  та  $I$ , умов формоутворення поверхонь зубців колеса та інші питання синтезу в рухомій системі координат, вимагає виконання багаторазових переходів від рухомого репера до нерухомих систем координат та інші. Для цього створений замкнений цикл послідовних перетворень систем координат (в прямому та зворотному напрямках), пов'язаних з зубчастим колесом, інструментом, з крапкою дотику бокових поверхонь їх зубців стійками деталі та інструменту та інше.

6. Встановлена та досліджена взаємна локальна орієнтація евольвентних гвинтових бокових поверхонь зубців деталі та інструменту в диференціальній околиці точки їх дотику. Визначений кут відносно локальної орієнтації поверхонь  $D$  та  $I$ . Це дозволяє розраховувати конструктивні параметри дискового інструменту, при яких забезпечується найбільша ступінь конформності (повнота прилягання) у відповідному нормальному перерізі поверхонь  $D$  та  $I$ .

7. Розв'язана задача аналітичного описання геометрії дотику по-

верхні деталі та вихідної інструментальної поверхні по ступеню конформності цих поверхонь у відповідному плоскому нормальному перерізі. Ступінь конформності визначається по поточному значенню радіусу  $r_k$  дійсних гілок індикатриси конформності. В плоскому нормальному перерізі поверхонь деталі  $D$  та інструменту  $I$ , в якому радіус індикатриси конформності мінімальний, дотичні поверхні максимально конформні.

8. Визначено кут між напрямком першого головного перерізу деталі  $S_{1d}$  та напрямком, співпадаючим з мінімальним радіусом дійсних гілок індикатриси конформності. Цим кутом обумовлюється напрямок найвигіднішого миттєвого відносного переміщення поверхонь  $D$  та  $I$ .

9. Установлені залежності для відповідного погодження частоти обертання дискового інструменту з вектором руху подачі, яке забезпечить напрямок вектору швидкості різання перпендикулярно мінімальному діаметру  $d_{k.min}$  дійсних гілок індикатриси конформності. При цьому ширина рядка проходу буде максимальна і як наслідок продуктивність формоутворення зросте.

10. Досліджені закономірності зменшення точності параметрів вихідної інструментальної поверхні дискового зубообробного інструменту внаслідок його спрацювання, на основі цього розроблено спосіб стабілізації точності зубчастих коліс що обробляються по мірі зменшення діаметральних розмірів інструменту в процесі переточок. Це дає змогу підвищити точність обробки.

11. Проаналізовані умови формоутворення поверхонь при чистовій обробці циліндричних зубчастих коліс дисковими обкаточними інструментами і установлені обмеження на конструктивні параметри інструмента та параметри наладок технологічного процесу при яких умови формоутворення гарантовано виконуються.

12. На основі диференціально-геометричного методу формоутворення поверхонь при механічній обробці деталей розроблена потенційно повна система автоматизованого проектування технологічного процесу чистової обробки циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами в умовах обкату, котра дає змогу доповнюватись та розвиватись у відповідності з результатами нових досліджень.

13. Проведені експериментальні дослідження процесу чистової обробки зубчастих коліс на циліндричних моделях підтвердили вірність теоретичних розробок.

14. Результати досліджень впроваджені у виробництво, що дає змогу підвищити продуктивність чистової обробки циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами в умовах обкату приблизно в 1,5-2

рази. Деякі положення розробленого методу обробки використовуються у навчальному процесі підготовки інженерів-механіків по спеціальності технологія машинобудування в Дніпродзержинському державному технічному університеті.

Зміст дисертації опублікований в 28 роботах, основні з них наведені нижче.

1. Радзевич С.П., Палагута В.А. Новые достижения в области чистой обработки цилиндрических зубчатых колес. М.: ВНИИТЭМР, 1988. 52с. Пошукувач самостійно підготував два розділи оглядової інформації.
2. Радзевич С.П., Палагута В.А. Основные направления оптимизации процессов обработки металлов резанием на этапе технологической подготовки производства. М.: ВНИИТЭМР, 1991. 72 с. Здобувачеві належить підготовка матеріалів та написання двох розділів.
3. Палагута В.А. Исследование элементов геометрии станочного зацепления дискового инструмента и цилиндрического зубчатого колеса на отделочных операциях // Повышение эффективности процессов резания материалов. Волгоград: ВолгПИ, 1987, с. 52-59.
4. Радзевич С.П., Палагута В.А. Дисковые инструменты для отделки цилиндрических зубчатых колес // Машиностроитель, 1988, № 9, с. 22-23. Пошукувач розробляв конструкції дискових зубообробних інструментів.
5. Радзевич С.П., Палагута В.А. САПР чистой обработки цилиндрических зубчатых колес // Механизация и автоматизация производства, 1988, № 10, с. 13-15. Здобувачеві належить розробка математичної моделі розробленої блок-схеми алгоритму САПР.
6. Радзевич С.П., Палагута В.А., Пельх С.Б. Устройство для строгания стружечных канавок червячных шеверов // Технология и организация производства, 1989, № 1, с. 29-30. Пошукувач проектував та виготовляв пристрій для стругання канавок черв'ячних шеверів.
7. Радзевич С.П., Палагута В.А. Совершенствование технологии чистой обработки цилиндрических зубчатых колес дисковыми инструментами на основе использования особенностей геометрии контактирующих поверхностей и оптимизации кинематики формообразования // Самолетостроение. Техника воздушного флота. Харьков: Техніка, 1989, № 56, с. 88-95. Здобувачеві належить визначення елементів внутрішньої та зовнішньої геометрії поверхні деталі, яка оброблюється.
8. Радзевич С.П., Палагута В.А. Повышение эффективности процессов чистой обработки цилиндрических зубчатых колес дисковыми инструментами // Металлорежущие станки. К.: Техніка, 1990, с. 96-102. Здобувач проаналізував умови формоутворення бокових поверхонь зубців коліс та визначив оптимальний напрямок взаємних переміщень де-

