

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ГНАТЮК АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 621.923.1+621.833.6

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ПРОФІЛЮ
ЦІВКОВОГО КОЛЕСА ГЕРОТОРНОЇ ПАРИ**

Спеціальність 05.03.01 – Процеси механічної обробки,
верстати та інструменти

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2019

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі «Металорізальні верстати та системи» Центральноукраїнського національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент
Скібінський Олександр Іванович,
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, доцент кафедри технології машинобудування.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Грицай Ігор Євгенович,
Національний університет «Львівська політехніка», м Львів, завідувач кафедри технології машинобудування

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Кривошея Анатолій Васильович,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України, м. Київ, старший науковий співробітник відділу обробки металів різанням та деформуванням

Захист відбудеться 6 червня 2019 р. о 13⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради К23.073.02 у Центральноукраїнському національному технічному університеті за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий 3 травня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. К. Дідик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Покращення якісних характеристик зубчатих коліс, як найважливіших елементів механічних передач, було завжди актуальною та важливою науково-практичною задачею. Не є виключенням і колеса, які утворюють внутрішнє зачеплення героторної пари, яка знайшла широке застосування в гідравлічних машинах, приводах і механізмах транспортних засобів, роботів, бурового устаткування, тощо. Але питання якісного виготовлення та створення точних і гнучких методів обробки профілів цих коліс залишається актуальним.

Характерною особливістю наведеного зачеплення є те, що ефективність та довговічність роботи, його ККД, безпосередньо залежать від точності виготовлення профільних робочих поверхонь коліс, їх шорсткості та поверхневої твердості. Тому особливу зацікавленість викликають точні, фінішні методи обробки. Внутрішнє колесо (сателіт) має зовнішні зубці, профіль яких окреслений еквідистантою до вкороченої епіциклоїди. Зовнішній зубчатий вінець не обмежує габарити і конструктивне виконання різального інструменту, а також забезпечує його повноцінний доступ до оброблюваної поверхні. Наведені конструктивні особливості роблять профіль сателіту технологічним у виготовленні. Зовнішнє колесо з внутрішніми зубцями – цівкове колесо, профіль зубців якого окреслено дугами постійного радіусу. Така конструкція вносить певні технологічні обмеження під час виготовлення. В першу чергу конфігурація цівкового колеса накладає обмеження на різноманіття технологічних рухів та конструктивне виконання інструментів. Також має місце залежність розмірів інструменту від конструктивних параметрів колеса, що впливає на його жорсткість, а відповідно і на точність при обробці.

Аналіз літературних джерел, наукових публікацій та патентів показує, що для обробки внутрішнього профілю цівкового колеса існує низка специфічних методів, які мають суттєві недоліки. Для реалізації деяких з них застосовуються дуже дорогі спеціалізовані верстати, для інших – спеціальний складний інструмент та оснащення, які проектуються під конкретну деталь. При високій твердості деталі (порядка 60 HRC), частина з відомих методів, здебільшого лезової обробки, виявляється непридатною для застосування. Для більшості відомих методів обробки практично відсутні ґрунтовні дослідження стосовно їх фізичної суті, та щодо забезпечуваних ними показників якості. Також залишаються відкритими питання, присвячені вибору раціональних конструктивних параметрів при проектуванні зачеплення, та синтезу кривих, що окреслюють профілі коліс. Тому актуальним є проведення досліджень, спрямованих на удосконалення існуючих та розробку принципово нових методів фінішної обробки профілів цівкових коліс, які давали б змогу досягати заданих якісних характеристик їх робочих поверхонь, та потребували нескладного і малозатратного інструменту.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувались згідно держбюджетної науково-дослідної програми Центральноукраїнського національного технічного університету за темою «Оптимізація технологічних процесів обробки робочих

поверхонь деталей позацентроїдних епіциклоїдальних передач» (ДР №0105U005360).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є удосконалення процесу фінішної обробки профілю цівкового колеса героторної пари.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення низки задач:

1. Визначити умови існування кривих, що окреслюють профілі коліс героторної пари (еквідистант до епіциклоїд і обвідних їх сімейств) в придатному для синтезу зачеплення вигляді.

2. Представити та обґрунтувати шляхи вдосконалення процесу фінішної обробки цівкового колеса.

3. Розробити методики проектування інструменту, дослідити робочі параметри різних варіантів конструкції інструментів.

4. Провести аналіз кінематичних варіантів верстатних зачеплень, в основу яких покладено принцип заміни спряженого колеса інструментом з ідентичним замінюваному колесу профілем.

5. Дослідити кінематику контактної взаємодії інструменту і цівкового колеса у верстатному зачепленні (в плоскому зачепленні та в просторовому), визначити її основні залежності.

6. Провести моделювання процесу фінішної обробки з урахуванням силових факторів, та виконати прогнозування імовірної похибки профілю цівкового колеса, як результату пружних деформацій елементів оснащення.

7. Експериментально дослідити якісні показники обробки (точність розмірів, геометричної форми, та шорсткість), отримані в ході реалізації методу фінішної обробки, та визначити оптимальні режими обробки.

8. Представити шляхи впровадження удосконаленого методу фінішної обробки профілів цівкових коліс у виробництво, що включає в себе розробку оснащення для його реалізації на існуючому універсальному обладнанні, та розробку нових концепцій зубообробного обладнання та інструментів.

Об'єкт дослідження – процес фінішної обробки внутрішнього профілю цівкового колеса героторної пари.

Предмет дослідження – вплив параметрів процесу фінішної обробки на показники точності та шорсткості оброблюваного профілю цівкового колеса.

Методи дослідження. При проведенні досліджень були застосовані класичні положення аналітичної геометрії, аналізу функцій, теорії формоутворення поверхонь, теорії обвідних сімейств плоских кривих, теорії різання абразивним інструментом, теорії проектування інструменту, теорії зубчатих зачеплень. Для моделювання дії сил на елементи технологічної системи було застосовано метод скінченних елементів. Для вирішення задач моделювання, побудови і розрахунків, було використано ліцензійний програмний комплекс «SOLIDWORKS», та його додатки. Для постановки експериментальних досліджень була використана теорія ротатбельного композиційного планування. Експериментальні дослідження проводились у виробничих умовах діючого підприємства ТОВ Кіровоградський інструментальний завод «ЛЕЗО».

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше визначено умови існування спряженої обвідної сімейства еквідистант до епіциклоїд у вигляді єдиної неперервної кривої. Встановлено, що введення модифікованої функції кутового коефіцієнту в розв'язок рівняння зв'язку параметру побудови еквідистанти до епіциклоїди і параметру що визначає криву із множини сімейства, дозволяє побудувати обвідну в неперервному вигляді, без порушень гладкості. Наведені результати можуть бути використані при описанні обвідних сімейств алгебраїчних кривих, зокрема тих, що окреслюють профілі зубчатих коліс або інструментів.

2. Обґрунтовано доцільність застосування увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди в якості формотворного профілю інструменту для фінішної абразивної обробки профілю цівкового колеса. Встановлено, що застосування профілю інструменту, який має однаковий знак кривизни із оброблюваним профілем цівки, позитивно впливає на шорсткість поверхні, що підтверджено теоретично і експериментально.

3. Вперше формалізовано опис процесу фінішної обробки циліндричної поверхні цівки у вигляді функцій, які описують рух точки контакту інструменту з цівкою в плоскому і просторовому зачепленні. Дані функції враховують змінні умови контактної взаємодії (зміна швидкості обкату, обумовлена нерівномірною кривизною профілю інструменту), та дозволяють отримати модель обробленої поверхні, при заданих режимах обробки.

4. Вперше встановлено аналітичний зв'язок та виявлено вплив технологічних режимів обробки (частоти обертання ексцентричної вісі цівкового колеса навколо вісі центроїди інструменту, швидкості зворотно-поступального руху інструменту і частоти обертання круга) на параметри відхилення від заданого профілю δf , та шорсткість Ra обробленого профілю цівкового колеса. Це дозволило отримати оптимальні співвідношення параметрів процесу, які забезпечують найкращі значення якісних показників.

Практична цінність одержаних результатів.

1. Визначено умови існування еквідистанти до епіциклоїди в придатному для синтезу профілю сателіту або інструменту вигляді. Встановлено, якщо відстань віддалення еквідистанти перевищує мінімальний радіус кривизни епіциклоїди, це призводить до появи «вироджених ділянок».

2. Розроблено інженерну методику синтезу і розрахунку профілю шліфувального круга на основі увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди, визначено область застосування даного інструменту в залежності від конструктивних параметрів оброблюваного колеса.

3. Теоретично доведена можливість лінеаризації швидкості обкату точки контакту профілів інструменту і колеса, що дає змогу досягти постійності подачі на подвійний хід інструменту і відповідно – підвищити точність формоутворення. Визначено функції лінеаризації.

4. Підвищено точність побудови увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди, що дає змогу покращити точність профілювання абразивного інструменту в процесі його виготовлення або правки.

5. Отримано теоретичний прогноз похибки профілю цівкового колеса (в межах однієї цівки), як результату пружних деформацій елементів

технологічного оснащення під дією сил різання. Це дозволило ідентифікувати фактори, які впливають на відхилення (конструкція шліфувальної оправки з виносним шпинделем, нерівномірна кривизна профілю інструменту, зміна сил різання по величині і напрямку), та надати відповідні рекомендації щодо усунення та мінімізації впливу зазначених факторів.

6. Доведено, що інструмент з профілем на основі увігнутої ділянки має підвищену стійкість (експериментально – 12 цівок), у порівнянні з опуклим профілем (4 цівки), що дає можливість застосовувати абразивний інструмент на керамічній зв'язці, який відрізняється низькою собівартістю.

7. Представлено ряд інноваційних технічних рішень, які сприятимуть впровадженню гнучкої технології фінішної обробки коліс героторної пари, а саме: конструкцію безпривідної шліфувальної оправки з виносним шпинделем; компоновку багатофункціонального зубошліфувального обробного центру; методики розрахунку черв'ячних інструментів для високопродуктивної технології обробки сателіту; новий інструмент для високопродуктивної фінішної обробки цівкових коліс із $z > 10$ і методики його розрахунку.

8. Окремі результати дисертаційної роботи впроваджено у виробництво на ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «Лезо», а саме модифікований варіант шліфувальної оправки з виносним шпинделем, яка адаптована до вертикального обробного центру Millstar BMV850. Дана оправка розширює технологічні можливості наведеного обладнання і дає змогу здійснювати шліфування внутрішніх поверхонь деталей з обмеженим доступом.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати, що наведені в дисертації, одержані автором самостійно. У наукових статтях, які опубліковані у співавторстві, дисертанту належить наступне: [1] – проаналізована залежність радіусу кривизни еквідистанти до епіциклоїди від параметру побудови, та встановлено, що поява «вироджених ділянок» на профілі еквідистанти до епіциклоїди обумовлена вибором значення радіуса цівки, яке перевищує мінімальний радіус кривизни епіциклоїди. [2] – проаналізовано варіанти функцій кутового коефіцієнту еквідистанти до епіциклоїди, в усіх випадках відмічено наявність порушень гладкості та неперервності, запропоновано здійснювати перетворення зазначених функцій до неперервного гладкого вигляду за окремою формулою, що дозволяє описати обвідну сімейства еквідистант до епіциклоїд як єдину неперервну криву; [4] – проведено дослідження кінематики контактної взаємодії профілю цівки з еквідистантою до вкороченої епіциклоїди, визначено функції одночасних швидкостей руху точки уздовж еквідистантного профілю і уздовж дуги цівки, запропоновано можливість лінеаризації зазначених швидкостей; [6] – проведено моделювання шорсткості обробки, яка забезпечується різними варіантами геометрії формотворного профілю інструменту, визначено нерівномірний розподіл мікронерівностей уздовж шліфованої дуги цівки; [3] – вдосконалено методику аналітичного опису вихідного контуру інструментальної рейки черв'ячного інструменту (черв'ячної фрези або шліфувального круга) для високопродуктивної обробки профілю сателіту.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи було обговорено на Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні

технології в металургії та машинобудуванні» (28–30 березня 2017 р., м. Дніпро); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (24–27 квітня 2017 р., м. Чернігів); XVII Міжнародній науково-практичній конференції «Машинобудування очима молодих: Прогресивні ідеї – Наука – Виробництво» (1–3 листопада 2017 р., м. Чернігів); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні» (4–8 лютого 2019 р., м. Івано-Франківськ – м. Яремче).

