

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ГНАТЮК АНДРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.923.1+621.833.6

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня **кандидата технічних наук**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ / А.О. Гнатюк /

Науковий керівник – Скібінський Олександр Іванович
кандидат технічних наук, доцент

Кропивницький – 2019 р.

АНОТАЦІЯ

Гнатюк А.О. Удосконалення процесу фінішної обробки профілю цівкового колеса героторної пари. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». – Центральноукраїнський національний технічний університет, м. 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.

В першому розділі розглянуто особливості геометрії коліс зачеплення героторної пари (ГП) та існуючі методи їх обробки. До профільних зубчатих поверхонь цих коліс висуваються високі вимоги по точності та шорсткості, що обумовлено конструктивними особливостями зачеплення, та його функціональним призначенням. При цьому сателіт, який має зовнішній зубчатий вінець, є технологічним у виготовленні. Цівкове колесо має внутрішні зубці, його конфігурація накладає обмеження на різноманіття технологічних рухів та конструктивне виконання і розміри інструментів, що впливає на їх жорсткість, а відповідно і на точність обробки. Аналіз інженерної, наукової та патентної літератури показує, що існуючі методи обробки профілю цівкового колеса мають низку суттєвих недоліків – низька гнучкість, складність інструменту та оснащення, висока вартість обладнання. Лезова обробка не здатна забезпечити високу якість профільних поверхонь, які мають твердість порядку 60 HRC. Також залишаються відкритими питання стосовно раціонального проектування зачеплення, та синтезу кривих які окреслюють профілі коліс. На основі проведеного аналізу, в якості базового прототипу був обраний прогресивний метод обробки дисковим шліфувальним кругом в

умовах планетарного обкату. Для профілювання круга застосовується опукла ділянка еквідистанти до епіциклоїди (ОДЕЕ). Відомості про впровадження у виробництво відсутні, як і інформація щодо забезпечуваних цим методом показників якості. Виникає необхідність ґрунтовно дослідити його фізичну суть, проаналізувати на предмет вдосконалення, провести експериментальні дослідження, та надати відповідні рекомендації.

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 профілю інструменту. Так, для забезпечення відсутності «вироджених ділянок» на еквідистанті, відстань її віддалення має бути меншою за мінімальний радіус кривизни епіциклоїди ρ_{min} . Отримано формулу, яка дозволяє точно визначати значення ρ_{min} . Також виконано аналітичний опис обвідної сімейства еквідистант до епіциклоїд в єдиному неперервному вигляді. Це досягається приведенням функції кутового коефіцієнту епіциклоїди до гладкого неперервного вигляду, що в свою чергу дозволило отримати раціональний аналітичний розв'язок рівняння зв'язку параметрів побудови і сімейства кривих.

Запропоновано та обґрунтовано доцільність застосування увігнутої ділянки в якості формотворного профілю шліфувального круга. Теоретично доведено, що застосування УДЕЕ дозволяє покращити параметр шорсткості обробки і відповідно, дозволяє вдосконалити базовий метод шліфування. В умовах моделювання, застосування УДЕЕ дозволяє досягти шорсткості в 2,5-2,8 рази меншої у порівнянні з ОДЕЕ, при однакових значеннях дискретності побудови. Розроблено методику синтезу профілю шліфувального круга на основі УДЕЕ, досліджено його робочі характеристики за критеріями коефіцієнтів використання профілю та питомого навантаження. Встановлено межі значень радіуса цівки, для яких застосування даної форми профілю є найбільш доцільним та ефективним.

В третьому розділі представлені результати досліджень кінематики формоутворення, та моделювання точності відтворення профілю цівки. Проведене дослідження кінематики контактної взаємодії інструменту і профільної поверхні колеса, свідчить про змінний швидкісний режим точки контакту профілів в плоскому верстатному зачепленні. Довжина дуги цівки, прошліфована за один подвійний хід інструменту матиме різні значення, залежно від фази обкату. Запропоновано формалізм опису процесу формоутворення поверхні цівки у вигляді кривої формоутворення, яка кінематично породжується на циліндричній поверхні в процесі обкату. Також теоретично доведена можливість стабілізувати процес шляхом лінеаризації швидкості обкату, що дасть змогу досягти постійності подачі на подвійний хід інструменту. Отримані функції лінеаризації. Підвищено точність профілювання увігнутої ділянки, шляхом введення функції корекції в рівняння кривої, що дозволило побудувати еквідистанту з рівновіддаленим розподілом точок.

Отримано модель радіальної складової сили різання P_y на основі відомої моделі С. М. Корчака для процесу шліфування, яка враховує залежність кількості задіяних в роботі абразивних зерен від фази взаємного положення інструменту і колеса. Виконано моделювання пружних відтисків інструменту від поверхні цівки під дією P_y . На основі отриманих значень деформацій, відтворено відхилення профілю цівкового колеса від номінального. Встановлено, що пікові значення відхилення для увігнутої форми перевищують в 2,5-3 рази цей показник для ОДЕЕ, що пояснюється значно більшими значеннями площ контакту опуклої і увігнутої поверхні. Нерівномірною кривизною профілю інструменту обумовлює відхилення заданої форми, характер якого має повторюваність незалежно від режимів обробки.

В четвертому розділі представлено опис обладнання, програму і методику експериментальних досліджень, та результати експериментальних досліджень. Методика експериментального дослідження передбачає реалізацію базового методу шліфування, а також його вдосконаленого варіанту у виробничих умовах, з послідуочим вимірюванням якісних показників в метрологічній

лабораторії. Для його реалізації розроблено та виготовлено спеціальне оснащення та інструмент. Експериментальні дослідження здійснювались згідно програми ротатбельного центрально-композиційного плану.

При практичній (натурній) реалізації методу шліфування цівкового колеса було встановлено, що поле розсіювання параметру відхилення заданого профілю 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. В той же час, шорсткість оброблених поверхонь для ОДЕЕ знаходиться в межах 1,27-2,11 мкм, для УДЕЕ – 0,54-0,83 мкм. При співрозмірних полях розсіювання показників точності, застосування УДЕЕ забезпечує в 2,3-2,5 рази кращу шорсткість при однакових режимах обробки. Співрозмірна точність пояснюється низькою стійкістю профілю на основі ОДЕЕ, яка експериментально склала 4 безперервно оброблених цівки, в той час для УДЕЕ цей показник складає 12 цівок. Підтверджено підвищену схильність до зносу профілю на основі ОДЕЕ, особливо в місцях з мінімальною кривизною.

У п'ятому розділі представлені шляхи реалізації технології фінішної обробки профілів коліс ГП умовах одиничного та серійного виробництва. Зокрема, розроблено конструкцію безпривідної шліфувальної оправки з виносним шпинделем для вертикальних обробних центрів, та компоновку багатофункціонального зубошліфувального обробного центру. Представлено черв'ячні інструменти для високоефективної обробки профілю сателіту, та аналітичний опис їх вихідних формотворних контурів. Представлено новий інструмент для високоефективної фінішної обробки цівкових коліс з великими кількостями зубців.

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 методіку 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 ГП, 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.

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

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, 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.

The first chapter discloses the features of the geometry of the coupling wheels of the gerotor pair (GP) and the existent methods of their processing are considered. The profiled toothed surfaces of these wheels require high accuracy and roughness, due to the design features of the gearing and its functional purpose. In this case, the satellite which has an external toothing rim is technological of manufacturing. The lantern wheel has internal teeth; its configuration limits the diversity of the processing motions, dimensions of the tool, and access of the tool to the machined surfaces which affects the hardness of the tool and accordingly the precision of machining. The analysis of engineering, scientific and patent literature shows that the existing methods of processing the profile of a lantern wheel have a number of significant drawbacks: low flexibility, complexity of tools and equipment, high cost of equipment. The edge cutting machining does not provide the high quality of the surfaces of parts that have hardness about 60 HRC. On the basis of the analysis, a progressive scheme of processing with a disk grinding wheel was selected in the

conditions of generating process. As a tool profile, the convex part of the equidistant to the epicycloid (Convex PEE) is used. There is no information on the introduction into production, as well as information on the quality indicators provided by this grinding method. There is a need to thoroughly examine its physical nature, analyze it for improvement, conduct experimental studies, and provide relevant recommendations.

The second chapter presents solutions to questions of the analysis and synthesis of gearing profiles, and presents the possibility of improving the basic method of grinding by applying a concave part of the equidistant to the epicycloid (Concave PEE). So, to ensure the absence of the «degenerated areas» on the equidistant, the distance of its removal should not exceed the minimum radius of curvature of the epicycloid ρ_{min} . A formula was obtained which accurately determines the value ρ_{min} . An analytical description of the peripheral curve of the equidistant group to the epicycloid in a single continuous form has also been performed. Bringing the function of the angular coefficient of the epicycloid to a smooth continuous form allowed obtaining a rational analytic solution of the equation of coupling of construction parameters and the family of curves.

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 methodology of synthesis of a grinding wheel profile on the basis of Concave PEE was developed. Its working characteristics have been investigated according to the criteria of the coefficients of profile usage and specific load. The limits of the values of the radius of the tooth, for which the application of this profile geometry is the most expedient and effective, was established.

The third chapter presents the research results of the kinematics of forming, and simulation of the tooth profile precision. The performed study 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. The length of the lantern arc, polished in one double-turn of the tool, will have different values depending on the phase of the generating process. The formalism of describing the process of formation of the lantern surface in the form of a formation curve which is kinematically generated on a cylindrical surface during the generating process was suggested. 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 double-turn of the tool.

The model of the radial component of the cutting force for the grinding process was obtained. The model is based on the well-known model of S.N. Korchak. The model takes into account the dependence of the amount of abrasive grains involved in the operation of the phase of the mutual position of the tool and the wheel. The simulation of the elastic bendings of the tool from the surface of the lantern under the action of grinding forces is performed. It is established that the max values of the deviation from a given profile for a concave shape exceed 2.5-3 times this figure for Convex PEE, which is explained by the significantly larger values of contact areas for a convex and concave surface. Also established that the uneven curvature of the instrument profile causes the deviation of a given shape, the nature of which has repetition, regardless of the modes of processing.

The fourth chapter presents a description of the equipment, the program and methodology of experimental research, and the results of experimental research.

Methodology of the experimental research involves us implementation the basic grinding method, and improved version as its, under manufacturing conditions, with the after measurement of quality indicators in the metrological laboratory. For its realization special equipment and tools have been developed and manufactured. Experimental studies were carried out in accordance with the programme of rotatable central composite plan.

In the process of practical realization of the grinding method of the lantern wheel, it was established that the field of dispersion of the deviation parameter of a given profile when machining with a grinding wheel with the profile on the basis of

Convex PEE is within the range of 6.5-35.9 microns, and using the profile based on Concave PEE will be 5.7-38,3 microns. At the same time, the roughness of the treated surfaces for the Convex PEE is within the range of 1.27-2.11 microns, and for the Concave PEE it is 0.54-0.83 microns. 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 to 4 continuously grinded teeth, while for Concave PEE, this figure is 12. The increased tendency to deteriorate the profile on the basis of Convex PEE has been confirmed, especially in places with minimal curvature.

The fifth chapter presents the ways of implementation of the technology of finishing the profiles of GP wheels in the conditions of individual and serial production. In particular, the design of a non-driven grinding mandrel with a remote spindle for vertical machining centres, and the layout of a multifunctional grinding centre. Methods of calculation of the worm tools (hobs and wheels) for high-performance satellite finish processing technology, and new tool for high-performance finishing machining of lantern wheels with $z > 10$ and methods of its calculation. are also been presented.

Scientific novelty of the obtained results:

1. The conditions for the existence of a conjugate peripheral of the equidistant group to the shortened epicycloid in the form of a single continuous curve were defined for the first time. It is established that the introduction of the modified function of the angular coefficient in the solution of the equation of the construction of the equidistant parameter to the epicycloid and the parameter that determines the curve out of the group totality allows constructing a peripheral in a continuous form, without breaking of smoothness. Thus, an analytical method for finding the peripheral groups of algebraic curves, in particular those that outline the profiles of gear wheels or tools, has been improved.