талі та інструменту.

9. Палагута В. А. Повышение эффективности зубохонингования цилиндрических зубчатых колес // Технология механической обработки и сборки. Тула: ТулПИ, 1991, с. 21-24.

10. А. с. 1335388 (СССР) Способ шевингования цилиндрических зубчатых колес / Радзевич С. П., Палагута В. А. - Заявл. 30.12.85, N 4026262/31-08; Опубл. 07.09.87, Бюл. N 33.

11. А. с. 1388210 (СССР) Инструмент для чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес / Радзевич С. П., Палагута В. А. - Заявл. 18.03.86, N 4037313/31-08; Опубл. 15.04.88, Бюл. N 14.

12. А. с. 1514516 (СССР) Дисковый шевер / Палагута В. А. и др. - Заявл. 27.11.86, N 4152148/25-08; Опубл. 15.10.89, Бюл. N 38.

13. А. с. 1527476 (СССР) Способ контроля косозубых цилиндрических колес с эвольвентным профилем зубьев / Палагута В. А. и др. - Заявл. 02.12.87, N 4337897/25-28; Опубл. 07.12.89, Бюл. N 45.

14. А. с. 1530354 (СССР) Способ чистовой обработки зубчатых колес / Палагута В. А. и др. - Заявл. 17.02.87, N 4219972/31-08; Опубл. 23.12.89, Бюл. N 47.

15. А. с. 1537426 (СССР) Дисковый шевер / Палагута В. А. и др. - Заявл. 17.11.86, N 4147758/31-08; Опубл. 23.01.90, Бюл. N 3.

16. А. с. 1632662 (СССР) Чистовой зуборезный инструмент / Радзевич С. П., Палагута В. А. - Заявл. 30.03.89, N 4669761/31-08; Опубл. 07.03.91, Бюл. N 9.

17. А. с. 1646725 (СССР) Способ затачивания дискового шевера / Радзевич С. П., Палагута В. А. - Заявл. 13.12.88, N 4618613/31-08; Опубл. 07.05.91, Бюл. N 17.

18. Палагута В. А. Методы моделирования процессов отделки цилиндрических зубчатых колес дисковыми инструментами // Исследования в области формообразования поверхностей при механической обработке деталей. Днепродзержинский индустриальный и-т. / Деп. в УкрНИИТИ 22.03.88, с. 137-142.

19. Палагута В. А. Повышение точности затачивания дисковых шеверов / Деп. в ГНТБ Украины 08.07.93, N 1425 Ук 93, 11 с.

В роботах 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, пошукачеві належать суттєві ознаки, по яким ці роботи визнані винаходами.

Palaguta V. A. "Development and Study of Increasing of the Technical Gear Finish Operation Productivity by Disk Type Cutting Tools Operating by the Generating Principle"

The given thesis is submitted for the degree of Doctor of Philosophy of Technical Sciences on 05.03.01 speciality - Processes of mechanical manufacturing, machine-tools and metal cutting tools, National Ukrainian Technical University "Kiev Politechnical Institute", Kiev, 1995.

Seventeen scientific papers and eleven patents on invention in the field of gear finishing operation are defending; the main goal of the investigation is to increase the efficiency of gear manufacturing by application of disk-type finish gear cutting tools (gear shaving cutters, gear honning cutters etc.) works in accordance with generating principle; synthesis of an optimal design of finish gear cutting tool and an optimal kinematics of gear finish operation based on the results of investigation of differential parameters of contact part surface and machining surface of the finish gear cutting tool is made. As a result the CAD/CAM system of most profitable gear finish machining is created.

Палагута В. А. Разработка и исследование методов повышения производительности чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес дисковыми обкаточными инструментами. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 - процессы механической обработки, станки и инструменты, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт, Киев, 1995.

Защищается 17 научных работ и 11 авторских свидетельств, которые содержат основное содержание работы посвященной вопросам повышения эффективности процесса чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес дисковыми инструментами в условиях обката путем синтеза наиболее выгодного процесса формообразования инструментами с оптимальными конструктивными параметрами и кинематики формообразования на основе исследования дифференциальных характеристик геометрии контактирующих в станочном зацеплении боковых поверхностей зубьев детали и исходной инструментальной поверхности.

Ключові слова: формоутворення, дисковий зубообробний інструмент, дотик поверхонь, квадратична форма, зубчасте колесо, евольвентна гвинтова поверхня, система координат, кривизна.