Публікації за матеріалами дисертації. За результатами роботи опубліковано 15 наукових праць, із них: 9 статей у фахових наукових виданнях України, матеріали 4-х доповідей на наукових конференціях, отримано 2 патенти України на винахід. Із них 5 статей включені до міжнародних наукометричних баз (у тому числі SciVerseScopus).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 132 найменувань на 15 сторінках та 6 додатків на 35 сторінках. Основний текст дисертації викладений на 153 сторінках, повний обсяг дисертації становить 224 сторінки, включаючи 69 рисунків та 10 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету, об'єкт, предмет та задачі наукових досліджень, показано наукову новизну одержаних результатів та їх практичну значимість. Наведено результати апробації результатів досліджень, кількість публікацій, та особистий внесок здобувача.

В першому розділі розглянуто властивості, конструктивне виконання зачеплення ГП, особливості геометрії коліс ГП та існуючі методи їх обробки. Зокрема, питання розробки і дослідження процесів формоутворення коліс ГП розглянуто в роботах Майрона Хілла (Myron F. Hill), В. М. Шаннікова, В. К. Лобасова, Ф. Л. Литвина, Е. Н. Шевцова, А. В. Мацкевича, О. І. Скібінського, М. М. Підгаєцького. Оригінальні технічні рішення також представлені в закордонних патентах, зокрема таких відомих фірм як Parker Hannifin Corp., Ex-Cell-O Corp., Danfoss A/S, Hill Engineering Company, та ін.

Сателіт, який має зовнішній зубчатий вінець, є технологічним у виготовленні, тому методи його обробки детально не аналізувались. Цівкове колесо має внутрішні зубці, його конфігурація накладає технологічні обмеження на різноманіття технологічних рухів, розміри, та конструктивне виконання інструментів. Аналіз наукової та патентної літератури показує, що існуючі методи обробки профілю цівкового колеса мають низку суттєвих недоліків:

- недостатня якість поверхні, та обмеження по твердості заготовки до 40 HRC при обробці лезовими інструментами (методи зубодовбання);
- діаметр інструменту обмежується западиною між цівками і як наслідок – недостатня жорсткість циліндричного шліфувального круга при обробці на контурно-шліфувальних верстатах;

- складність конструкції інструментів та оснащення для здійснення методів хонінгування, їх низька гнучкість;

- висока собівартість спеціалізованих верстатів ф. KAPP-NILES.

Також залишаються відкритими питання, присвячені вибору раціональних конструктивних параметрів при проектуванні зачеплення ГП, та синтезу кривих, що окреслюють профілі коліс. Відповідно, існує необхідність проведення досліджень, спрямованих на удосконалення існуючих та розробку принципово

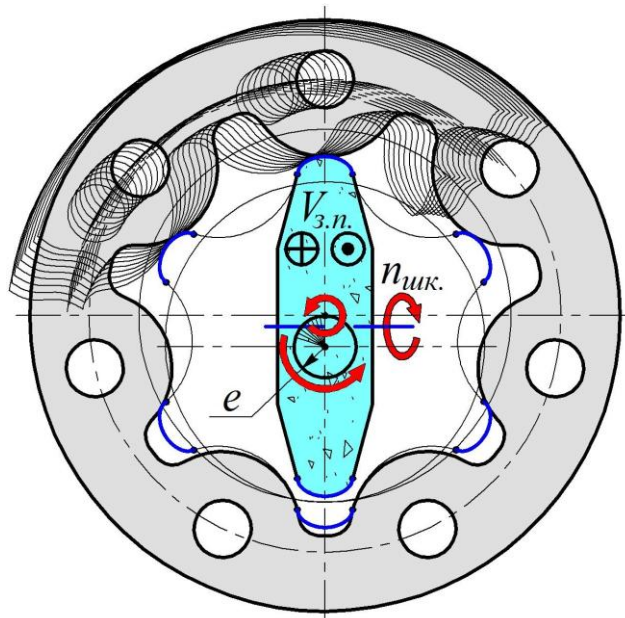


Рис. 1. Схема шліфування профілю цівкового колеса в умовах обкату

нових методів фінішної обробки профілів цівкових коліс. На основі проведеного аналізу, була обрана прогресивна схема обробки дисковим шліфувальним кругом в умовах обкату (рис. 1), яка бере свій початок від методу зубодовбання. Згідно цієї схеми, цівкове колесо здійснює планетарний рух, який поєднує в собі поступальний рух по колу обкату з радіусом e і обертання цівкового колеса навколо власної вісі. Кругу окрім обертання ($n_{шк.}$), надається зворотно-поступальний рух ($V_{з.п.}$). В якості профілю інструменту застосовується опукла ділянка еквідистанти до епіциклоїди (ОДЕЕ).

Обробка за цією схемою має наступні переваги:

- можливість застосування простих і недорогих інструментів – дискових шліфувальних кругів, які мають можливість швидкого відновленням різальних властивостей безпосередньо на верстаті, шляхом контурної правки;

- обробка здійснюється в умовах обкату з притаманною даному методу точністю і продуктивністю;

- виправлення похибок геометрії профілю після попередніх операцій;

- можливість обробки загартованих деталей з твердістю ~ 60 HRC;

- гнучкість методу, якої можна досягти за рахунок ЧПК.

Відомості про впровадження зазначеного методу у виробництво відсутні, як і інформація щодо забезпечуваних ним якісних показників. Тому процес обробки за представленою схемою потребує детального вивчення.

У другому розділі представлено вирішення питань стосовно аналізу і синтезу профілів-кривих зачеплення, та представлена можливість удосконалення базового методу шліфування шляхом застосування увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди (УДЕЕ) в якості формотворного профілю круга.

Так, для забезпечення відсутності «вироджених ділянок» на еквідистанті, радіус цівки колеса r_c , який визначає відстань віддалення еквідистанти, не повинен перевищувати мінімальний радіус кривизни епіциклоїди ρ_{min} . Дослідивши залежність радіуса кривизни епіциклоїди ρ від параметру побудови

φ на наявність екстремуму, отримуємо значення параметру φ_m , який відповідає мінімальному радіусу кривизни епіциклоїди ρ_{min} :

$$\varphi_m = \frac{z_2}{z_1} \cdot \arccos \left[\frac{R_{у.у.}^2 \cdot (2 \cdot e - R_2) + R_2^2 \cdot (2 \cdot R_2 - e)}{R_2 \cdot R_{у.у.} \cdot (R_2 + e)} \right], \quad \rho_{min} = \rho(\varphi_m), \quad (1)$$

де z_1 і z_2 – кількості зубців сателіту і цівкового колеса, причому $z_2 = z_1 + 1$;

$R_{у.у.}$ – радіус центрів цівок оброблюваного колеса;

R_1 і R_2 – радіуси центрів сателіту і цівкового колеса, $R_1 = e \cdot z_1$ і $R_2 = e \cdot z_2$.

Таким чином, еквідистанта існуватиме без дефектів за умови $r_u < \rho(\varphi_m)$.

Виконано аналітичний опис обвідної сімейства еквідистант до епіциклоїд в єдиному неперервному вигляді (рис. 2).

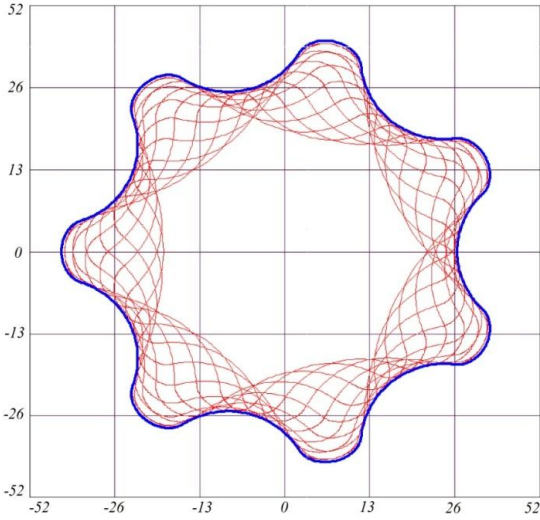


Рис. 2. Сімейство еквідистант до епіциклоїд і його обвідна

Приведення функції кутового коефіцієнту епіциклоїди до гладкого неперервного вигляду, дозволило отримати раціональний аналітичний розв'язок рівняння $f(\varphi, t) = 0$, яке поєднує в собі параметр побудови φ і параметр t , що визначає криву із множини сімейства. Це дозволяє здійснити опис обвідної як єдиної неперервної кривої, а отримана методика знайшла подальший розвиток при знаходженні обвідних сімейств різних алгебраїчних кривих (зокрема тих, які описують профілі зубчатих коліс або інструментів). Рівняння що описують обвідну мають вигляд:

$$X_{у.к.}(\varphi) = e \cdot \cos(t(\varphi)) + R_{у.у.} \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) - e \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right) - \frac{r_u \cdot \left(R_{у.у.} \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) - R_2 \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right) \right)}{\sqrt{R_2^2 + R_{у.у.}^2 - 2 \cdot R_2 \cdot R_{у.у.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}, \quad (2)$$

$$Y_{у.к.}(\varphi) = e \cdot \sin(t(\varphi)) - R_{у.у.} \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) + e \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right) + \frac{r_u \cdot \left(R_{у.у.} \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) - R_2 \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right) \right)}{\sqrt{R_2^2 + R_{у.у.}^2 - 2 \cdot R_2 \cdot R_{у.у.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}, \quad (3)$$

$$t(\varphi) = \frac{z_1}{z_2} \left[\arcsin \left(\frac{R_{у.у.} \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{\sqrt{R_{у.у.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{у.у.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}} \right) - \arctg \left(\frac{R_2 \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{R_{у.у.} - R_2 \cdot \cos\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)} \right) - \frac{\varphi}{z_2} \right]. \quad (4)$$

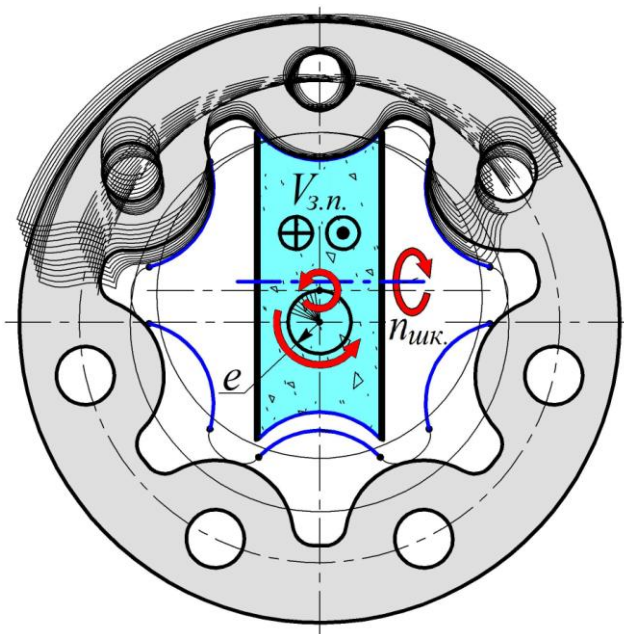


Рис. 3. Застосування УДЕЕ в якості формотворного профілю шліфувального круга

Базовий метод шліфування цівкового колеса передбачає ведення обробки за допомогою круга, який має профіль на основі ОДЕЕ. Опуклий профіль інструменту і дуга цівки мають кривизну різних знаків. Взаємодія цих профілів характеризується малими довжинами задіяних в роботі ділянок, та великими значеннями висоти гребінців мікронерівностей. Для зменшення висоти мікронерівностей під час шліфування згідно базового методу, пропонується застосувати для профілювання інструменту увігнуту ділянку еквідистанти до епіциклоїди (УДЕЕ) (рис. 3). З метою обґрунтування доцільності застосування УДЕЕ для зменшення шорсткості, виконано графічне моделювання утворення

мікронерівностей уздовж активної ділянки дуги цівки. Результати моделювання представлені на рис. 4. Побудова проводилась для 5-ти значень дискретності кута повороту центроїди інструменту. Для кожного з цих значень було побудовано індивідуальний графік.