2. The appropriateness of applying the concave area of the equidistant to the epicycloid has been substantiated as a forming profile of the tool for finishing

abrasive processing of the profile of the lantern wheel. It has been established that the application of a tool profile which has equal curvature value with a profile of the lantern under treatment, positively affects surface roughness and tool stability which is confirmed experimentally.

3. The description of the process of finishing the cylindrical surface of the lantern in the form of functions that describe the movement of the contact point of the tool with the lantern in the plane and spatial engagement was formalized for the first time. These functions take into account the variables of the contact interaction conditions which is conditioned by the uneven curvature of the tool profile.

4. An analytical connection was established and the influence of technological processing regimes (rotation frequency of the lantern eccentric axis around the axis of the tool circle, velocity of the tool oscillation and rotation frequency of the grinding wheel) was revealed on the profile deviation δf and roughness Ra of the grinded profile of lantern wheel for the first time. This made it possible to obtain optimal ratios of the process parameters that provide the best values of quality indicators.

The practical value of the obtained results:

1. The conditions for the existence of equidistant to epicycloid in the form suitable for synthesis of a satellite profile or instrument are determined. It is established that if the distance of the equidistant remoteness exceeds the minimum radius of curvature of the epicycloid, this leads to the appearance of «degenerate areas».

2. The engineering methodology of synthesis and calculation of the profile of a grinding wheel on the basis of the concave area of the equidistant to the epicycloid has been developed. The scope of application of this tool is determined, depending on the value of the radius of the lantern of the machined wheel.

3. Theoretically proved the linearization possibility of the gear generation speed of the contact point of the profiles of the tool and the wheel, which makes it possible to achieve constancy of the feed to the double stroke of the tool and, accordingly, increase the precision of the generation. Linearization functions are defined.

4. The accuracy of profiling the concave area of the equidistant to the epicycloid has been increased which makes it possible to improve the accuracy of the reproduction of the profile of the abrasive tool during its manufacturing or modifying.

5. A theoretical prediction of the mistake of the lantern wheel profile (within one tooth) which is the result of the elastic deformations of the equipment elements under the action of cutting forces was obtained. This made it possible to identify the factors affecting the deviation (the design of the grinding mandrel with the external spindle, the uneven curvature of the tool profile, the change in cutting forces in magnitude and direction) and provide appropriate recommendations for eliminating and minimizing the influence of these factors.

6. It is proved that the tool with the profile on the basis of the concave area has increased stability (experimental - 12 teeth), in comparison with the convex profile (4 teeth) which makes it possible to apply a cheap abrasive tool on a ceramic bond.

7. A number of innovative technical solutions are presented. They will facilitate implementation of the flexible technology of finishing the wheels of the GP, namely: the construction of a non-driven grinding mandrel with a remote spindle; layout of a multifunctional grinding centre; methods of calculation of the worm tools (hobs and wheels) for high-performance satellite finish processing technology; a new tool for high-performance finishing machining of lantern wheels with $z > 10$ and methods of its calculation.

8. Specific results of the dissertation work were introduced into production at Kirovohrad Tool Plant «Lezo» Ltd. In particular, a modified version of a grinding mandrel with a remote spindle which was adapted to the vertical three-coordinate machining centre Millstar BMV850. This mandrel extends the technological capabilities of the supplied equipment and allows grinding the internal surfaces of parts with limited access.

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ 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 огиноючої 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.
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.
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.
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.
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. 12-19.

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 наукові 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. 113461Україна, МПКВ23F 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.

ЗМІСТ

ВСТУП	19
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ, ПОСТАНОВКА МЕТИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	26
1.1 Властивості, конструктивне виконання героторної пари, виділення невирішених задач її проектування та вибору конструктивних параметрів.....	26
1.2 Аналіз методів обробки робочого профілю цівкового колеса.....	33
1.3 Недоліки існуючих методів обробки профілю цівкового колеса та вибір базового прототипу.....	47
1.4 Постановка мети та задачі дослідження.....	51
РОЗДІЛ 2 ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ УВІГНУТОЇ ДІЛЯНКИ ЕКВІДИСТАНТИ ДО ЕПІЦИКЛОЇДИ В ЯКОСТІ ФОРМОТВОРНОГО ПРОФІЛЮ ІНСТРУМЕНТУ	53
2.1 Визначення умов існування кривих, що окреслюють робочі профілі коліс героторної пари.....	53
2.2 Застосування увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди в якості формотворного профілю шліфувального круга.....	66
2.3 Вплив зміни форми профілю шліфувального круга на шорсткість шліфованих поверхонь цівкового колеса.....	70
2.4 Синтез профілю шліфувального круга на основі увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди, та дослідження його робочих параметрів.....	75
2.5 Висновки до розділу.....	84
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ПРОФІЛЮ ЦІВКОВОГО КОЛЕСА В УМОВАХ ОБКАТУ	86
3.1 Аналіз кінематичних процесів формоутворення профілю цівкового колеса в умовах обкату.....	86
3.2 Дослідження кінематики контактної взаємодії профілів інструмента і цівкового колеса в плоскому перерізі.....	90
3.3 Дослідження просторової кінематики контактної взаємодії шліфувального круга з оброблюваною цівкою.....	100
3.4 Аналіз силових факторів в зоні контакту шліфувального круга з поверхнею цівки, що породжують пружні деформації технологічних елементів оснащення.....	103
3.5 Моделювання пружних відтисків інструменту, що виникають в процесі шліфування цівкового колеса під дією радіальної складової сили різання.....	107
3.6 Підвищення точності профілювання увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди.....	117
3.7 Висновки до розділу.....	120

РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ПРОФІЛЮ ЦІВКОВОГО КОЛЕСА В УМОВАХ ОБКАТУ.....	121
4.1 Опис обладнання та оснащення для проведення експериментальних досліджень.....	121
4.2 Програма і методика експериментального дослідження показників точності та шорсткості профілю цівкового колеса.....	127
4.3 Дослідження показників точності та шорсткості профілю цівкового колеса, отриманих в ході реалізації методу шліфування в умовах обкату.....	134
4.4 Результати дослідження показників точності в межах окремих цівок, та стійкості інструментів.....	145
4.5 Висновки до розділу.....	149
РОЗДІЛ 5 ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ КОЛІС ГЕРОТОРНОЇ ПАРИ В УМОВАХ ОДИНИЧНОГО ТА СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА.....	150
5.1 Розробка конструкції безпривідної шліфувальної оправки з виносним шпинделем для вертикальних обробних центрів.....	150
5.2 Розробка компоновки зубошліфувального обробного центру для фінішної обробки коліс зовнішнього і внутрішнього зачеплення.....	153
5.3 Синтез профілів черв'ячних інструментів для високоефективної технології обробки сателітів.....	158
5.4 Новий інструмент для високопродуктивної фінішної обробки цівкових коліс.....	162
5.5 Висновки до розділу.....	169
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	170
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	173
ДОДАТКИ.....	189

ВСТУП

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 ротатабельного 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: [99] – 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. [96] – 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; [98] – 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; [19] – проведено моделювання шорсткості обробки, яка забезпечується різними варіантами геометрії формотворного профілю інструменту, визначено нерівномірний розподіл мікронерівностей уздовж шліфованої дуги цівки; [97] – 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.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ, ПОСТАНОВКА МЕТИ ТА ВИБІР НАПРЯМКІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Властивості, конструктивне виконання героторної пари, виділення невіршених задач її проектування та вибору конструктивних параметрів.

Термін «геротор» походить від англійського «gerotor» – скорочення від словосполучення «generated rotor», тобто «утворений ротор» [121, 128, 129]. Цей термін вперше був запропонований американським вченим, інженером Майроном Хіллом (Myron Francis Hill). Героторна пара (ГП) складається з двох коліс, які утворюють внутрішнє зачеплення. В основу зачеплення покладено спеціальний профіль на основі циклоїдальних кривих.

В сучасній техніці ГП знайшла найбільше застосування в гідравліці, як компонент героторних насосів (живильних, дозувальних), героторних гідромоторів, двигунів для буріння, роботах, тощо. Також її можна зустріти в механічних приводах машин і механізмів, де необхідно досягти високих передатних відношень. Її розповсюдженню в даних сферах сприяє ряд особливих властивостей, а саме:

- висока кінематична точність і плавність ходу ;
- велике значення робочого об'єму героторної гідромашини при обмежених габаритах, що досягається за рахунок більшої кількості тактів витіснення за 1 оберт [18];
- низький пусковий момент героторних гідромоторів;
- різниця в кількості зубців – одиниця, а звідси і можливість здійснення великих передатних відношень;
- стабільність частоти обертання і крутного моменту;
- стабільність роботи при перенавантаженнях;
- низький рівень шуму під час роботи.

В науковій літературі [10, 27, 109, 113], ГП носить назву позацентроїдної епіциклоїдальної цівкової передачі внутрішнього зачеплення (ПЕЦПВЗ). В цій же літературі викладена теорія проектування зачеплення. На рис. 1.1 приведена ГП з позначенням основних конструктивних параметрів. Зачеплення утворюють два колеса – внутрішнє із зовнішнім зубчатим вінцем (сателіт) 1 з числом зубців z_1 , та зовнішнє із внутрішнім вінцем (цівкове колесо) 2 з числом зубців z_2 . Умовно ці колеса також іменують ротором і статором. Сателіт може мати мінімальну кількість зубців 2, у цівкового колеса кількість цівок завжди на одиницю більша.