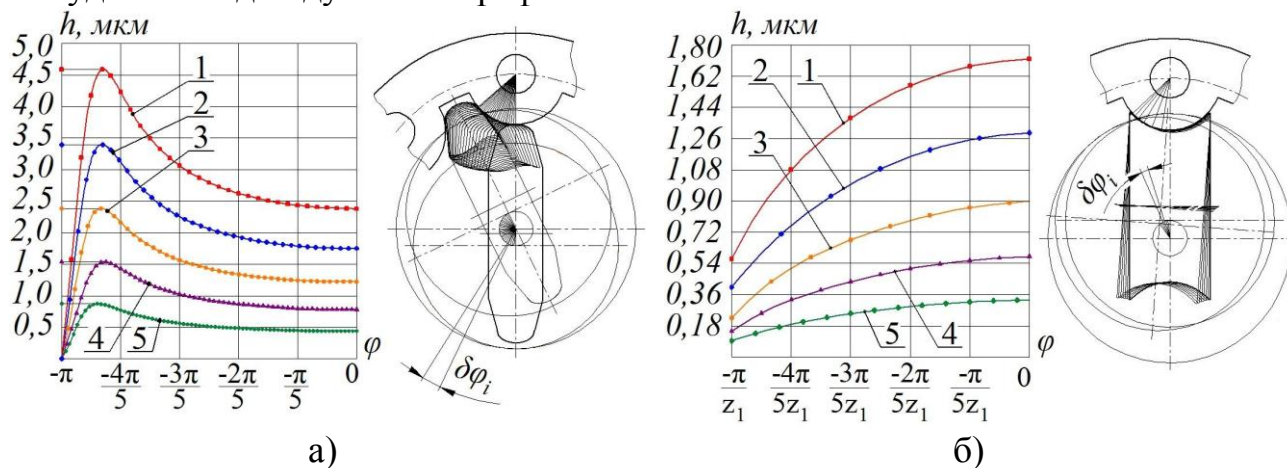


Рис. 4. Графіки розподілу висоти мікронерівностей h уздовж активної ділянки дуги цівки для моделювання обробки кругом з профілем на основі ОДЕЕ (а) і УДЕЕ (б); 1 – графік що відповідає дискретності кута повороту центроїди $\delta\varphi_i = 6^\circ$; 2 – для $\delta\varphi_i = 5^\circ$; 3 – $\delta\varphi_i = 4^\circ$; 4 – $\delta\varphi_i = 3^\circ$; 5 – $\delta\varphi_i = 2,4^\circ$

В умовах моделювання, застосування УДЕЕ в якості формотворного профілю інструменту дозволяє досягти шорсткості в 2,5-2,8 рази меншої у порівнянні з ОДЕЕ, при меншій в z_1 разів кількості врізань, та однакових значеннях дискретності $\delta\varphi_i$.

Конструктивне виконання профілю на основі ОДЕЕ запозичено від відомого лезового інструменту – однозубого довбача. Для синтезу повноцінного профілю круга на основі УДЕЕ, було запропоновано поєднати безпосередньо

УДЕЕ із допоміжними спряженими радіусними ділянками, які забезпечать усунення гострих граничних кромки (рис. 5). Точка спряження допоміжного профілю з УДЕЕ відповідає точці перегину. Значення радіуса спряженого кола $r_{cn.}$ може обиратись в межах від 0 до $r_{cn.}^{max}$. Значення $r_{cn.}^{max}$ відповідає колу, яке дотикається до еквідистанти в двох точках – T_n і T_o . За межами ОДЕЕ знаходиться зона інтерференції, тому приймати $r_{cn.} > r_{cn.}^{max}$ не рекомендовано. Гостру кромку, утворену радіусом $r_{cn.}$ і торцем круга бажано округлити. В підсумку, для побудови допоміжного профілю за межами точки перегину, необхідно дотримуватись наступних рекомендацій:

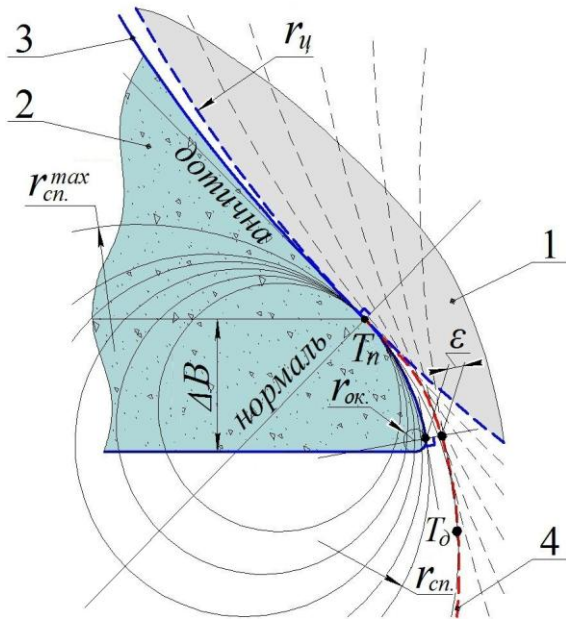


Рис. 5. Конструктивне виконання допоміжного профілю інструменту за межами точки перегину у вигляді спряженого кола
1 – фрагмент цівки; 2 – фрагмент шліфувального круга; 3 – УДЕЕ;
4 – ОДЕЕ

- контури допоміжного профілю повинні вписуватись в область, окреслену ОДЕЕ без інтерференції;

- значення $r_{cn.}$ необхідно обирати максимально можливим в межах $r_{cn.}^{max}$ (для забезпечення стійкості), водночас забезпечуючи зазор ϵ між ОДЕЕ і незадіяним в роботі округленням $r_{ок.}$;

- приріст ΔB на ширину круга приймати більшим за величину $r_{cn.}$ нерационально (хоч і можливо), що обумовлено обмеженням габаритів інструменту і оснащення, для їх вільного проходження крізь порожнину колеса.

Додатково проведено дослідження робочих характеристик інструментів за критеріями коефіцієнтів використання профілю та питомого навантаження. Встановлено вплив параметру $r_{ц}$ на коефіцієнт питомого навантаження на профіль, який визначається співвідношенням довжин дуг взаємодіючих профілів. Формули для значень $r_{ц}'$ і $r_{ц}''$, за яких досягається рівність дуг ОДЕЕ та УДЕЕ, а також ОДЕЕ і активної ділянки дуги цівки мають вигляд:

$$r_{ц}' = \frac{2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n}{\varphi_n} \frac{\int_{-\varphi_n}^{\varphi_n} \Delta V_E(\varphi) d\varphi}{\int_{\varphi_n}^{2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n} \frac{\Delta V_E(\varphi)}{\rho(\varphi)} d\varphi + \int_{-\varphi_n}^{\varphi_n} \frac{\Delta V_E(\varphi)}{\rho(\varphi)} d\varphi}; \quad r_{ц}'' = \frac{2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n}{\varphi_n} \frac{\int_{\varphi_n}^{2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n} \Delta V_E(\varphi) d\varphi}{\theta + \int_{\varphi_n}^{2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n} \frac{\Delta V_E(\varphi)}{\rho(\varphi)} d\varphi} \quad (5)$$

де $\Delta V_E(\varphi) = \sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}$ ($x(\varphi)$ і $y(\varphi)$ – координати епіциклоїди);
 θ – кут, що обмежує активну ділянку дуги цівки (рад.);

φ_n – значення параметру яке відповідає точці перегину епіциклоїди ($\rho(\varphi_n) \rightarrow \infty$);

Таким чином, застосування ОДЕЕ в якості профілю інструменту рекомендовано, якщо $r_u < r'_u$. Застосування УДЕЕ рекомендовано, якщо $r_u \geq r'_u$.

У третьому розділі наведені основні теоретичні дослідження процесу фінішної обробки цівкового колеса та їх результати. Аналіз можливих взаємних рухів інструменту і цівкового колеса у верстатному зачепленні показав, що окрім схеми рис. 1, формоутворення профілю можливе щонайменше за п'ятьма різними схемами. В кожній схемі завжди наявна вхідна кінематична ланка, яка задає швидкість обкату в зачепленні. Вихідна кінематична ланка здійснює кінематично узгоджений рух (поступальний, обертальний, планетарний або

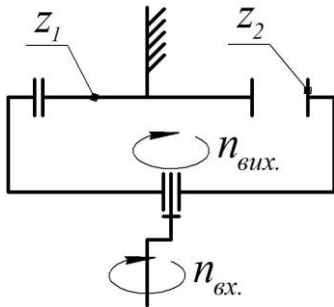


Рис. 6. Кінематика верстатного зачеплення

осцилюючий), а значення швидкості цього руху пов'язане зі швидкістю вхідної ланки кінематичним співвідношенням. Кінематична схема верстатного зачеплення, в якому цівкове колесо здійснює планетарний рух, представлена на рис. 6. Відносно центру кола обкату, вісь колеса обертається із частотою $n_{ех.}$ – вхідною частотою, яка задає темп обкату. Частота обертання цівкового колеса навколо власної вісі – вихідна частота $n_{вих.}$, яка пов'язана із $n_{ех.}$ кінематичним співвідношенням:

$$n_{вих.} = n_{ех.} / z_2 \quad (6)$$

Для кожної з бти схем, співвідношення індивідуальне. У верстатних системах, співвідношення можуть бути реалізовані за допомогою ЧПК.

Проведене дослідження кінематики контактної взаємодії інструменту і профільної поверхні колеса свідчить про змінний швидкісний режим точки контакту профілів в плоскому верстатному зачепленні. В залежності від системи відліку, точка контакту переміщується одночасно уздовж еквідистанти і дуги цівки з різними швидкостями $V_1(\varphi)$ і $V_2(\varphi)$ (рис. 7). Швидкість переміщення центру цівки уздовж епіциклоїдальної траєкторії:

$$V(\varphi) = 2\pi \cdot \frac{n_{ех.}}{z_2} \cdot \sqrt{R_{ц.у.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{ц.у.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}, \quad (7)$$

Швидкість переміщення точки контакту уздовж еквідистанти до епіциклоїди:

$$V_1(\varphi) = \frac{V(\varphi) \cdot (\rho(\varphi) - r_u)}{\rho(\varphi)}, \quad (8)$$

Швидкість переміщення точки контакту уздовж дуги цівки визначаємо зі схеми рис. 7, використовуючи закономірність, що нормаль в точці контакту завжди проходить через полюс зачеплення p центроїд R_1 і R_2 (теорема Вілліса):

$$|V_2(\varphi)| = \omega_p(\varphi) \cdot r_u = \frac{R_1 \cdot 2\pi \cdot n_{ех.} \cdot \cos(\alpha(\varphi)) \cdot r_u}{\sqrt{R_{ц.у.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{ц.у.} \cdot R_2 \cdot \cos(\varphi \cdot z_1 / z_2)}} \quad (9)$$

Швидкість у формулі (9) представлена у вигляді модулю, оскільки завжди являє собою абсолютне додатне значення, яке не враховує вектор руху. Кут $\alpha(\varphi)$ між напрямом поступальної швидкості полюсу V_p і перпендикуляром до

відрізку A_1P , знаходимо за теоремами синусів і косинусів:

$$\alpha(\varphi) = \arcsin \left(\frac{R_{ц.у.} \cdot \sin(\varphi \cdot z_1/z_2)}{\sqrt{R_{ц.у.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{ц.у.} \cdot R_2 \cdot \cos(\varphi \cdot z_1/z_2)}} \right). \quad (10)$$