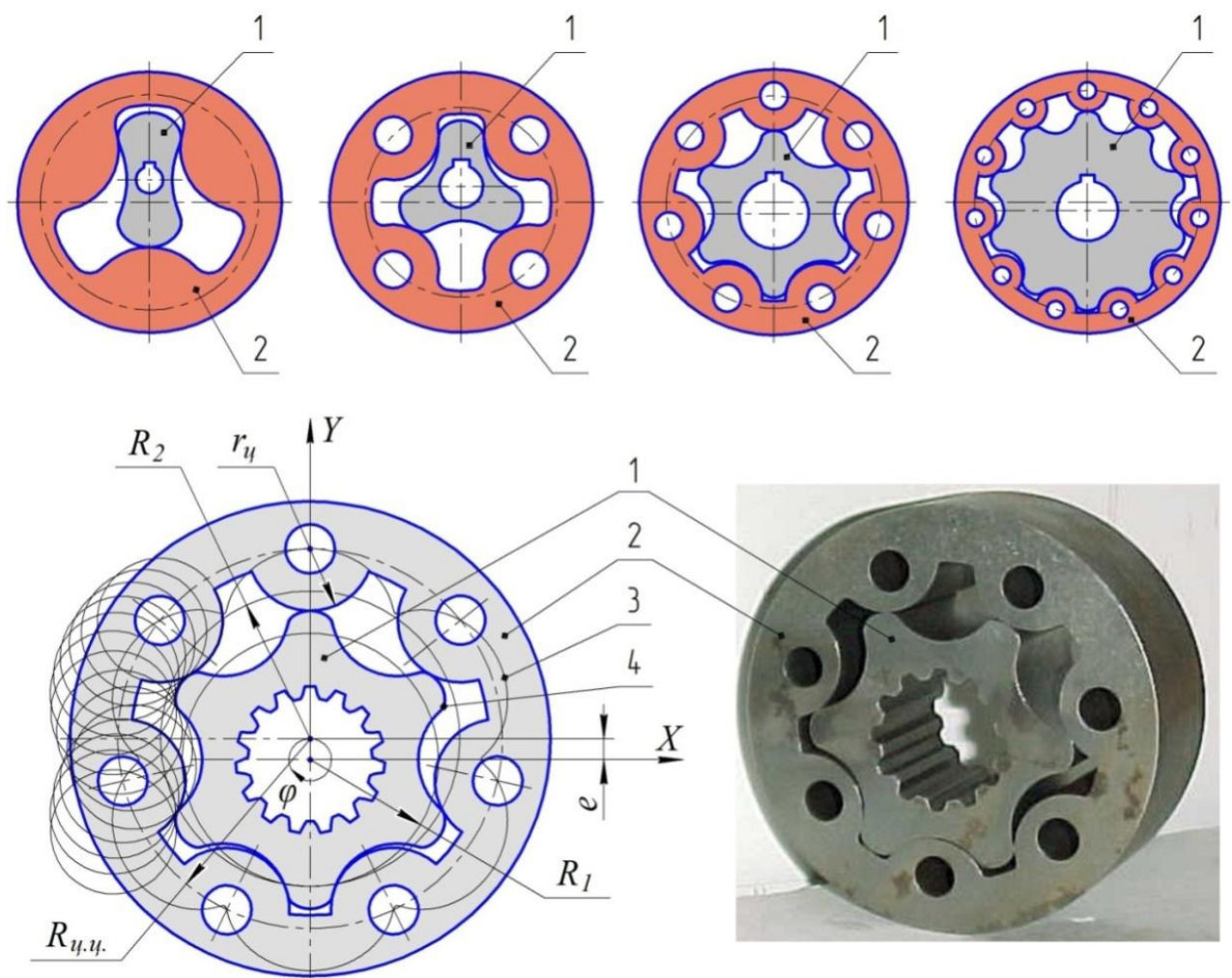


Рис. 1.1 Героторна пара з позначенням основних параметрів

1 – внутрішнє колесо (сателіт); 2 – зовнішнє цівкове колесо; 3 – вкорочена епіциклоїда; 4 – еквідистанта до вкороченої епіциклоїди; $R_{ц.ц.}$ – радіус центрів цівок; r_u – радіус цівки; R_1 – радіус центроїди сателіта; R_2 – радіус центроїди цівкового колеса; e – ексцентриситет передачі; φ – кут повороту рухомої центроїди цівкового колеса навколо нерухомої центроїди сателіта для побудови епіциклоїди

Конструкція передачі забезпечує наявність порожнистих камер, кожна з яких відокремлена від сусідніх двома точками контакту спряжених профілів коліс. В процесі роботи об'єми цих камер циклічно змінюються від мінімального до максимального і навпаки. Ця властивість і дозволила розповсюдити даний тип передач в гідравлічних машинах. Величина об'єму камер залежить від конструктивних параметрів зачеплення.

Для профілювання зачеплення використовуються вкорочені епіциклоїди (інша назва цієї кривої – епітрохоїда), які відрізняються від звичайних та подовжених відсутністю гострих перегинів та самоперетинів. Вхідними конструктивними параметрами для розрахунку та побудови зачеплення ГП є число зубців сателіта z_1 , ексцентриситет передачі e , радіус кола центрів цівок цівкового колеса $R_{ц.ц.}$, радіус цівки $r_{ц.}$. Ці параметри задаються виходячи з робочих характеристик майбутньої ГП – передатного відношення, робочого об'єму, габаритів. Між кількостями зубців та радіусами центроїд є залежність:

$$R_1 = e \cdot z_1; R_2 = e \cdot z_2; \frac{z_1}{z_2} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (1.1)$$

Для утворення вкороченої епіциклоїди 3, зовнішня центроїда цівкового колеса з радіусом R_2 , обкатується без проковзування навколо нерухомої внутрішньої центроїди сателіта з радіусом R_1 (див. рис. 1.1). Одночасно, центроїда цівкового колеса жорстко з'єднана з колом центрів цівок радіусом $R_{ц.ц.}$, одинична точка якого і описує епіциклоїду 3. Центр рухомої центроїди при цьому описує коло, радіус якого є ексцентриситет передачі e . Рівняння вкороченої епіциклоїди в параметричній формі мають вигляд [10, 27, 109, 113]:

$$x(\varphi) = R_{ц.ц.} \cdot \cos(\varphi/z_2) + e \cdot \cos \varphi, \quad (1.2)$$

$$y(\varphi) = R_{ц.ц.} \cdot \sin(\varphi/z_2) + e \cdot \sin \varphi. \quad (1.3)$$

Інший спосіб утворення вкороченої епіциклоїди оснований на коченні твірного кола по зовнішній стороні напрямного кола [11, 15, 93]. Профіль сателіта 4 є внутрішня еквідистанта до вкороченої епіциклоїди 3. Профіль

цівкового колеса в даному випадку утворений цівками з постійним радіусом r_y , який задає відстань віддалення еквідистанти. Еквідистанта до вкороченої епіциклоїди описується рівняннями [109, 113]:

$$\xi(\varphi) = x(\varphi) - \frac{r_y \cdot dy/d\varphi}{\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}}, \quad (1.4)$$

$$\eta(\varphi) = y(\varphi) + \frac{r_y \cdot dx/d\varphi}{\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}}. \quad (1.5)$$

Розглянемо детальніше конструктивне виконання деталей, що утворюють зачеплення ГП. Кожна з деталей має власні особливості геометрії, обумовлені функціональним призначенням. На рис. 1.2 зображено елементи геометрії деталей ГП. Основним елементом геометрії сателіта є профільна робоча поверхня 1 (рис. 1.2, а), яка розташована уздовж напрямних кривих 2, адекватних еквідистанті до вкороченої епіциклоїди. Для цівкового колеса напрямними кривими є дуги 2 (рис. 1.2, б) з постійним радіусом, уздовж яких розміщуються робочі поверхні 1.

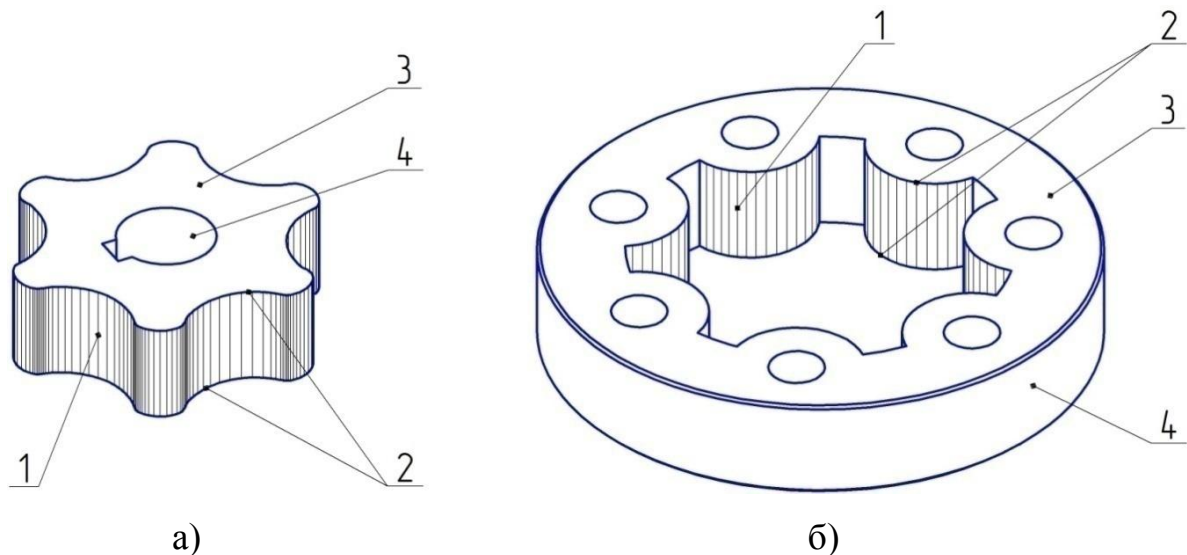


Рис. 1.2 Елементи геометрії сателіта ГП (а) і цівкового колеса (б):

1 – робоча поверхня; 2 – напрямні криві; 3 – торцеві поверхні; 4 – базові поверхні

Аналізуючи геометрію зачеплення, стає очевидним, що ділянка западини між цівками під час роботи не сприймає контакту з верхівкою зуба сателіту, що не обмежує її геометричну форму. Отвори, вісі яких співпадають з центрами

цівок, можуть слугувати технологічними базами для базування деталі на окремих операціях обробки, але в роботі ГП дані конструктивні елементи участі не приймають. Важливою умовою є дотримання симетрії розташування робочого профілю відносно базових поверхонь 4. Для сателіта такою базою є посадковий отвір, для цівкового колеса – зовнішня циліндрична поверхня. Дотримання перпендикулярності робочих профільних поверхонь до торцевих поверхонь 3, а також взаємна паралельність торцевих поверхонь є необхідною умовою для правильного функціонування зачеплення.

Існують конструкції ГП зі збірним цівковим колесом [104]. Одна із таких конструкцій представлена на рис. 1.3. Її особливість полягає в заміні цівок на ролики 3, які взаємодіючи із сателітом 2 можуть вільно обертатися навколо власних осей в корпусі 1. Тертя ковзання в парі коліс замінюють тертям кочення. Така конструкція отримала назву “героллерна”. Її основний недолік полягає у необхідності збільшення зовнішнього діаметру корпусу цівкового колеса для розміщення в ньому роликів, що веде за собою збільшення габаритів гідравлічної машини або редуктора.

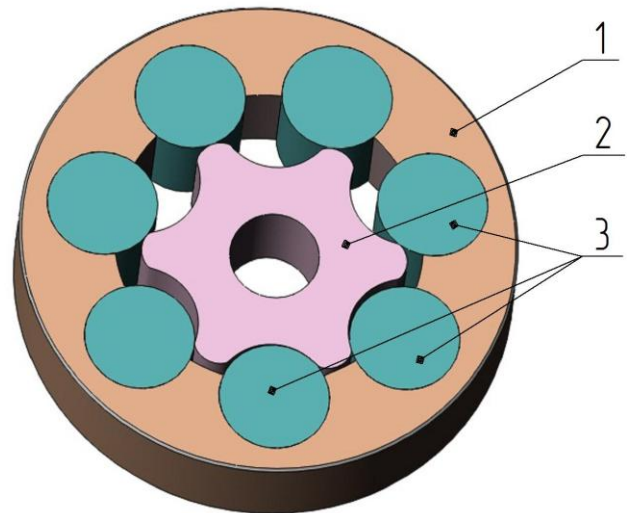


Рис. 1.3 Героллерна пара

1 – корпус цівкового колеса; 2 – сателіт;
3 – ролики;

Більш складний різновид зачеплення ГП передбачає утворення внутрішнього профілю цівкового колеса у вигляді спряженої обвідної сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд. Особливості геометрії такого зачеплення приведені в патентах фірми Hill Engineering Company [64, 73]. Аналіз інших патентів цієї фірми [61, 62, 63, 71] свідчить про широку область застосування даного зачеплення. Зачеплення ГП, в якому профіль цівкового колеса є обвідною сімейства положень сателіту, подано на рис. 1.4.

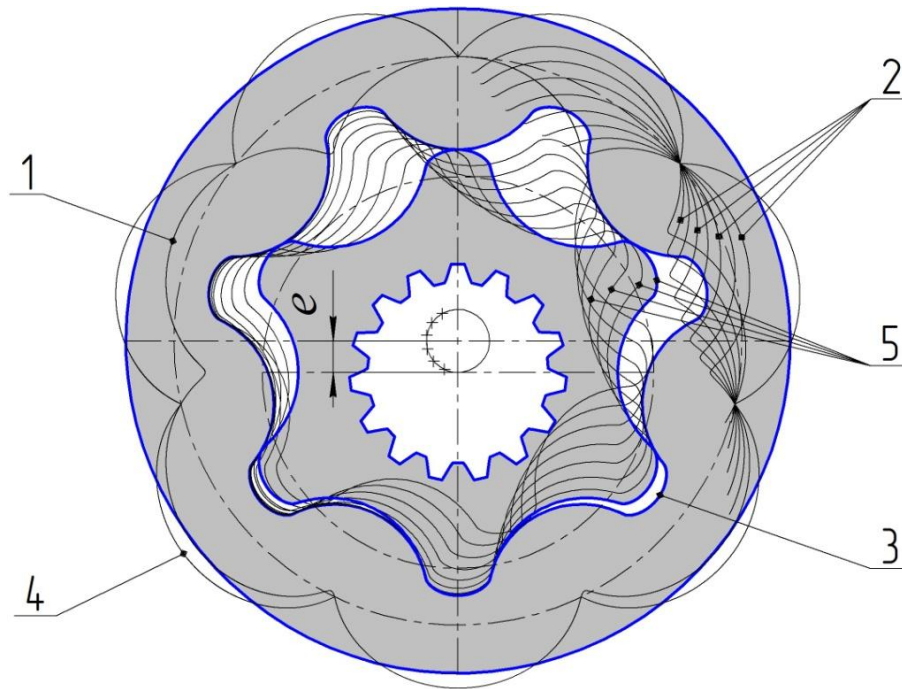


Рис. 1.4 Зачеплення ГП в якому профіль цівкового колеса окреслений обвідною сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд

1 – вкорочена епіциклоїда; 2 – сімейство вкорочених епіциклоїд; 3 – обвідна сімейства вкорочених епіциклоїд; 4 – сімейство еквідистант до вкорочених епіциклоїд (множина положень профілю сателіта); 5 – обвідна сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд (профіль цівкового колеса)

Аналіз робіт [10, 14, 27, 85, 92, 95, 96, 109, 113, 115, 127, 128, 129, 132], присвячених проектуванню і виготовленню зачеплення ГП, дозволив виявити і сформулювати задачі, які стосуються синтезу кривих, що окреслюють профілі коліс ГП. Зокрема, еквідистанта до вкороченої епіциклоїди не завжди може існувати у вигляді, придатному для синтезу робочих профілів ГП, а також інструментів, в основу яких вона покладена. Це пов'язано з тим, що існує певна гранична відстань віддалення еквідистанти від початкової епіциклоїдальної кривої, яка задається радіусом цівки $r_{\text{ц}}$. При перевищенні граничної відстані віддалення, порушуються умови гладкості кривої і з'являються так звані «вироджені ділянки» [100, 132]. «Вироджені ділянки» – це місця, в яких еквідистантна крива перетинає сама себе, утворюючи вузлові точки. Виникає необхідність визначити умови існування еквідистанти до епіциклоїди в придатному для застосування вигляді, без зазначених геометричних порушень.

Наступною проблемою яка стосується проектування зачеплення ГП є раціональний математичний опис спряженої обвідної сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд у вигляді єдиної неперервної кривої. Складність аналітичного визначення такої обвідної як неперервної кривої полягає в тому, що необхідно описати ділянки дуг постійної кривизни і ділянки еквідистанти до епіциклоїди єдиними рівняннями. Приклади побудови і опису спряжених обвідних сімейств епіциклоїдальних і гіпоциклоїдальних кривих, розглянуті в роботах [11, 27, 109, 113, 116, 117, 128, 132]. Аналіз перелічених робіт показав суттєві недоліки спроб описати зазначені криві, а саме:

- опис різних ділянок обвідних задається різними системами рівнянь, які придатні для побудови за певних граничних умов;
- відсутність однозначної залежності, яка виражає зв'язок між параметром побудови кривої і параметром, який визначає криву із множини сімейства;
- складність математичного апарату.

Стає очевидним, що обвідна може існувати в неперервному вигляді при дотриманні ряду умов, які необхідно визначити і включити в математичний апарат її опису. Із загальної теорії формоутворення відомі декілька основних методів визначення обвідних – графічний, аналітичний і кінематичний. Із них найбільш точний і поширений – аналітичний. Особливістю цього методу є представлення обвідної сімейства кривих у вигляді рівнянь [44, 90, 113]:

$$\begin{cases} X = f_1(\varphi, t); \\ Y = f_2(\varphi, t). \end{cases} \quad (1.6)$$

де t – параметр, що визначає криву із множини сімейства.

Зв'язок параметрів t і φ , виражається наступною рівністю:

$$\frac{\partial X}{\partial t} \cdot \frac{\partial Y}{\partial \varphi} - \frac{\partial X}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial Y}{\partial t} = 0. \quad (1.7)$$

Формула (1.7) наводиться в літературі [10, 27, 44, 89, 90, 113], а її геометричний зміст свідчить про те, що точки обвідної належать множині, в якій дискримінанта сімейства кривих дорівнює нулеві. Для визначення обвідної

необхідно знайти розв'язок рівняння (1.7) відносно t , тобто привести рівняння $f(\varphi, t) = 0$ до вигляду $t = f(\varphi)$. Тоді рівняння (1.6) обвідної сімейства плоских кривих слід записати в наступному вигляді:

$$\begin{cases} X(\varphi) = f_1(\varphi; f(\varphi)); \\ Y(\varphi) = f_2(\varphi; f(\varphi)). \end{cases} \quad (1.8)$$

Розв'язок $t = f(\varphi)$ має задовольняти наступним вимогам:

- забезпечення неперервності і відсутності порушень геометрії обвідної;
- забезпечення відсутності інтерференції в точках спряження еквідистанти і обвідної;
- універсальність і однозначність розв'язку, його постійність при зміні вхідних параметрів.

Аналітичний метод визначення обвідних є універсальним і не обмежується зачепленнями на основі епіциклоїдальних кривих. Вирішення цієї задачі відкриває широкі можливості синтезу різноманітних зачеплень на основі алгебраїчних кривих. Зокрема це дозволить описати початковий контур інструментальної рейки черв'ячних інструментів (черв'ячних фрез та шліфувальних кругів), та профілі різноманітних інструментів для обробки профілю сателіту і цівкового колеса в умовах неперервного обкату.

1.2 Аналіз методів обробки робочого профілю цівкового колеса

Питання стосовно розробки і дослідження процесів формоутворення профілів коліс ГП висвітлюються в роботах Майрона Ф. Хілла, В. М. Шаннікова, В. К. Лобастова, 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.

Для формоутворення профільної поверхні сателіту, окресленої еквідистантою до вкороченої епіциклоїди, відомі методи зубодовбання однозубими та багатозубими довбачами, фрезерування дисковими, кінцевими

та черв'ячними фрезами, шліфування універсальним та спеціально профільованим інструментом [3, 4, 5, 6, 7, 8, 48, 68, 72, 82, 104, 111, 113]. У масовому виробництві набув поширення метод спікання коліс ГП із порошкових матеріалів. Сателіт має зовнішні зубці, що не обмежує габарити і конструктивне виконання різального інструменту, а також забезпечує його повноцінний доступ до оброблюваної поверхні. Наведена особливість робить профіль сателіту технологічним у виготовленні. Виходячи з цього, детально зупинятися на розгляді методів обробки сателіта ми не будемо.

Цівкове колесо має внутрішній зубчатий вінець, що вносить певні технологічні обмеження під час його 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. Літературно-патентний аналіз першоджерел показує, що для обробки внутрішнього профілю цівкового колеса, існує низка специфічних методів. Для реалізації деяких з них застосовуються дуже дорогі спеціалізовані верстати [103], для інших – спеціальний складний інструмент та оснащення [59, 60, 65, 69]. При високій твердості деталі (порядка 60 HRC) частина з відомих методів лезової обробки [104, 113], виявляється непридатною для застосування, але їх аналіз допоможе відстежити хід наукової та інженерної думки в цій області. Так, наприклад, на основі методів лезової обробки можливо створювати методи фінішної обробки. Розглянемо послідовно відомі методи обробки профілю цівкового колеса.

Відомий метод нарізання внутрішнього профілю цівкового колеса профільним довбачем Феллоу [113] в умовах обкату. Метод реалізується за класичною схемою зубодовбання. Його сутність пояснює схема, подана на рис. 1.5. Оброблюване колесо 1 і довбач 2 утворюють зачеплення і здійснюють узгоджені рухи колових подач $S_{дет.}^k$ і $S_{інст.}^k$. Окрім обертання довбач здійснює зворотно-поступальний рух $ЗП$.

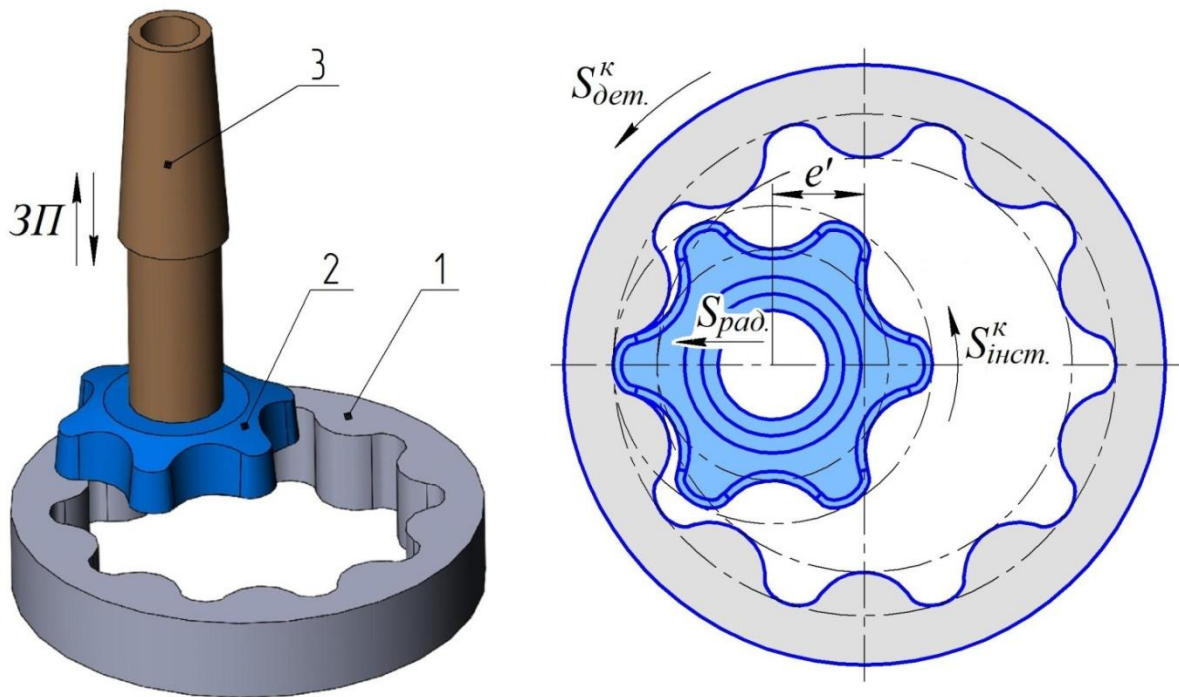


Рис.1.5 Зубодовбання цівкового колеса довбачем Феллоу в умовах обкату

1 – оброблюване колесо; 2 – різальна частина довбача; 3 – корпус довбача;
 e' – ексцентриситет верстатного зачеплення; ЗП – зворотно-поступальний рух довбача у вертикальній площині; $S_{дет.}^k$ – рух колової подачі деталі; $S_{инст.}^k$ – рух колової подачі інструменту; $S_{рад.}$ – рух подачі в радіальному напрямку

Довбач Феллоу – багатозубий інструмент, профіль якого є обвідна послідовних положень профілю цівкового колеса, при обкаті його центроїди навколо центроїди довбача. Різниця в кількості зубців інструменту і колеса завжди більша одиниці і залежить від умови забезпечення гарантованих зазорів між цівками колеса та непрацюючими зубцями довбача. Інструмент має кути заточки по передній та задній поверхнях γ і α , що є необхідним для процесу різання. При обробці евольвентних зубчатих коліс, методи зубодовбання забезпечують 6ту-8му ступінь точності (ГОСТ 1643-81), в залежності від класу точності довбача. Можливість обробки загартованих деталей (30...40 HRC) може досягатися шляхом виконання різальної частини довбача із сучасних тврдосплавних композиційних матеріалів.

Основним недоліком описаного методу є складність виготовлення довбача Феллоу, який повинен мати високу точність. Під час переточування по передній поверхні відбудуватиметься неминуче зміщення профілю довбача в радіальному

напрямку, що призводитиме до зниження точності профілю цівкового колеса. Під час обробки матимуть місце значні знакозмінні навантаження, які виникатимуть при переході форми ріжучої кромки з опуклої в увігнуту. Це в свою чергу спричинить зниження точності обробки, що підтверджено результатами експериментальних досліджень в роботі [83].