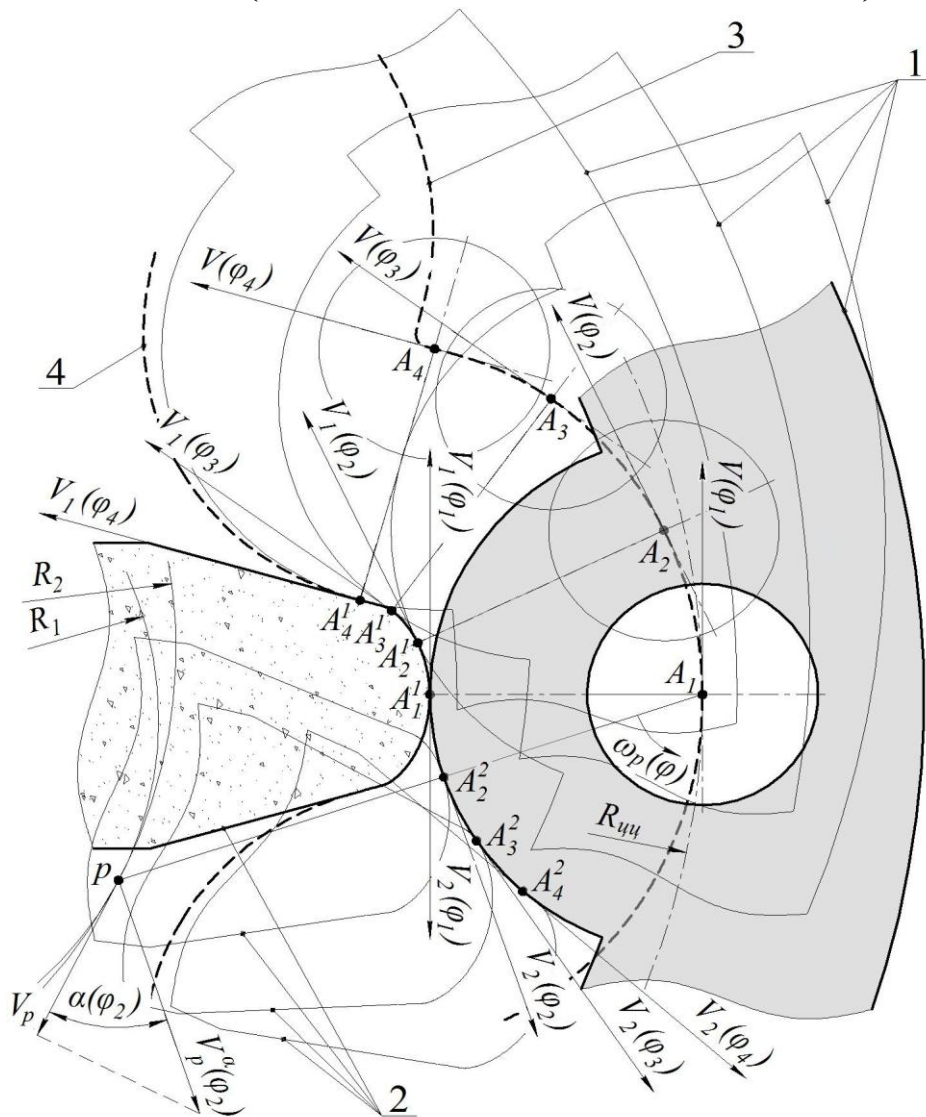


Рис. 7. Схема взаємних відносних переміщень цівки і шліфувального круга
1 – положення цівкового колеса в різних фазах обкату; 2 – положення круга в різних фазах обкату відносно цівки; 3 – траєкторія переміщення центру цівки (епіциклоїда); 4 – еквідистанта до епіциклоїди

Швидкості $V(\varphi)$, $V_1(\varphi)$, $|V_2(\varphi)|$ ($V_2(\varphi)$) мають змінний циклічний характер (рис. 8), що обумовлено нерівномірною кривизною еквідистанти до епіциклоїди. Однойменність знаків швидкостей $V_1(\varphi)$ і $V_2(\varphi)$, а також збіг їх графіків в період контакту цівки із УДЕЕ, свідчить про те, що має місце попутний обкат профілів (кочення і проковзування). Контакт із ОДЕЕ характеризується різнойменними знаками швидкостей, що свідчить про зустрічний обкат (ковзання). Аналізуючи графіки рис. 8, стає очевидним, що довжина дуги прошліфованої ділянки цівки за один подвійний хід інструмента (так звана подача на подвійний хід) не буде постійною. Колова подача буде змінюватись пропорційно швидкості $|V_2(\varphi)|$ і визначатиметься за формулою:

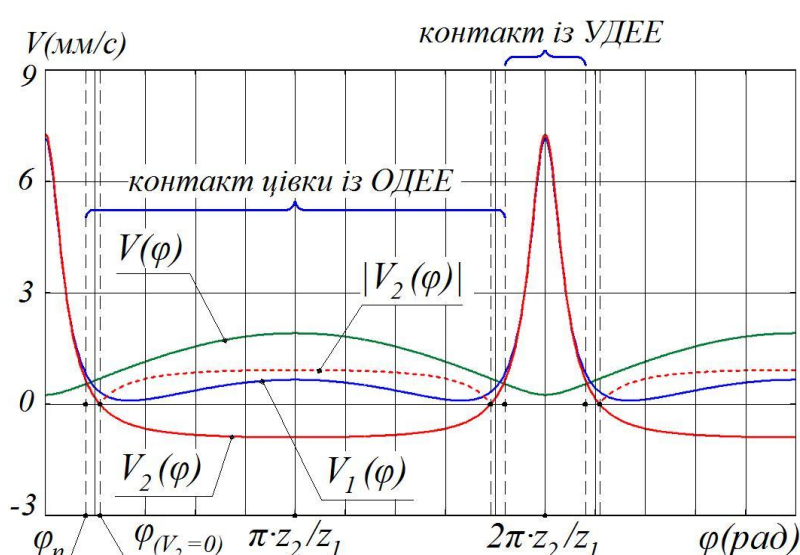


Рис. 8. Графіки зміни швидкостей $V(\varphi)$, $V_1(\varphi)$, $|V_2(\varphi)|$, $V_2(\varphi)$

$$S_{n.x.}(\varphi) = \frac{60 \cdot |V_2(\varphi)|}{V_{3.n.}} \quad (11)$$

Як відомо, така зміна подачі буде призводити до зміни параметрів точності і шорсткості поверхні. Досягти постійності подачі на подвійний хід можливо шляхом лінеаризації швидкості $|V_2(\varphi)|$. Для цього, частоту $n_{ex.}$ необхідно задавати вигляді функції лінеаризації $n_{ex.}(\varphi)$, яка забезпечує дотримання умови $|V_2(\varphi)| = const.$

Функція лінеаризації матиме вигляд:

$$n_{ex.}(\varphi) = \frac{30 \cdot z_2 \cdot V_2 \cdot \sqrt{R_{у.у.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{у.у.} \cdot R_2 \cdot \cos(\varphi \cdot z_1/z_2)}}{2\pi \cdot r_u \cdot R_2 \cdot z_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{R_{у.у.}^2 \cdot \sin^2(\varphi \cdot z_1/z_2)}{R_{у.у.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{у.у.} \cdot R_2 \cdot \cos(\varphi \cdot z_1/z_2)}}}. \quad (12)$$

Знайдена функція підставляється у формулу (9) замість $n_{ex.}$, забезпечуючи постійність $S_{n.x.}(\varphi)$. При цьому швидкість V_2 задається як постійна, яка обирається в залежності від бажаного значення подачі.

Дослідивши закони руху точки контакту на площині, можна одразу записати систему рівнянь, що описує просторову траєкторію точки контакту, додавши координату Z , яка змінюється за законом тригонометричної функції:

$$\Psi(\varphi) = \begin{pmatrix} X(\varphi) = r_u \cdot \cos(\alpha(\varphi)) \\ Y(\varphi) = r_u \cdot \sin(\alpha(\varphi)) \\ Z(\varphi) = A \cdot \sin(\varphi \cdot V_{3.n.}/n_{ex.}) \end{pmatrix}, \quad (13)$$

де A – амплітуда коливань інструменту, яка враховує висоту деталі та величину перебігу інструменту під час його виходу за межі шліфованої поверхні.

Теоретичне дослідження точності формоутворення профілю цівкового колеса, що забезпечується шліфуванням в умовах обкату, передбачає два етапи:

- дослідження закономірності зміни сил різання, обумовлених особливостями геометрії формотворних профілів на основі ОДДЕ і УДДЕ;
- моделювання пружних відтисків інструменту на основі отриманих силових залежностей, та прогнозування похибки профілю цівкового колеса.

Для визначення сил, що супроводжують процес обробки цівкового колеса в умовах обкату, була застосована модель С. М. Корчака для радіальної складової сили різання P_y . Згідно цієї моделі, складова P_y для одиничного зерна є сумою двох складових – сили яка спричиняє пластичну деформацію P_y^s і сили тертя матеріалу по гранях зерна P_y^f , тобто $P_y^o = P_y^s + P_y^f$. Далі здійснюється перехід

до сумарного різання, яке враховує m -кількість зерен, взаємодіючих із заготовкою по площі контакту:

$$P_y = \sum_{i=1}^m P_{y_i}^o = \sum_{i=1}^m P_{y_i}^s + P_{y_i}^f. \quad (14)$$

Кількість абразивних зерен, задіяних в роботі, буде дорівнювати добутку миттєвої площі контакту ΔF круга із заготовкою і значення поверхневої концентрації зерен абразивного інструменту k_F , тобто $m(\varphi) = \Delta F(\varphi) \cdot k_F$. Площа $\Delta F(\varphi)$ буде визначатися як функція від фази обкату. Її значення для конкретних φ були обчислені моделюванням в CAD-системі SOLIDWORKS, оскільки її аналітичне визначення ускладнене. Після підстановки складових P_y^s і P_y^f , формула для визначення P_y приймає вигляд:

$$\begin{cases} P_y(\varphi) = \sum_{i=1}^{m(\varphi)} P_{y_i}^o \cong \left(\frac{\sqrt{3,25} \cdot \tau_s \cdot 60 \cdot V_2(\varphi) \cdot \sin \beta}{n_{ш.к.} \cdot 2\pi \cdot (\xi(\varphi) \pm b) \cdot \sqrt[3]{k_V} \cdot \sin \beta_1} + 0,5 \cdot l_3 \cdot \tau_s \right) \cdot m(\varphi), \\ m(\varphi) = \Delta F(\varphi) \cdot k_F \end{cases}, \quad (15)$$

β_1 – кут, сформований площиною зсуву і напрямком подачі (для переднього кута ріжучих зерен $\gamma = -45^\circ$, $\beta_1 = \gamma/2 = \pi/8$);

β – кут між лінією зрізу і рівнодіючою сил P_y^s і P_y^f від одиничного зерна, $\beta = \arctg(1,5) - \beta_1 = 0,6 \text{ рад.} = 34^\circ 18'$;

τ_s – напруження зсуву, $\tau_s = (\sigma_i)_{ep} / \sqrt{3}$, де $(\sigma_i)_{ep}$ – граничне напруження руйнування, яке можна визначити за допомогою відомої експериментальної залежності інтенсивності напружень σ_i від швидкості деформації ε_i ;

l_3 – ширина ділянки тертя зерна (для середнього стану затуплення зерна через 5-10 хв. роботи – 30% від величини зернистості);

k_V і k_F – відношення кількості абразивних зерен до одиниці об'єму V інструменту і площі поверхні F відповідно ($k_F = \sqrt{k_V}$);

b – відстань між осями шліфувального круга і нерухомої центріди сателіту;

$m(\varphi)$ – кількість абразивних зерен, розподілених по площі контакту $\Delta F(\varphi)$ інструменту із заготовкою, в фазі обкату φ .