Відомий метод обробки внутрішнього профілю цівкового колеса в умовах обкату однозубим довбачем [102, 104]. Схема за якою реалізується даний метод представлена на рис. 1.6. В основу цієї схеми покладений принцип обкату центроїди цівкового колеса, пов'язаної з заготовкою, навколо нерухокої центроїди сателіта, пов'язаної з інструментом. Рух обкату заготовки колеса здійснюється від пристрою для здійснення планетарного руху, яким оснащується зубодовбальний верстат. Конструкції подібних пристроїв зазвичай розробляються індивідуально, під конкретну деталь.

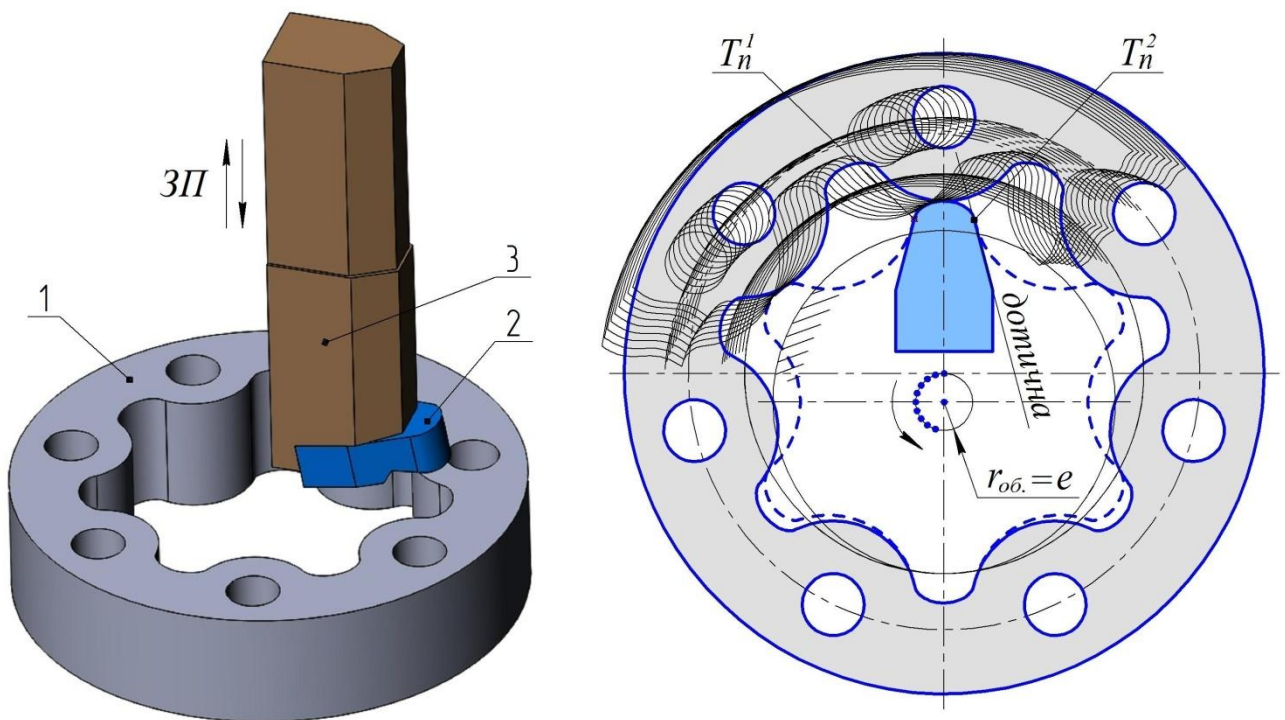


Рис. 1.6 Зубодовбання цівкового колеса в умовах обкату однозубим довбачем

1 – оброблюване колесо; 2 – різальна частина інструменту (пластина); 3 – корпус інструменту; ЗП – зворотно-поступальний рух довбача у вертикальній площині; $r_{об.}$ – радіус кола обкату, який дорівнює ексцентриситету передачі e ; T_n^1 , T_n^2 – точки перегину (переходу еквідистантної кривої із опуклої в увігнуту)

Нерухома центроїда уявного сателіта замінюється однозубим інструментом [76], а під час обробки відтворюється верстатне зачеплення «сателіт – цівкове колесо». Інструмент складається з корпусу, в гніздо якого механічно кріпиться різальна пластина. Геометрія профілю пластини включає в себе опуклу ділянку еквідистанти до вкороченої епіциклоїди (ОДЄЄ), а увігнуті ділянки, які мають місце в конструкції довбача Феллоу відсутні. Замість них пластина має прямі ділянки, які співпадають з напрямками дотичних в точках T_n^1 і T_n^2 . Дані точки відповідають точкам переходу еквідистантного профілю із опуклого в увігнутий. Заготовка здійснює планетарний рух, адекватний обкату цівкового колеса навколо нерухомого сателіту. Радіус кола обкату рівний ексцентриситету передачі e . В результаті узгоджених рухів відбувається процес формоутворення внутрішнього профілю.

Профіль інструменту має кривизну постійного знаку, що усуває в процесі різання знакозмінні навантаження. Конструкція не обмежує кількість переточувань, довбач може оснащатись твердосплавними пластинами, що можуть мати по декілька різальних кромки. Таке технічне рішення зводить до мінімуму затрати на інструмент при частій зміні типорозмірів деталей. Метод може бути застосований як чистовий для обробки деталей з твердістю 28...32 HRC [104]. Для забезпечення гнучкості, метод доцільно реалізувати на верстатах, оснащених планетарним столом зі змінним ексцентриситетом [77, 86], що дасть змогу оброблювати широку гамму цівкових коліс. Конструкція столу також передбачає можливість оброблення сателітів, що веде за собою інтеграцію технологій. В наслідок невисоких показників точності та шорсткості, спосіб доцільно здійснювати як напівчистовий з послідуною термообробкою, та остаточною фінішною обробкою.

Обробку внутрішнього профілю цівкового колеса також можливо здійснювати на протяжних верстатах комплектом профільних протяжок. Відомості про виготовлення цівкових коліс ГП методом протягування відсутні, але не виключається можливість його практичного застосування. Профіль протяжки повинен мати високу точність, тому процес її виготовлення та

переточування є трудомістким та високовартісним. Як і у випадку з довбачем Феллоу, на точність обробки матиме вплив переточувань. Протяжки можуть виготовляються цільними або оснащатися набором фасонних твердосплавних кільцевих зубців. Обробляти деталі подібним методом доцільно лише в умовах крупносерійного та масового виробництва.

Існує метод шліфування профілю цівкового колеса циліндричним кругом на контурно-шліфувальних верстатах з ЧПК (рис. 1.7). Даний метод набув широкого поширення в одиничному і дрібносерійному виробництві. Це обумовлено простотою і доступністю інструменту, та можливістю реалізації наведеного методу на контурно-шліфувальних верстатах, які є поширеними у виробництві. Рух інструменту (або деталі) тут здійснюється по запрограмованій траєкторії.

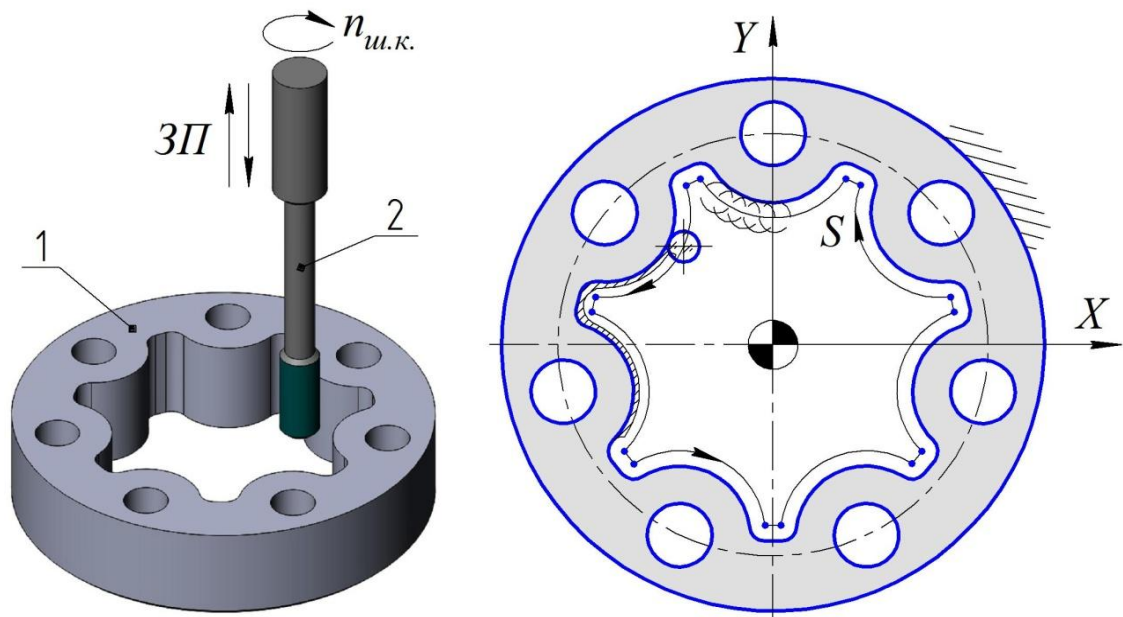


Рис. 1.7 Шліфування цівкового колеса по програмі

1 – оброблюване колесо; 2 – інструмент (шліфувальна головка); $n_{ш.к.}$ – частота обертання інструменту; ЗП – зворотно-поступальний рух шліфувальної головки; S – рух подачі

З патенту [60] фірми Danfoss A/S (Sauer Danfoss), відомий метод хонінгування профілю цівкового колеса, який реалізується за аналогією до хонінгування внутрішнього евольвентного зачеплення. Метод реалізується на спеціальних зубохонінгувальних верстатах. Для здійснення обробки застосовують спеціальний хон, який проектується під конкретну деталь.

Конструкцію даного хону подано на рис. 1.8 [60]. Цей інструмент частково повторює геометрію сателіта, профіль його брусків окреслено увігнутими ділянками еквідистанти до епіциклоїди (УДЕЕ). Бруски можуть мати алмазне або КНБ покриття. Інструмент і колесо здійснюють обертання навколо власних осей. Одночасно хон здійснює осцилюючий рух. Таким чином, абразивні зерна брусків в процесі обкочування здійснюють мікрорізання.