Знак «+» в знаменнику формули (18) відповідає УДЕЕ, знак «-» – ОДЕЕ. Після обчислення складових $P_y(\varphi)$, з'являється можливість дослідити їх вплив на точність обробки. Для вирішення цієї задачі, було застосовано програмний комплекс COSMOSWORKS (SOLIDWORKS Simulation), що реалізує метод скінченних елементів. До тривимірної моделі інструмента і оправки з виносним шпинделем прикладаються знайдені складові у відповідних фазах. Результатом дослідження в додатку Simulation є епюри пружних відтисків інструменту (рис. 8, а, б), які відобразяться у вигляді похибки профілю колеса. На основі даних розрахунків пружних деформацій консольної оправки з інструментом під дією складових $P_y(\varphi)$, отримано теоретичний прогноз відхилення профілю цівкового колеса від номінального (рис. 8, в, г). Встановлено, що нерівномірна

кривизна профілю інструменту обумовлює відхилення форми, характер якого має повторюваність в межах окремих цівок, незалежно від режимів обробки.

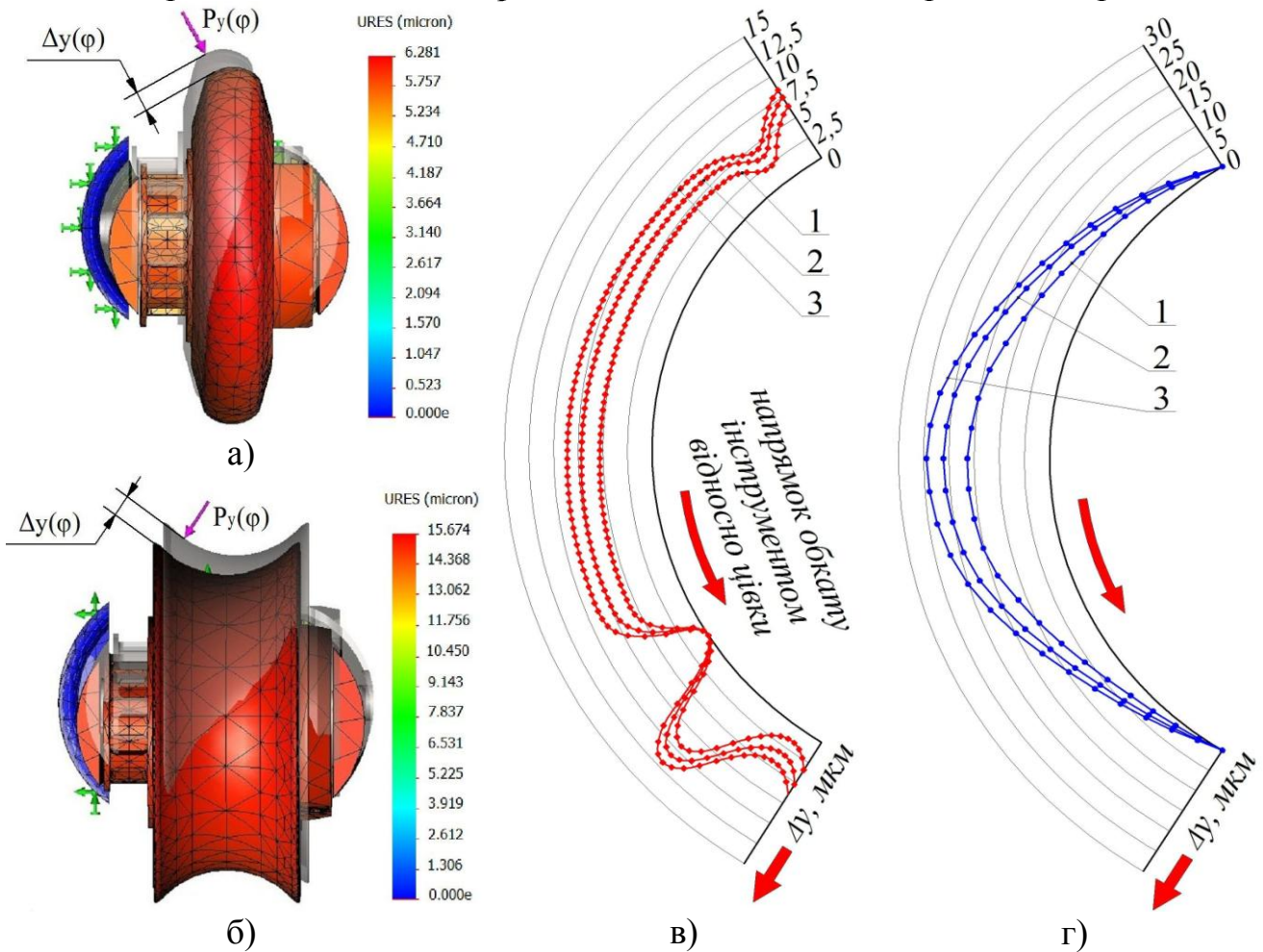


Рис. 9. Одинична еюра пружних деформацій шліфувальної оправки з інструментом, та теоретичне відхилення від заданого профілю, що відповідає обробці кругом з профілем на основі ОДЕЕ (а, в) і УДЕЕ (б, г)
1 – графік що відповідає глибини різання $t=0,1$ мм; 2 – $t=0,125$ мм; 3 – $t=0,15$ мм

Стрімкі коливання графіку відсутні, але значення прогнозованих відхилень більші ніж для ОДЕЕ в 2,5-3 рази (максимально при шліфуванні центральної ділянки дуги цівки). Зі збільшенням глибини різання від 0,10 мм до 0,15 мм, значення відхилення має тенденцію нелінійного збільшення, що є результатом нелінійної жорсткості консольної оправки.

Підвищено точність побудови УДЕЕ за рахунок рівномірного розподілу вузлових точок, що досягається за рахунок введення функції корекції $\lambda(\varphi)$:

$$\lambda(\varphi) = \frac{\pi \cdot \Delta l_{сер.}}{180 \cdot \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} \sqrt{\left(\frac{d\xi}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{d\varphi}\right)^2} d\varphi}, \quad (16)$$

де $\xi(\varphi)$ і $\eta(\varphi)$ – координати еквідистанти до епіциклоїди (не кореговані);

$\Delta l_{сер.}$ – середнє значення відстані між точками побудови, рівне відношенню повної довжини еквідистанти до кількості точок побудови.

Таким чином, кореговані рівняння еквідистанти до епіциклоїди $\xi_k(\varphi) = \xi(\varphi + \lambda(\varphi))$ і $\eta_k(\varphi) = \eta(\varphi + \lambda(\varphi))$ дають змогу досягати однакової точності

побудови ОДЕЕ і УДЕЕ за рахунок однакової кількості точок на одиницю довжини дуги профілю, незалежно від відстані віддалення еквідистанти.

В четвертому розділі представлено програму і методику експериментальних досліджень та основні результати. Для практичної реалізації методу шліфування цівкового колеса і подальших експериментальних досліджень було спроектовано та виготовлено спеціальне оснащення, адаптоване до вертикального фрезерного оброблювального центру (ОЦ) моделі BMV-850 MILLSTAR (Тайвань). Оснащення включає в себе пристрій для профільного шліфування внутрішніх поверхонь з виносним шпинделем і пристрій для надання цівковому колесу руху обкату. Перший пристрій кріпиться до пінолі шпинделя ОЦ, другий встановлюється на двокоординатному столі. Обидва пристрої мають власні приводи з можливістю регулювання частот. Загальний вигляд оснащення та окремих його складових, приведені на рис. 10.

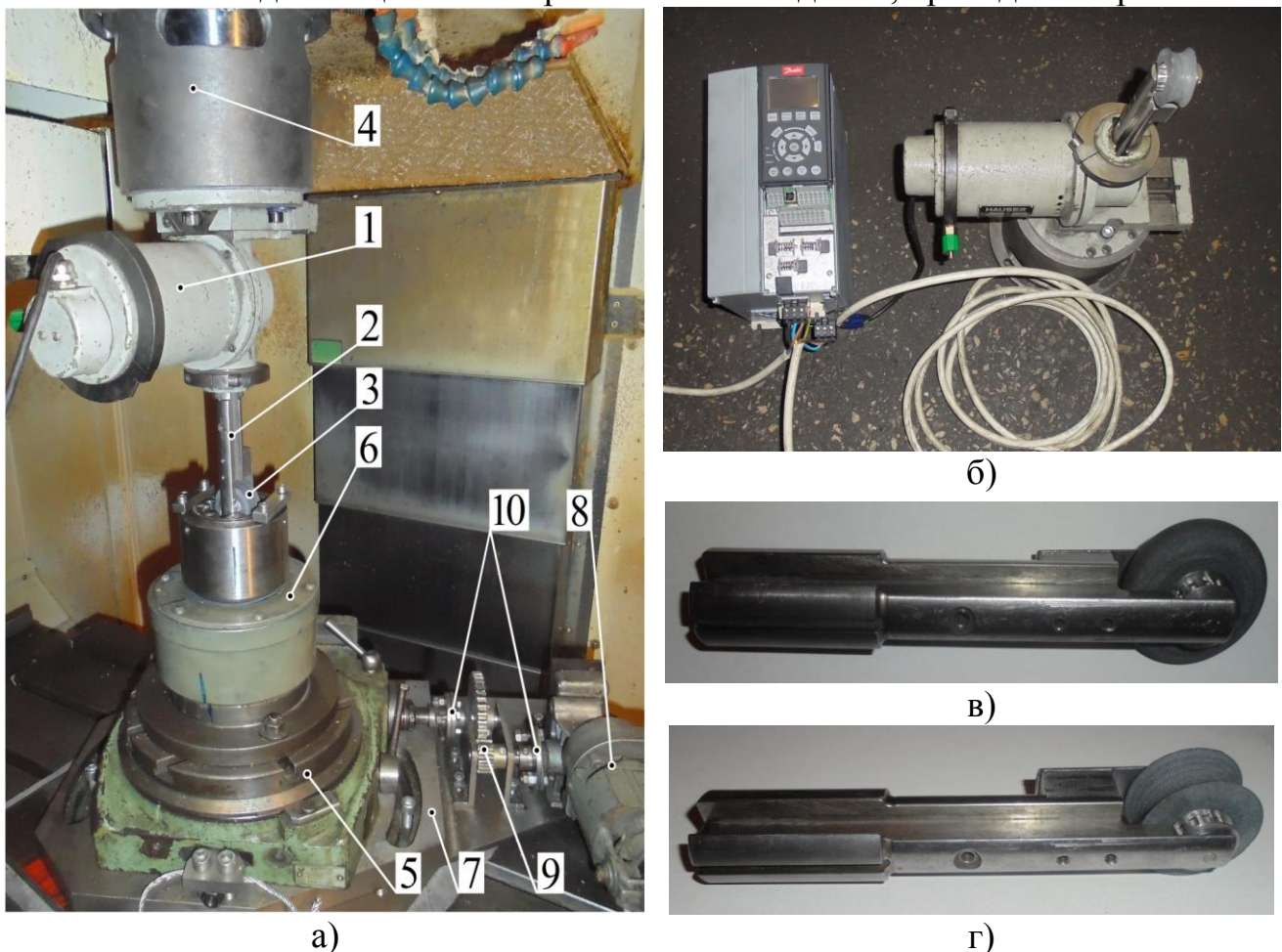


Рис.10. Оснащення для реалізації методу шліфування цівкового колеса в умовах планетарного обкату

а) загальний вигляд встановлених на верстаті пристроїв; б) пристрій для шліфування внутрішніх поверхонь Hauser і частотний перетворювач Danfoss VLT AQUA Drive FC202; в, г) оправки зі встановленими кругами з профілями на основі ОДЕЕ і УДЕЕ; 1 – привід обертання круга Hauser MF 907079; 2 – оправка; 3 – шліфувальний круг; 4 – адаптер; 5 – поворотний стіл РКВ 7205-4003; 6 – планетарний редуктор внутрішнього зачеплення; 7 – плита рухома; 8 – мотор-редуктор УВ-061-М64; 9 – зубчата передача $z=11/Z=35$; 10 – муфти

Експериментальні дослідження проводились згідно програми ротатбельного центрального композиційного плану. Параметри оптимізації – точність форми (відхилення від заданого профілю) і шорсткість. Матриця планування експерименту для обробки різними інструментами залишатиметься однаковою. Фактори, вплив яких досліджувався в ході проведення експерименту – три основні керовані режими обробки – вхідна частота n_{ex} (хв⁻¹), швидкість зворотно-поступального руху (осциляції) інструменту $V_{з.п.}$ (подв.ходів./хв.) і частота обертання круга $n_{ук}$ (хв⁻¹). Вхідна частота n_{ex} в даному випадку визначатиме величину подачі. Функцію відгуку в ході виконання ротатбельного плану отримуємо у вигляді поліному другого порядку:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot X_i^2 + \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot X_i \cdot X_j. \quad (17)$$

Фрагменти обробки цівкового колеса в різних фазах представлені на рис. 11. Експериментальна обробка цівкових коліс проводилась у виробничих умовах діючого підприємства ТОВ «Кіровоградський інструментальний завод «ЛЕЗО» (м. Кропивницький).