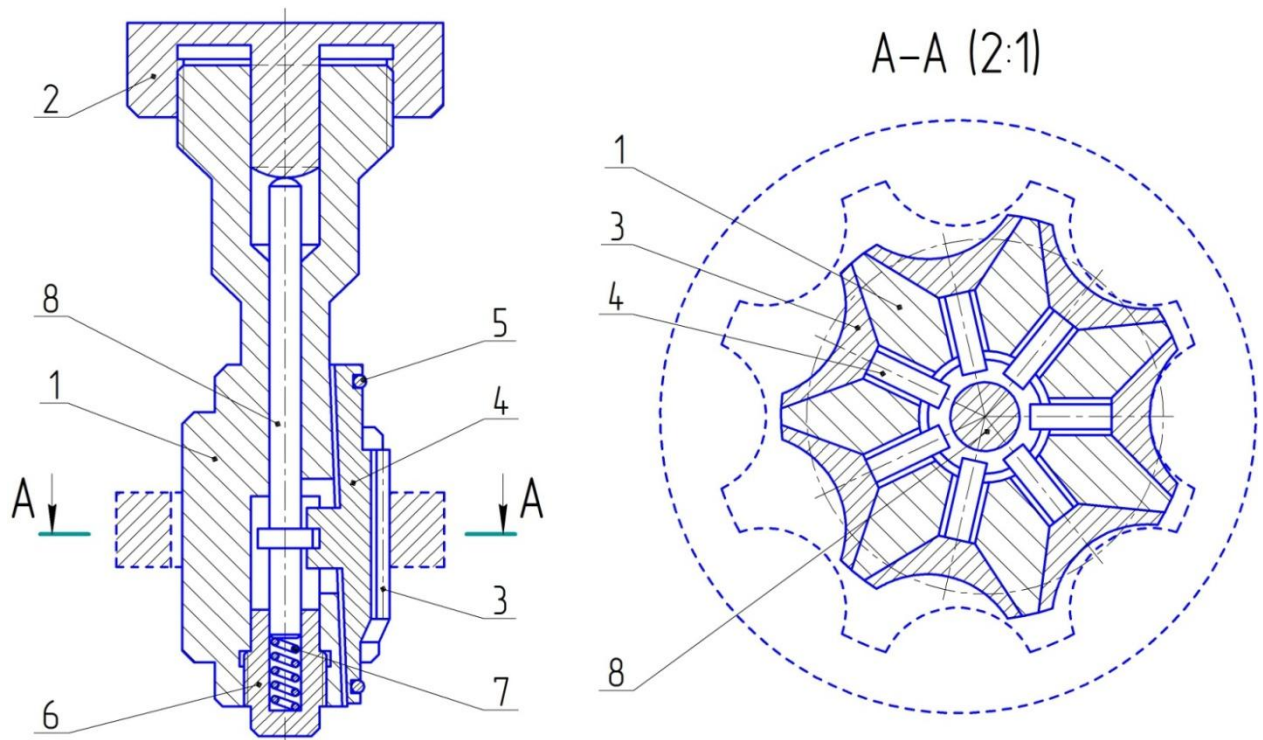


Рис. 1.8 Конструкція хону [60]

1 – корпус хону; 2 – шпindelь; 3 – абразивний брусок; 4 – клин;
5 – кільце пружинне стискаюче; 6 – пробка; 7 – пружина; 8 – стрижень

Метод придатний для фінішної обробки загартованих деталей, що мають твердість порядку 60 HRC. Інформація про якісні показники, що досягаються хонінгуванням наведеним інструментом відсутні. Його недоліками є низька гнучкість, складність інструмента і як наслідок – його висока собівартість.

В роботі [65] представлена конструкція пристрою для суперфінішування профільної поверхні статора двигуна Ванкеля, окресленої епітрохоїдою. Пристрій включає в себе хонінгувальну головку яка має систему регулювання натягу, механізм відтворення руху обкату і привід осциляції інструменту. Принцип роботи пристрою пояснюється кресленням поданим на рис. 1.9.

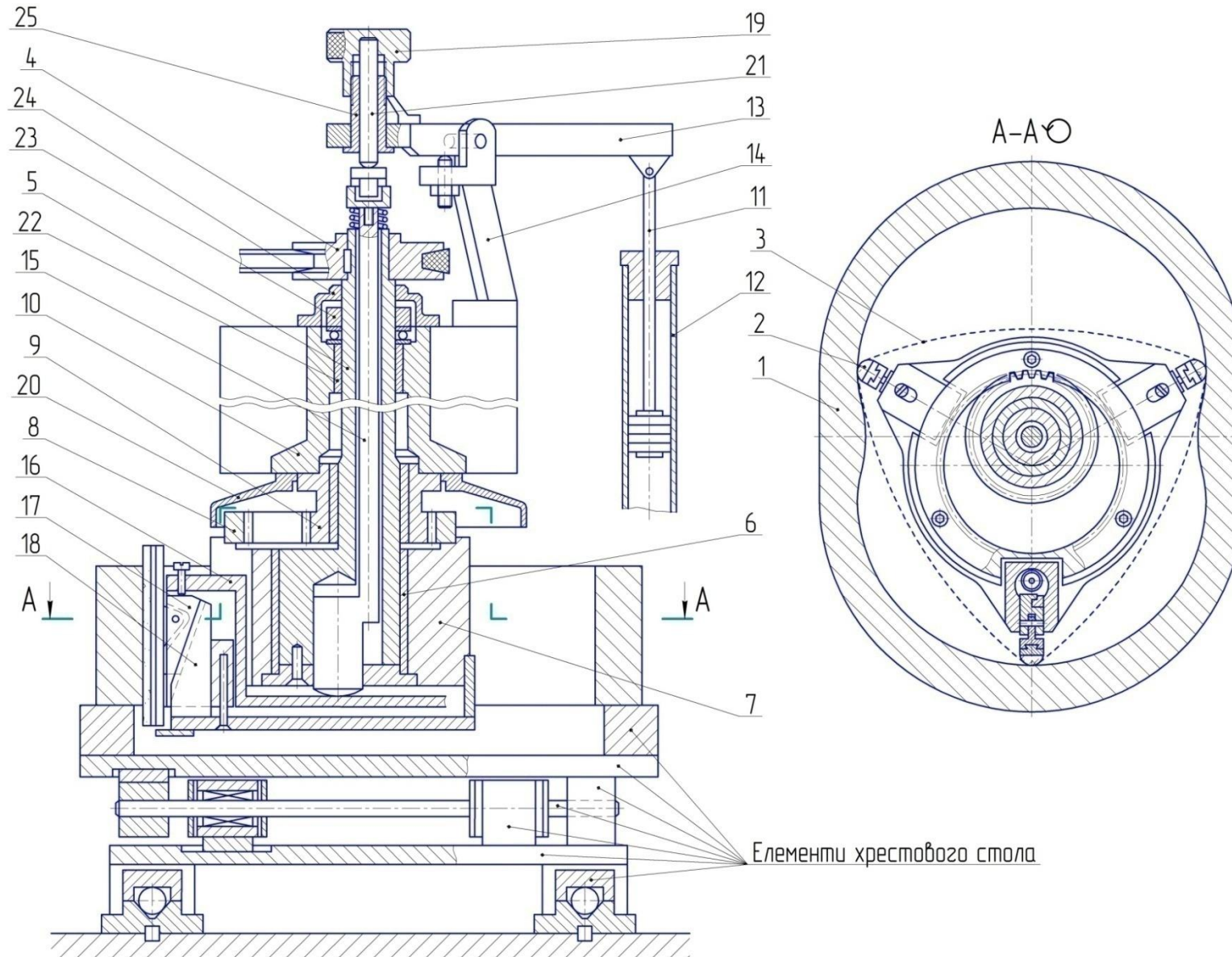


Рис. 1.9 Пристрій для
суперфінішу
профільної поверхні
статора двигуна
Ванкеля [65]

- 1 – статор; 2 – брусок;
- 3 – трикутник Рело;
- 4 – шків; 5 – вал;
- 6 – підшипник; 7 – корпус хону;
- 8 – рухоме зубчасте колесо; 9 – нерухоме зубчасте колесо;
- 10 – нерухомий елемент;
- 11 – шток;
- 12 – гідроциліндр;
- 13 – важіль;
- 14 – кронштейн; 15 – вал;
- 16 – тяга; 17 – клин рухомий; 18 – клин нерухомий;
- 19 – гайка регулювання натягу;
- 20 – кожух; 21 – пуансон;
- 22 – підшипник;
- 23 – гайка; 24 – кожух;
- 25 – втулка

В патенті фірми Ex-Cell-O Corp Ltd [59], яка займається розробкою та виготовленням металообробного обладнання, представлений пристрій для хонінгування внутрішнього профілю цівкового колеса ГП в умовах обкату. Його конструкція представлена на рис. 1.10.

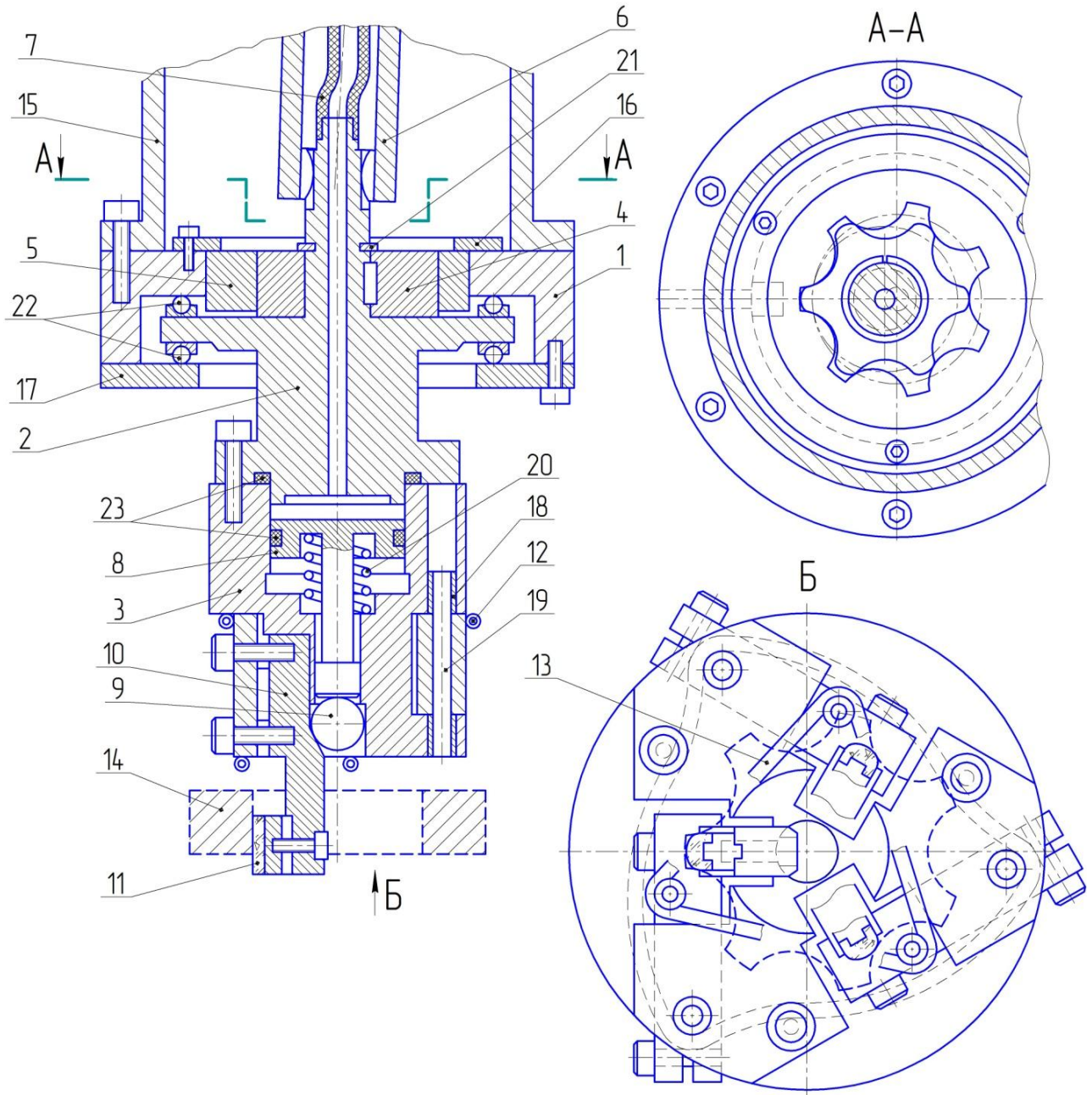


Рис. 1.10 Пристрій для хонінгування профілю цівкового колеса [59]

1 – корпус редуктора; 2 – вихідний вал; 3 – корпус хонінгувальної головки; 4 – сателіт еквівалентної ГП; 5 – цівкове колесо еквівалентної ГП; 6 – привідний вал; 7 – гнучка магістраль; 8 – поршень; 9 – кулька; 10 – важіль; 11 – брусок; 12, 13 – пружні кільця; 14 – оброблюване колесо; 15 – несучий елемент; 16 – кільце притискне; 17 – опора; 18 – втулка; 19 – штифт; 20 – пружина; 21 – кільце стопорне; 22 – підшипник упорний; 23 – кільця ущільнення

Також відомий метод абразивної обробки – шліфування профільним інструментом на верстатах фірми KAPP-NILES (Німеччина) в умовах одиничного ділення [103]. Фірма пропонує профіleshліфувальні верстати та інструмент для здійснення комплексної технології фінішної обробки профілів цівкових коліс і сателітів. Процес шліфування здійснюється за схемою, представленою на рис 1.12.

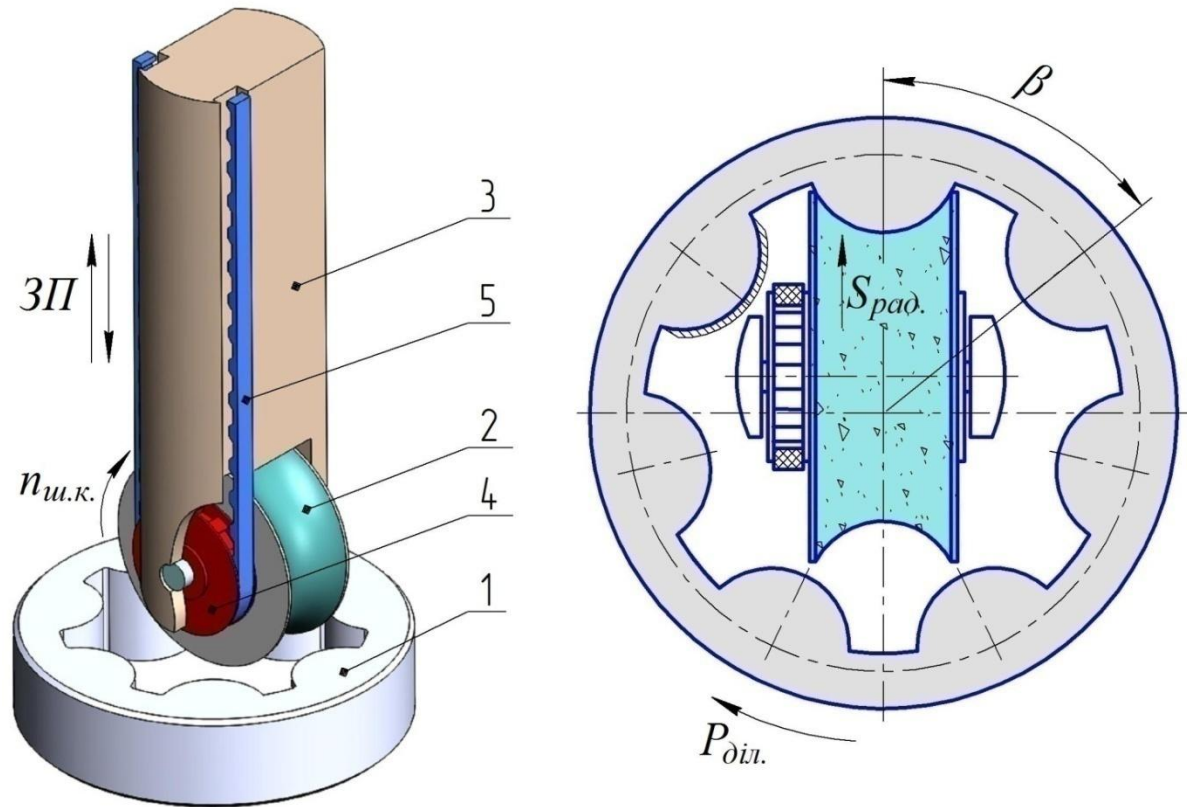


Рис. 1.12 Шліфування цівкового колеса на верстатах фірми KAPP-NILES

в умовах одиничного ділення з використанням шліфувальної оправки

- 1 – оброблюване цівкове колесо; 2 – інструмент (шліфувальний круг); 3 – корпус привідної шліфувальної оправки з виносним шпинделем; 4 – зубчатий шків; 5 – зубчатий пас;
 $ЗП$ – зворотно-поступальний рух оправки у вертикальній площині; $n_{ш.к.}$ – частота обертання диска; $S_{рад.}$ – радіальна подача заготовки; $P_{діл.}$ – рух ділення заготовки; β – кут ділення

Для шліфування застосовуються спеціально профільований CBN-диск, який встановлюється в шліфувальну оправку з виносним шпинделем. Обертання інструмента здійснюється від окремого привода через зубчатий пас на шків, який з'єднаний зі шліфувальним диском. Одночасно оправка з диском здійснює зворотно-поступальний рух $ЗП$ уздовж вісі колеса, а заготовка – рух

радіальної подачі S_{rad} . Цівкове колесо здійснює дискретні рухи ділення, повертаючись для обробки наступної цівки на кут β . Для цього передбачені прецизійні ділильні пристрої. Процес здійснюється на спеціальних верстатах, наприклад, шліфувальний верстат для обробки внутрішніх зубців VIG 41 фірми KAPP. Верстат VIG 41 можна розглядати як вдосконалену модель VIG 332, оснащеного блоком керування 840D від фірми Siemens. Шліфувальний верстат VIG 41 розроблений для повного шліфування зубчатого внутрішнього профілю або інших профілів з використанням шліфувальних дисків CBN, що не потребують правки. Орієнтовна вартість такого верстата становить 1050000,0 € [103]. На вказаному верстаті використовуються виключно профіleshліфувальні диски CBN. Шліфувальний диск являє собою загартований сталевий ролик з нанесеним гальванічним способом одношаровим покриттям CBN (кубічний нітрид бора). Завдяки цій спеціальній технології не має потреби у пристроях для правки, а також пов'язаного з цим обладнання. Вартість одного диску для попереднього шліфування становить 651,0 €, а диск для доведення – 873,0 € [103]. Було здійснено вимірювання параметрів цівкового колеса героторного гідромотора Sauer Danfoss, обробка якого здійснювалась на верстаті VIG 41. Вимірювання здійснювались в метрологічній лабораторії ПрАТ Гідросила АПМ (м. Кропивницький). На основі результатів вимірювання можна стверджувати, що метод забезпечує високу точність в межах 4-5 квалітету і шорсткість $Ra \sim 0,2$ мкм. Для порівняння, при шліфуванні евольвентних коліс методом копіювання, досягається 6-8 ступінь точності і шорсткість Ra 0,5...1,25 мкм. Обробка за цією схемою має високу продуктивність, ефективно виплавляє похибки попередніх операцій, а також дозволяє обробляти деталі після термообробки з твердістю порядку 60 HRC. Основним недоліком є дуже висока вартість обладнання.

В роботі [103] також представлено оригінальний метод обробки, який поєднав в собі властивості вищеописаного методу шліфування на верстатах KAPP-NILES і методу [102] (рис. 1.6 і 1.12). Сутність цього методу пояснює схема, подана на рис. 1.13. Обробка профілю цівкового колеса здійснюється

дисковим шліфувальним кругом в умовах обкату. Шліфувальна оправка із закріпленим інструментом вводиться скрізь порожнину цівкового колеса для утворення верстатного зачеплення. Після досягнення необхідної глибини врізання, цівкове колесо починає здійснювати рух обкату (аналогічно схемі рис. 1.6). Припуск знімається безперервно, уздовж дуги профілю цівки. В роботі [103] автори приводять практичні рекомендації щодо здійснення методу шліфування на координатно-шліфувальному верстаті Hauser 5SM. Для цього зазначений верстат необхідно оснастити планетарним столом з ЧПК [77, 86]. Верстат укомплектовано набором оправок з виносним шпинделем (оснастка для шліфування внутрішніх шпонкових пазів), які дозволяють здійснити дану обробку. Цей метод має багато спільного з методом шліфування внутрішнього гіпоциклоїдального профілю, описаним в патенті [67], який належить компанії Parker Hannifin Corporation (США).

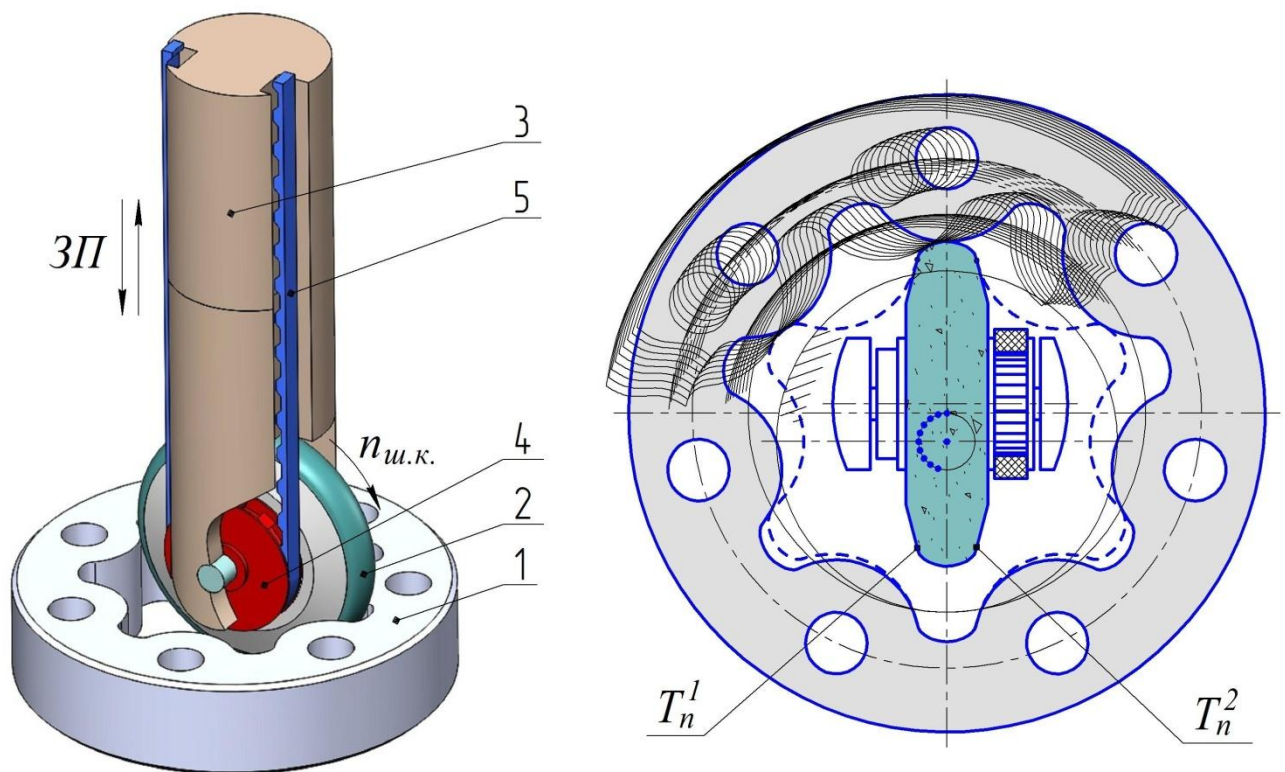


Рис. 1.13 Шліфування внутрішнього профілю цівкового колеса

в умовах обкату дисковим кругом

1 – оброблюване колесо; 2 – шліфувальний круг; 3 – корпус привідної шліфувальної оправки; 4 – зубчатий шків; 5 – зубчатий пас; ЗП – зворотно-поступальний рух інструменту у вертикальній площині; T_n^1 , T_n^2 – точки перегину; $n_{ш.к.}$ – частота обертання круга;

Для профілювання інструменту використана ОДЕЕ, яка має кривизну постійного знаку. За аналогічною методикою здійснюється профілювання однозубого довбача. Відомості щодо практичного застосування представленого методу шліфування і його якісних показників відсутні, метод потребує подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

Окрім вище перелічених методів механічної обробки, колеса ГП отримують електроерозійною обробкою та методом порошкової металургії. У першому випадку це процес вирізання металевим дротом на електроерозійних верстатах з ЧПК. Метод порошкової металургії передбачає спікання коліс ГП із порошкових матеріалів в жорстких прес-формах.