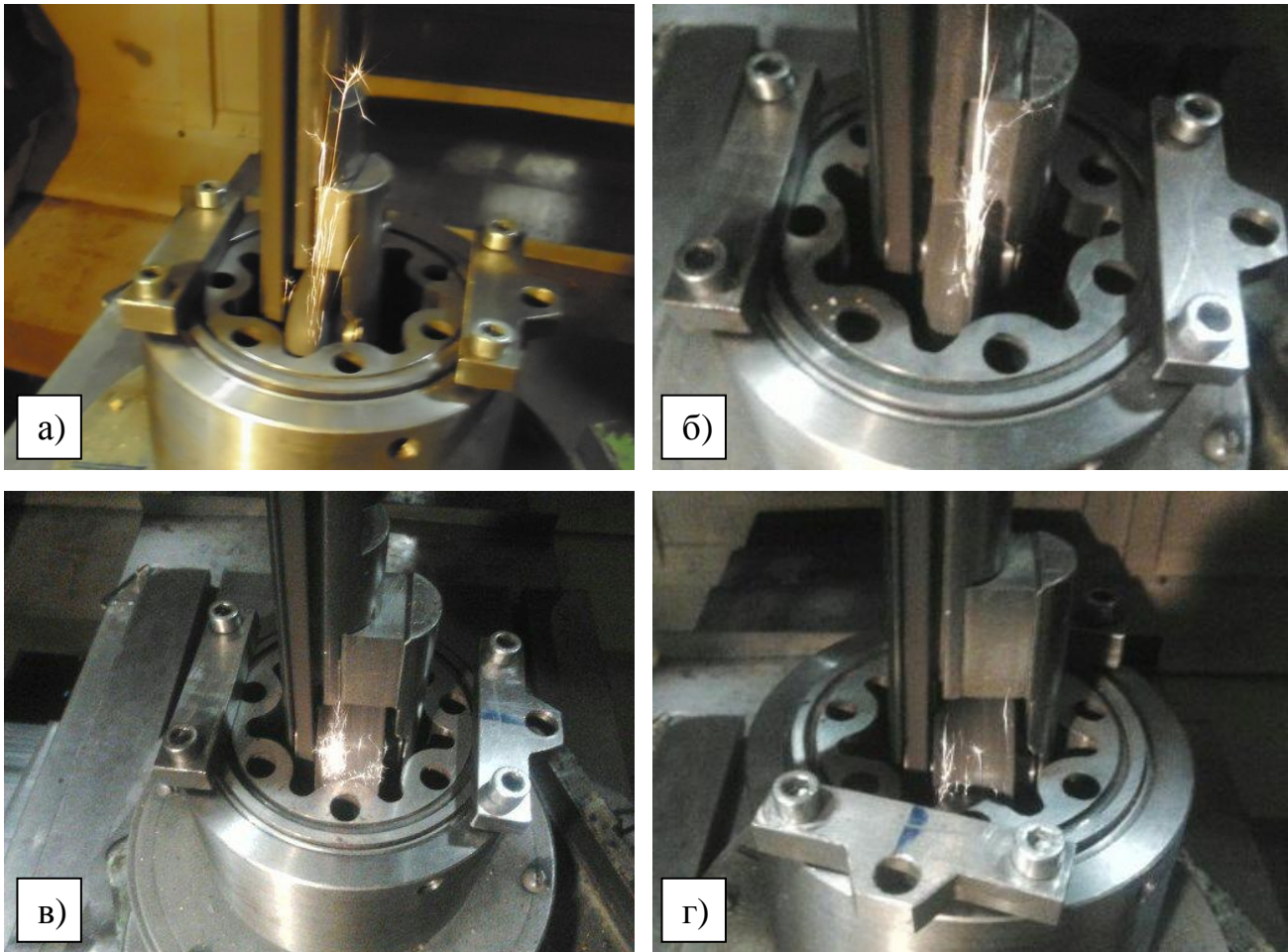


Рис. 11. Фрагменти обробки профілю цівкового колеса в умовах обкату кругами з профілем на основі ОДЕЕ (а, б) і УДЕЕ (в, г)

Вимірювання відхилення від заданого профілю δf обробленої партії цівкових коліс здійснювалось на координатно-вимірювальній машині Contura G2 (CARL ZEISS). Параметр δf враховує радіуси цівок r_{ψ} , полярні радіуси центрів

цівок $R_{ц.ц.}$ (для кожної цівки окремо) і значення кутів α , що визначають взаємне кутове положення цівок. Параметри шорсткості вимірювались на профілограф-профілометрі Mahr GD 25, уздовж діагоналі до поверхні цівки, згідно спеціальної методики, яка дозволяє уникати розрізання деталей. Так, при обробці кругом з профілем на основі ОДЕЕ, поле розсіювання параметру δf знаходиться в межах 6,5-35,9 мкм, для УДЕЕ – 5,7-38,3 мкм (рис. 12, а, б). Поле розсіювання параметру шорсткості для інструмента на основі ОДЕЕ – Ra 1,27...2,11 мкм, для УДЕЕ – Ra 0,54...0,83 мкм (рис. 12, в, г).

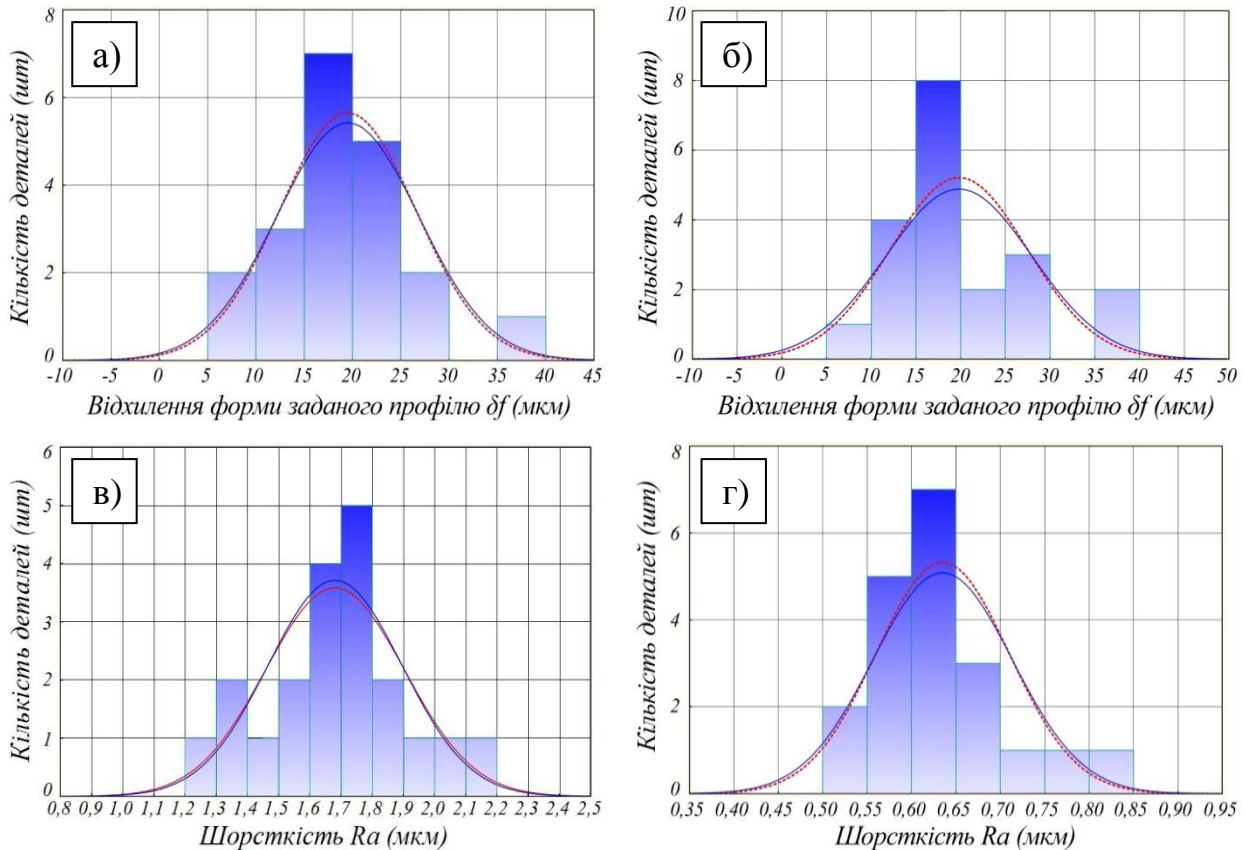


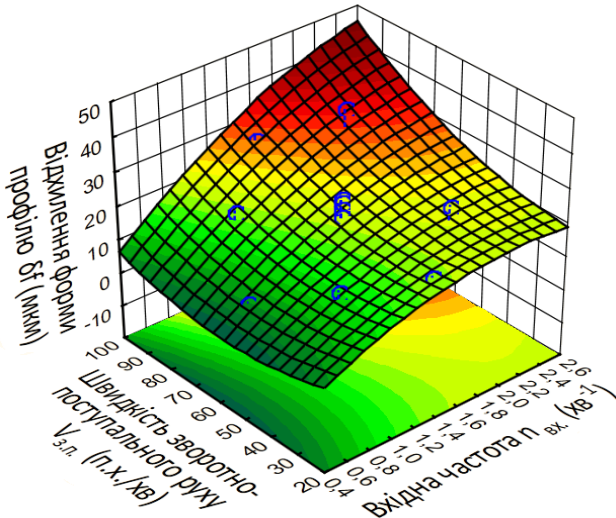
Рис. 12. Гістограми розсіювання параметрів відхилення δf (а, б) та шорсткості Ra (в, г), отриманих при шліфуванні кругами з профілем на основі ОДЕЕ (а, в) і УДЕЕ (б, г)

Вплив геометрії профілю на точність обробки є мінімальний, в той час як опукла форма профілю круга має суттєвий вплив на шорсткість обробки. При співрозмірних полях розсіювання параметру точності та однакових режимах обробки, застосування профілю на основі УДЕЕ забезпечує в 2,3-2,5 рази кращу шорсткість поверхні. Таким чином, результати моделювання (рис. 4) знаходять експериментальне підтвердження. Співрозмірність полів розсіювання параметру δf суперечить результатам моделювання (рис. 9), яке не враховує стійкість, і пояснюється саме низькою стійкістю круга з опуклою формою профілю (експериментально – 4 цівки). Стійкість круга профілем на основі УДЕЕ складає 12 цівок. В результаті обробки даних вимірювання отримано експериментальні залежності параметрів оптимізації (δf і Ra) від керованих режимів обробки ($n_{ex.}$, $V_{з.п.}$, $n_{шк.}$). Для кожної залежності було побудовано поверхні відгуку (рис. 13), які

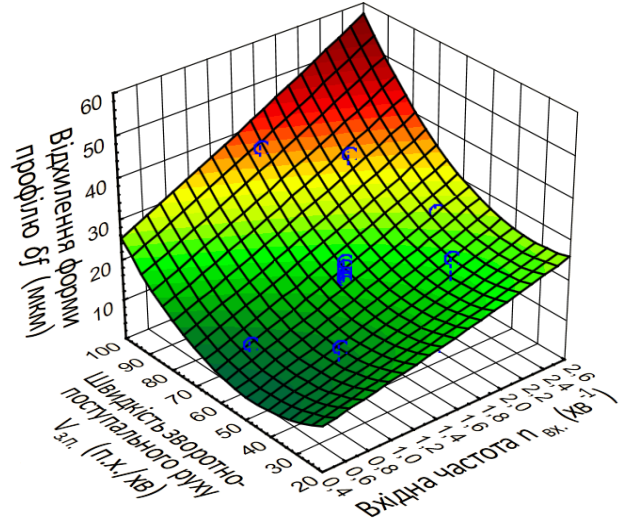
наглядно демонструють вплив режимів на вихідні параметри. Встановлено, що найбільший вплив має частота n_{ex} . (рис. 13 а) і швидкість $V_{3.n.}$ (рис. 13 б, в, г).

$$\delta f = 15,213 + 12,037 \cdot n_{ex} + 0,174 \cdot V_{3.n.} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot n_{шк.}$$

$$\delta f = 33,46 + 9,367 \cdot n_{ex} - 0,517 \cdot V_{3.n.} - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot n_{шк.} + 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot V_{3.n.}^2$$



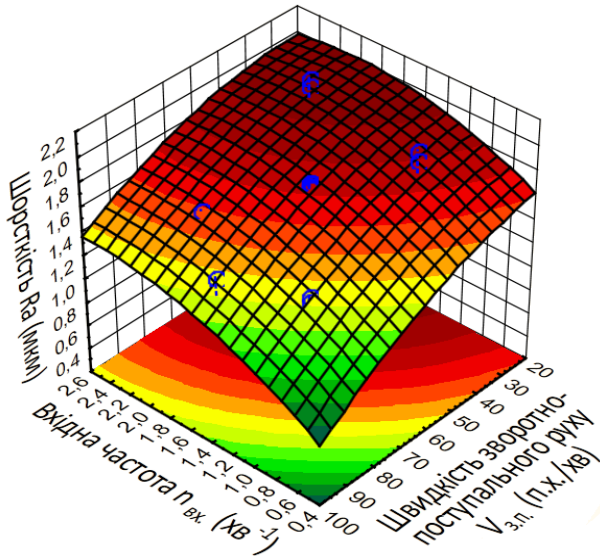
а)



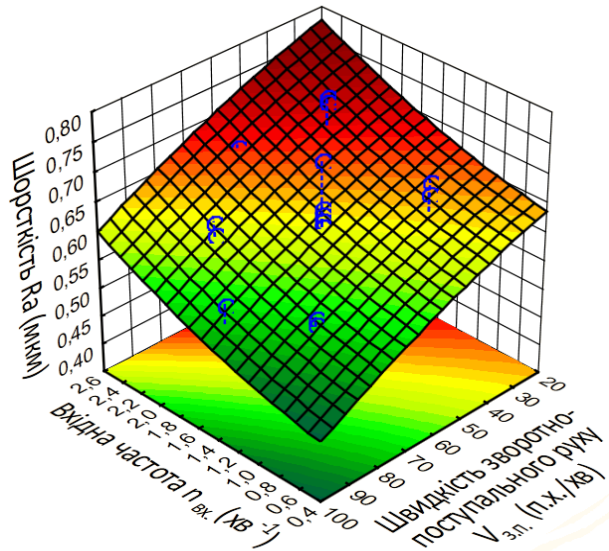
б)

$$Ra = 1,811 + 0,283 \cdot n_{ex} - 9,2 \cdot 10^{-3} \cdot V_{3.n.}$$

$$Ra = 2,312 - 0,078 \cdot n_{ex} - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot V_{3.n.} - 4 \cdot 10^{-4} \cdot n_{шк.} + 2,32 \cdot 10^{-8} \cdot n_{шк.}^2$$



в)



г)

Рис. 13. Вплив швидкості зворотно-поступальних рухів круга $V_{3.n.}$ і вхідної частоти n_{ex} на відхилення форми заданого профілю цівкового колеса δf (а, б) та на шорсткість поверхні Ra (в, г), що забезпечуються обробкою кругами з профілями на основі ОДЕЕ (а, в) і УДЕЕ (б, г).

Додатково проведені вимірювання відхилення профілю в межах окремих цівок на профілограф-профілометрі Mahr GD 25, частково підтвердили результати моделювання (рис. 9) впливу пружних деформацій елементів оснащення на точність обробки. Підтверджено підвищену схильність до зносу профілю на основі ОДЕЕ, особливо в місцях з мінімальною кривизною.

У п'ятому розділі представлено низку технічних рішень та рекомендацій, які сприятимуть ефективному впровадженню технології фінішної обробки профілів коліс ГП умовах одиничного та серійного виробництва. Зокрема, розроблено конструкцію безпривідної шліфувальної оправки з виносним шпинделем для вертикальних ОЦ та компоновку багатофункціонального зубошліфувального ОЦ. Інструменти в зазначеній оправці приводяться в рух від основного шпинделя ОЦ, без необхідності застосування додаткових приводів. Особливістю компоновки зубошліфувального ОЦ є можливість обробки як зовнішніх, так і внутрішніх зубчатих вінців в умовах обкату. Представлено методики розрахунку і синтезу формотворних профілів черв'ячних інструментів для високоефективної чорнової та фінішної обробки профільної поверхні сателіту. Представлено принципово новий інструмент для високоефективної фінішної обробки цівкових коліс, методики його розрахунків та проектування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

За результатами дисертаційної роботи сформульовано наступні висновки:

1. Аналіз відомих методів обробки профілю цівкового колеса дозволив виявити наступні недоліки: недостатня якість поверхні та обмеження по твердості заготовки до 40 HRC при обробці лезовими інструментами, недостатня жорсткість інструменту при обробці на контурно-шліфувальних верстатах, складність конструкції інструменту і оснащення та низька гнучкість методів хонінгування, висока собівартість спеціалізованих верстатів ф. KAPP-NILES. Також залишаються відкритими питання, присвячені вибору раціональних конструктивних параметрів при проектуванні зачеплення ГП, та синтезу кривих, що окреслюють профілі коліс. Відповідно, існує необхідність проведення досліджень, спрямованих на удосконалення існуючих та розробку принципово нових методів фінішної обробки профілів цівкових коліс.

2. Визначено умови існування кривих, що описують профілі коліс ГП в придатному для проектування вигляді. Встановлено, що еквідистанта до епіциклоїди може існувати без «вироджених ділянок», якщо радіус цівки r_{iy} не перевищує мінімальний радіус кривизни ρ_{min} епіциклоїди. Визначено умови існування обвідної сімейства еквідистант до епіциклоїд в цілісному, неперервному вигляді. Встановлено, що приведення функції кутового коефіцієнту епіциклоїди до гладкого неперервного вигляду, дозволяє виконати побудову цілісної і неперервної обвідної без геометричних порушень. Це відкриває широкі можливості синтезу профілів різноманітних зачеплень, та інструментів для їх виготовлення.

3. З метою вдосконалення обраного базового методу фінішної обробки профілю цівкового колеса в умовах обкату, запропоновано та обґрунтовано доцільність застосування УДЕЕ в якості формотворного профілю шліфувального круга. В умовах моделювання, застосування увігнутої ділянки дозволяє досягти шорсткості в 2,5-2,8 рази меншої у порівнянні з опуклою, при однакових значеннях дискретності побудови і меншій в z_1 разів кількості врізань. Така перевага пояснюється тим, що дуга цівки і УДЕЕ мають кривизну

одного знаку, що забезпечує значно більші довжини задіяних в роботі ділянок взаємодіючих профілів.

4. Розроблено конструктивне виконання інструментального профілю на основі УДЕЕ, з допоміжними ділянками у вигляді спряжених в точках перегину дуг постійного радіусу. Встановлено вплив параметру r_{ψ} на коефіцієнт питомого навантаження на профіль, який визначається співвідношенням довжин дуг взаємодіючих профілів. Аналітично визначено значення r'_{ψ} і r''_{ψ} , за яких досягається рівність дуг ОДЕЕ та УДЕЕ, а також ОДЕЕ і активної ділянки дуги цівки. Таким чином, застосування ОДЕЕ в якості профілю інструменту рекомендовано, якщо $r_{\psi} < r'_{\psi}$. Застосування УДЕЕ рекомендовано, якщо $r_{\psi} \geq r'_{\psi}$. Підвищено точність профілювання УДЕЕ за рахунок введення функції корегування, яка забезпечує рівновіддалений розподіл точок побудови.

5. Аналіз кінематичних процесів формоутворення дозволив встановити, що окрім схеми яка передбачає обкат центроїди цівкового колеса навколо центроїди сателіту, формоутворення може бути здійснено за 5ма різними схемами. Для кожної такої схеми отримані кінематичні співвідношення між рухами кінематичних ланок у верстатному зачепленні.

6. В результаті проведеного дослідження кінематики контактної взаємодії інструментальних профілів з цівкою, достовірно встановлено, що мають місце дві одночасні нелінійні швидкості точки контакту – уздовж еквідистанти до епіциклоїди і уздовж дуги цівки. Описана просторова траєкторія руху точки контакту інструменту з цівкою (крива формоутворення). Теоретично доведена можливість лінеаризації швидкості обкату уздовж дуги цівки, що дає змогу досягти постійності подачі на подвійний хід інструменту і відповідно – підвищити точність формоутворення.

7. Проаналізовано силові фактори, що супроводжують процес шліфування цівкового колеса, отримано залежність радіальної складової сили різання P_y (на основі моделі С.М. Корчака) від фази обкату. Моделювання пружних деформацій елементів технологічного оснащення під дією складової P_y , дозволило побудувати теоретичний прогноз похибки профілю в межах однієї цівки. Значення прогнозованих екстремальних відхилень для увігнутої форми профілю круга більші ніж для опуклої в 2,5-3 рази (максимально при шліфуванні центральної ділянки дуги цівки). Встановлено фактори, які впливають на відхилення (конструктивні особливості оснащення, кривизна профілю інструменту, зміна сил різання по величині і напрямку), та надано відповідні рекомендації щодо усунення та мінімізації їх впливу.

8. Практична реалізація методу шліфування цівкового колеса і послідуочі виміри дозволили встановити, що поле розсіювання параметру відхилення заданого профілю δf при обробці кругом з профілем на основі ОДЕЕ знаходиться в межах 6,5-35,9 мкм, а застосовуючи профіль на основі УДЕЕ – 5,7-38,3 мкм. Шорсткість оброблених поверхонь для ОДЕЕ знаходиться в межах Ra 1,27...2,11 мкм, для УДЕЕ – Ra 0,54...0,83 мкм. Таким чином, при співрозмірних полях розсіювання параметру точності та однакових режимах обробки, застосування профілю на основі УДЕЕ забезпечує в 2,3-2,5 рази кращу шорсткість поверхні. Співрозмірність полів розсіювання параметру δf

суперечить результатам моделювання, яке не враховує стійкість, і пояснюється саме низькою стійкістю круга з опуклою формою профілю (експериментально – 4 цівки). Стійкість круга профілем на основі УДЕЕ складає 12 цівок, що дає змогу застосовувати поширений абразивний інструмент на керамічній зв'язці, який відрізняється низькою собівартістю.

9. Представлено низку інноваційних технічних рішень та корисних рекомендацій, які сприятимуть впровадженню гнучкої технології фінішної обробки зубчатих коліс (зокрема коліс ГП), а саме: конструкцію безпривідної шліфувальної оправки з виносним шпинделем; компоновку багатофункціонального зубошліфувального обробного центру; методики розрахунку черв'ячних інструментів для високоефективної технології обробки сателіту; інструмент для високопродуктивної фінішної обробки цівкових коліс із $z > 10$ і методики його розрахунку.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Скібінський, О. І. Дослідження умов існування робочого профілю деталей позацентроїдних епіциклоїдальних цівкових передач внутрішнього зачеплення / О. І. Скібінський, В. І. Гуцул, А. О. Гнатюк // Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. – Кіровоград: КНТУ, 2012. – Вип. 25, ч. 1. – С. 238-241.

2. Скібінський, О. І. Визначення умов існування спряженої огинаючої сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд в циклоїдальній передачі внутрішнього зачеплення / О. І. Скібінський, В. І. Гуцул, А. О. Гнатюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування. – Київ: НТУУ «КПІ», 2014. – № 70. – С. 159-165. (*Index Copernicus, Google Scholar, PИИЦ, Open Academic Journals Index (OAJI), WorldCat, BASE, EBSCO*)

3. Скібінський О. І. До визначення профілю інструменту для обробки ротора героторної передачі в умовах обкату / О. І. Скібінський, В. І. Гуцул, А. О. Гнатюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – № 1. – С. 114-120. (*Index Copernicus, Google Scholar, PИИЦ, Open Academic Journals Index (OAJI), WorldCat, BASE, EBSCO*).

4. Скібінський О. І. Дослідження кінематики контактної взаємодії циклоїдальних профілів в зачепленні героторної пари / О. І. Скібінський, А. О. Гнатюк // Журнал «Науковий вісник НГУ». Серія: Геотехнічна і гірнична механіка, машинобудування. – Дніпро: НГУ, 2017. – № 6. – С. 69-76. (*SciVerse Scopus, Index Copernicus, Ulrich's Web, Research Bib, EBSCO*)

5. Гнатюк А. О. Експериментальні дослідження показників точності при шліфуванні профілю цівкового колеса героторної пари в умовах планетарного обкату / А. О. Гнатюк // Вісник НТУ «ХПІ»: Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 18-25. (*WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory*)

6. Гнатюк А. О. Теоретичні та експериментальні дослідження показників шорсткості профілю цівкового колеса героторної пари, що забезпечуються

шліфуванням в умовах обкату / А. О. Гнатюк, О. І. Скібінський, А. М. Кириченко // *Mechanics and Advanced technology*. – Київ, 2018. – №. 1 – С. 10-17. (*Index Copernicus, Google Scholar, PIHЦ, Open Academic Journals Index (OAJI), WorldCat, BASE, EBSCO*).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

7. Скібінський О. І. Синтез профілів шліфувальних кругів для фінішної обробки внутрішнього профілю цівкового колеса героторної пари / О. І. Скібінський, А. О. Гнатюк. // *Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем»*. – Том 1. – 2017. – С. 65-66.

8. Скібінський О. І. Модель радіальної складової сили різання при шліфуванні / О. І. Скібінський, А. О. Гнатюк. // *Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні"*. – 2017. – С. 77-78.

9. Скібінський О. І. Гранична відстань віддалення еквідистанти від епіциклоїди в зачепленні героторної пари / О. І. Скібінський, А. О. Гнатюк. // *Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Машинобудування очима молодих: Прогресивні ідеї – Наука – Виробництво»*. – 2017. – С. 37-38.

10. Скібінський О. І. Прогнозування теоретичної похибки при шліфуванні цівкового колеса героторної пари в умовах обкату/ О. І. Скібінський, А. О. Гнатюк. // *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології у машинобудуванні»*. – 2019. – С. 118-119.

Опубліковані праці, які додатково відображають результати дисертації:

11. Визначення величини робочого об'єму героторних гідромашин з епіциклоїдальною цівковою передачею внутрішнього зачеплення / О. І. Скібінський, В. І. Гуцул, А. О. Гнатюк, А. В. Заярна // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* – Кіровоград: КНТУ, 2012. – Вип. 42, ч. 1. – С. 229-236.

12. Скібінський, О. І. Визначення периметрів і площ перерізів робочих профілів коліс епіциклоїдальних передач внутрішнього зачеплення / О. І. Скібінський, В. І. Гуцул, А. О. Гнатюк // *Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. – Кіровоград: КНТУ, 2013. – Вип. 26. – С. 129-134.

13. Скібінський, О. І. Дослідження впливу конструктивних параметрів героторної передачі на зносостійкість робочих профілів коліс / О. І. Скібінський, А. О. Гнатюк, В. М. Зеленько // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* – Кіровоград: КНТУ, 2013. – Вип. 43, ч. 1. – С. 340-345.

14. Пат. 110823 Україна, МПК В24В 5/36, В21К 1/30, В23Р 15/14, В24В 19/08. Спосіб шліфування внутрішнього профілю зовнішнього колеса героторної передачі в умовах планетарного обкату. / Скібінський О. І., Гнатюк А. О., Підгаєцький М. М.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № а2013130050; заявл. 11.11.2013; опубл. 12.05.2015. Бюл. № 9.

15. Пат. 113461 Україна, МПК В23F 5/12, В23F 5/20, В23F 15/08, В23Q 27/00, В24В 1/00. Верстат для виготовлення коліс героторних передач. / Скібінський О. І., Гнатюк А. О.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № а201506198; заявл. 25.02.2016; опубл. 25.01.2017. Бюл. № 2.

АНОТАЦІЯ

Гнатюк А. О. Удосконалення процесу фінішної обробки профілю цівкового колеса героторної пари. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Центральноукраїнський національний технічний університет, Міністерство освіти і науки України, Кропивницький, 2019.

Робота присвячена покращенню якісних показників профільної поверхні цівкового колеса героторної пари за рахунок застосування увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди в якості формотворного профілю шліфувального круга, при здійсненні обробки в умовах планетарного обкату.

На основі аналізу відомих методів обробки профілю цівкового колеса була обрана прогресивна схема обробки, яка передбачає створення верстатного зачеплення, в якому цівкове колесо здійснює рух планетарного обкату навколо дискового абразивного інструменту. В якості профілю інструменту застосовується опукла ділянка еквідистанти до епіциклоїди. З метою вдосконалення базового методу обробки, на рівні з опуклою пропонується застосувати для профілювання інструменту увігнуту ділянку еквідистанти до епіциклоїди. Теоретично доведено, що застосування профілю на основі увігнутої ділянки забезпечує в 2,5-2,8 рази кращу шорсткість, у порівнянні з інструментом на основі опуклої ділянки при однаковій дискретності побудови.

Визначено умови існування кривих зачеплення, розроблено методу синтезу профілю шліфувального круга на основі увігнутої ділянки еквідистанти. Проведене дослідження кінематики контактної взаємодії інструменту і профільної поверхні колеса свідчить про наявність змінного швидкісного режиму точки контакту профілів в плоскому верстатному зачепленні. Запропоновано стабілізувати процес шляхом лінеаризації зазначеної швидкості обкату, що дасть змогу досягти постійності подачі на подвійний хід інструменту. Практична реалізація методу шліфування цівкового колеса і послідувачі виміри дозволили встановити, що при співрозмірних полях розсіювання параметру точності та однакових режимах обробки, застосування профілю на основі увігнутої ділянки забезпечує в 2,3-2,5 рази кращу шорсткість поверхні, у порівнянні з опуклою. Співрозмірність полів розсіювання параметрів точності пояснюється низькою стійкістю круга з опуклою формою профілю (в 3 рази нижча у порівнянні з увігнутим профілем). Підвищена стійкість круга з увігнутою формою профілю дає змогу застосовувати поширений абразивний інструмент на керамічній зв'язці, який відрізняється низькою собівартістю.

Ключові слова: героторна пара, цівкове колесо, шліфування в умовах обкату, еквідистанта до епіциклоїди, профіль інструменту, формоутворення.

АННОТАЦИЯ

Гнатюк А. А. Усовершенствование процесса финишной обработки профиля цевочного колеса героторной пары. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – Процессы механической обработки, станки и инструменты. – Центральноукраинский национальный технический университет, Министерство образования и науки Украины, Кропивницкий, 2019.

Работа посвящена улучшению качественных показателей профильной поверхности цевочного колеса героторной пары, за счет применения вогнутого участка эквидистанты к эпициклоиде в качестве формообразующего профиля шлифовального круга, при осуществлении обработки методом обкатки.

На основе анализа известных методов обработки профиля цевочного колеса, была выбрана прогрессивная схема обработки, которая предусматривает создание станочного зацепления, в котором цевочное колесо совершает движение планетарной обкатки вокруг дискового шлифовального круга. В качестве профиля инструмента применяется выпуклый участок эквидистанты к эпициклоиде. С целью усовершенствования базового метода обработки, наряду с выпуклым, предлагается применить для профилирования инструмента вогнутый участок эквидистанты к эпициклоиде. Теоретически доказано, что применение профиля на основе вогнутого участка обеспечивает в 2,5-2,8 раза лучшую шероховатость, по сравнению с профилем на основе выпуклого участка, при одинаковой дискретности построения.

Определены условия существования кривых в зацеплении, разработана методика профилирования шлифовального круга на основе вогнутого участка эквидистанты. Результаты исследования кинематики контактного взаимодействия инструмента и профильной поверхности колеса, свидетельствуют о наличии переменного скоростного режима точки контакта профилей. Предложено стабилизировать процесс путем линеаризации указанной скорости обкатки. Практическая реализация метода шлифования цевочного колеса и последующие измерения позволили установить, что применения профиля на основе вогнутого участка обеспечивает в 2,3-2,5 раза лучшую шероховатость поверхности, по сравнению с выпуклым. Соразмерность полей рассеяния параметров точности объясняется низкой стойкостью круга с выпуклым профилем (в 3 раза ниже по сравнению с вогнутым). Повышенная стойкость круга с вогнутым профилем позволяет применять инструмент на керамической связке, который отличается низкой себестоимостью.

Ключевые слова: героторная пара, цевочное колесо, шлифование в условиях обкатки, эквидистанта к эпициклоиде, профиль инструмента, формообразование.

ABSTRACT

Hnatiuk A.O. Improvement of the finishing process of the lantern wheel profile of gerotor pair. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in specialty 05.03.01 Machining processes, machines and

tools. – Central Ukrainian National Technical University, Ministry of education and science of Ukraine, Kropyvnytskyi, 2019.

The work is concerned with the improvement of the quality parameters of the profile surface of the lantern wheel of the gerotor pair due to the application of the concave area of the equidistant to the epicycloid as a forming profile of the circular abrasive tool, that working in the conditions of generating process.

On the basis of the analysis of the known processing methods, a progressive scheme of processing was selected that involves the creation of a machine gearing in which the lantern wheel makes a planetary motion around a disk grinding wheel. As a tool profile, the convex part of the equidistant to the epicycloid is used (Convex PEE). Expediency of using the concave area as a forming profile of the grinding wheel has been justified. It has been theoretically proven that the use of the Concave PEE allows the roughness to be minimized and, accordingly to improve the basic grinding method. The simulation results show, that the use of Concave PEE allows for a mikro-roughness of 2.5-2.8 times less than Convex PEE, with the same design discrete step.

The conditions for the existence of curves in the gearing are determined, namely, the existence of the violations of equidistant curve, which manifest themselves in the form of «degenerated areas» and conditions for the existence of the peripheral of the equidistant group to the epicycloids in a single continuous form has also been performed. The methodology of synthesis of a grinding wheel profile on the basis of a concave part of the equidistant to the epicycloid was developed. Research results of the kinematics of the contact interaction between the tool and the profile surface of the wheel shows the variable velocity mode of the contact point of the profiles in the flat machine gearing. It has also been suggested to stabilize the process by linearizing the velocity of generating process which will allow achieving continuity of feed on the oscillation motion of the tool. In the process of practical realization of the grinding method of the lantern wheel, it was established that with commensurate fields of dispersion of the precision parameter, the use of Concave PEE provides 2.3-2.5 times better micro-roughness with the same processing conditions. Comparable precision dispersions is explained by the low stability of the profile on the basis of Convex PEE, which experimentally amounted 3 times less than for the Concave PEE. High stability of the profile on the basis of Concave PEE is allows be use a cheap abrasive tool on a ceramic bond. A number of innovative technical solutions for introduction of the machining technology of gerotor gears in the single and serial manufacturing are presented

Keywords: gerotor pair, lantern wheel, grinding in gear generation conditions, equidistant of epicycloid, tool profile, form creation.

Підписано до друку 26.04.2019 р. Формат 60×90¹/16.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9
Наклад 100 прим. Замовлення №484
Надруковано на різнографі в видавничому центрі «Принт-центр»
04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16
<http://www.printc.kiev.ua>; E-mail: printcentr@ukr.net