Сучасні вирізні електроерозійні верстати здатні забезпечити точність в межах $\pm 0,001$ мм, та шорсткість 9-10 класу. Наприклад, електроіскровий вирізний верстат серії SLC, мод. SLC400G фірми Sodick (Японія), завдяки опції дзеркального вигладжування здатен досягти шорсткості Ra 0,05 мкм. В опціях програмування даного верстату є готове рішення для обробки коліс ГП, яке передбачає введення основних конструктивних параметрів коліс (число зубців, діаметри). Побудова профілю і генерація програмного коду здійснюється автоматично в діалоговому режимі. Орієнтовна вартість такого верстату – 189800,0 €. Електроерозійна обробка дає змогу обробляти деталі після термообробки будь-якої твердості. Процес не потребує дорогих інструментів та оснащення, а за рахунок ЧПК досягається висока гнучкість. Суттєвою перешкодою на шляху широкого впровадження залишається висока ціна на якісне технологічне обладнання.

Метод спікання коліс ГП із порошкових матеріалів зарекомендував себе як точний та високоефективний. На даний час в світі існує багато фірм, які спеціалізуються на виготовленні продукції із порошкових матеріалів (здебільшого в Китаї та США), зокрема коліс ГП. Підприємствам з крупносерійним та масовим типом виробництва стало вигідно закуповувати готові деталі великими партіями і комплектувати ними свою продукцію. Для коліс ГП фірми-виробники, такі як Parker Hannifin Corp (США), Auroral Sinter

Metals Corp Ltd (Тайвань), мають спеціально розроблену технологію виготовлення дифузійно-легованих металевих порошків. Зміст легуючих елементів та вуглецю обирається в залежності від умов роботи ГП, та робочого середовища. Суміш металевих порошків і графіту спресовують під високою температурою. Для підвищення точності кінцеве спікання здійснюють в калібруючих прес-формах. Твердість отриманих таким методом деталей – 80...85 HRB, подальша термообробка до 45..50 HRC. Точність виготовлення – 8-10 клас, шорсткість – Ra 3,2-1,6 мкм. Вказані параметри досягаються за умови подвійного пресування – попереднього і остаточного в калібруючих прес-формах. Торці деталей як правило шліфують до Ra 0,8. Цей метод характеризується низькою собівартістю, оскільки при великих обсягах виробництва він є економічно вигідним, та низькою гнучкістю.

1.3 Недоліки існуючих методів обробки профілю цівкового колеса та вибір базового прототипу

Наведені методи обробки профілю цівкового колеса ГП необхідно порівняти за критеріями точності, шорсткості, характеристиками обладнання та інструменту (універсальні або спеціальні), твердості оброблюваної заготовки. В таблиці 1.1 зведені основні характеристики приведених методів обробки цівкового колеса ГП. Ступінь точності тут подана для евольвентних зубчатих коліс, оскільки відсутній стандарт, що регламентує точність коліс ГП.

Таблиця 1.1

Характеристики методів обробки профілю цівкового колеса ГП

<i>Метод обробки профілю цівкового колеса ГП</i>	<i>Спеціалізація обладнання для обробки</i>	<i>Спеціалізація інструменту</i>	<i>Ступінь точності обробки (ГОСТ 1643-81)</i>	<i>Клас шорсткості оброблених поверхонь (ГОСТ 2789-59)</i>	<i>Твердість оброблених поверхонь (HRC)</i>
1	2	3	4	5	6
Зубодовбання добачем Феллоу в умовах обкату	Універсальні зубодовбальні верстати	Спеціальний інструмент	6–8	4–6	30...40

Продовження таблиці 1.1

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Зубодовбання однозубим інструментом в умовах обкату	Універсальні зубодовбальні верстати	Спеціальний інструмент	7–9	5–6	28...32
Протягування	Універсальні протяжні верстати	Спеціальний інструмент	–	–	30...40
Шліфування по програмі	Універсальні контурно-шліфувальні верстати	Універсальний інструмент	–	7–8	58...62
Хонінгування в умовах обкату	Спеціальні хонінгувальні верстати	Спеціальний інструмент	–	–	58...62
Шліфування на верстатах фірми KAPP-NILES в умовах одиничного ділення	Спеціальні профільно-шліфувальні верстати (з можливістю гнучкої переналадки)	Спеціальний інструмент	4–5	8–9	58...62
Електроерозійна обробка	Універсальні ерозійно-вирізні верстати	-	5–6	9–10	58...62
Порошкова металургія	Спеціальне обладнання (прес-форми)	-	8–10	5–6	45...50

На основі проведеного аналізу низки методів одробки профілю цівкового колеса ГП, виявлено наступні недоліки:

- недостатня точність і шорсткість обробки методів [104, 113];
- обмеження по твердості заготовки до 40 HRC [104, 113];
- розмір інструмента обмежується западиною між цівками (рис. 1.7);
- недостатня жорсткість інструменту (рис. 1.7);
- складність конструкції інструменту і оснащення [59, 60, 65, 69];
- низька гнучкість методу [59, 60, 65, 69];
- висока собівартість інструменту і верстатів (рис 1.12);

Враховуючи високі вимоги по якості робочих профілів цівкових коліс, та наявність істотних недоліків існуючих методів обробки, актуальним є проведення досліджень в цій області. Проведений аналіз існуючих методів обробки внутрішнього профілю цівкового колеса показує, що найбільш прогресивним технічним рішенням є схема шліфування [103], представлена на

рис. 1.13. Обробка за цією схемою має наступні переваги:

- можливість застосування простих і малозатратних інструментів – дискових шліфувальних кругів, які мають можливість швидкого відновленням різальних властивостей безпосередньо на верстаті, шляхом контурної правки (при цьому не виключається можливість застосування шліфувальних кругів з гальванічним напиленням, які не потребують правки);
- обробка здійснюється в умовах обкату з притаманною даному методу точністю і продуктивністю;
- виправлення похибок геометрії профілю після попередніх операцій;
- можливість обробки заготовок з твердістю порядку 60 HRC;
- гнучкість методу, якої можна досягти за рахунок ЧПК.

Враховуючи наведені переваги, приймаємо метод шліфування профілю цівкового колеса в умовах обкату дисковим кругом за базовий. Відомості про його впровадження у виробництво відсутні, як і інформація щодо забезпечуваних цим методом показників точності та шорсткості. Виникає необхідність ґрунтовно дослідити його фізичну суть, проаналізувати на предмет вдосконалення, провести експериментальні дослідження та надати відповідні рекомендації. В роботі [103] пропонують в якості формотворного профілю інструменту застосувати ОДЕЕ, по аналогії з однозубим довбачем [102, 104]. При цьому можливість застосування інших ділянок еквідистанти, наприклад увігнутих, не розглядається. Дослідження, представлені в роботах [83, 101, 104] показують, що процеси формоутворення профілю цівкового колеса лезовими інструментами з опуклою та увігнутою формою різальної кромки мають принципові відмінності:

1. Процес різання опуклою різальною кромкою характеризується незначними зусиллями, в той час як різання увігнутою кромкою супроводжується значно більшим зусиллям, обумовленим більшою довжиною лінії контакту кромки з оброблюваною поверхнею.

2. Точність обробленої поверхні для опуклої різальної кромки в 2 рази вища ніж при обробці увігнутою кромкою.

3. Різання опуклою кромкою дає стружку у вигляді невеликих сегментів довжиною 2,7...4,2 мм, в той час як стружка отримана різанням увігнутою кромкою має довжину 8,1...12,2 мм.

4. Шорсткість обробленої поверхні для опуклої кромки – Ra 2,2-4,2 мкм, для увігнутої – Ra 2,4-4,0 мкм.

Неточності, що виникають під час різання увігнутою кромкою обумовлені значним енергетичним навантаженням, спрямованим на пластичну деформацію і усадку стружки. Усадка є результатом зустрічного спрямування потоків деформованої стружки. Різання опуклою кромкою навпаки, спрямовує потоки в різнобічні напрямки. Наведені особливості процесу формоутворення характерні для лезового інструменту з неперервною різальною кромкою. Обробка абразивними інструментами, які мають у своєму складі окремі абразивні тіла, характеризується дрібною елементною стружкою, незалежно від форми профілю. Процеси фінішної обробки, такі як шліфування, мають іншу фізичну суть, тому необхідно сформулювати новий підхід щодо вибору геометрії інструменту для фінішної обробки цівкового колеса.

Сформулювати задачі досліджень стосовно фізичної суті базового методу шліфування допоможуть наступні висновки:

1. В якості формотворного профілю інструменту використана ОДЄЄ, але не виключена можливість застосування і інших ділянок (наприклад УДЄЄ). Виникає необхідність встановити, яким чином впливатиме подібна заміна на процес обробки. Якщо зміна форми профілю інструменту позитивно впливатиме на якісні показники оброблюваного колеса, це може стати предметом вдосконалення базового методу шліфування.

2. Базовий метод шліфування передбачає планетарний обкат центроїди цівкового колеса навколо центроїди інструменту. Але така схема формоутворення потребує додаткових уточнень. Зокрема, формоутворення профілю цівкового колеса може досягатись різними комбінаціями більш простих диференційованих рухів. Звідси можна сформулювати задачу пошуку і аналізу таких комбінацій.

3. Процес обкату характеризується зміною положення зони різання, яке буде визначатись фазою обкату. Виникає необхідність дослідити кінематику контактної взаємодії в плоскому зачепленні та в просторовому, а також встановити основні швидкісні залежності, що характеризують процес обкату.

4. Шліфування здійснюється дисковим кругом, який встановлюється в консольну оправку з виносним шпинделем. Дія сил різання на круг, спричинятиме пружну деформацію оправки, що в свою чергу впливатиме на точність формоутворення. Виникає необхідність провести моделювання процесу обробки з урахуванням силових факторів, та виконати прогнозування імовірної похибки профілю цівкового колеса, як результату пружних деформацій консольної оправки.

1.4 Постановка мети та задачі дослідження

Враховуючи специфіку роботи та конструктивні особливості зачеплення ГП, його ефективне та довговічне функціонування вимагає точного і якісного виготовлення профільних робочих поверхонь коліс. Виходячи з цього, актуально зосередитись на точних методах фінішної обробки. Особливо актуальне питання якісної обробки для цівкового колеса, конфігурація якого накладає технологічні обмеження на різноманіття технологічних рухів, розміри, та конструктивне виконання інструментів. Аналіз існуючих методів обробки профілю цівкового колеса показує, що всі без виключення мають суттєві недоліки, які перешкоджають їх широкому впровадженню у виробництво. Проведений аналіз дозволив обрати найбільш прогресивний метод. Інформація щодо забезпечуваних цим методом показників точності та шорсткості відсутня. Також залишаються відкритими питання, присвячені вибору раціональних конструктивних параметрів при проектуванні зачеплення, та синтезу кривих, що окреслюють профілі коліс. Отже 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.

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 перспективних концепцій зубообробного обладнання та інструментів.

РОЗДІЛ 2

ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ УВІГНУТОЇ ДІЛЯНКИ ЕКВІДИСТАНТИ ДО ЕПІЦИКЛОЇДИ В ЯКОСТІ ФОРМОТВОРНОГО ПРОФІЛЮ ІНСТРУМЕНТУ

2.1 Визначення умов існування кривих, що окреслюють робочі профілі коліс героторної пари

Відповідно до поставлених задач, в даному підрозділі представлено вирішення таких актуальних питань:

- визначення умов існування еквідистанти до епіциклоїди в придатному для застосування вигляді, без порушень геометрії;
- розв'язання задачі формоутворення обвідної сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд, визначення умов її існування у вигляді єдиної і неперервної кривої.

Одним із можливих дефектів еквідистантного профілю є поява так званих «вироджених ділянок», що обумовлено некоректними значеннями вхідних конструктивних параметрів. На рис. 2.1 показані приклади нормальної еквідистанти до вкороченої епіциклоїди (а) та з виродженими ділянками (б). Очевидно, що вкорочена епіциклоїда має певний мінімальний радіус кривизни. Якщо параметр r_u перевищує його значення, на профілі з'являться «вироджені ділянки», в яких порушуються умови гладкості кривої. У вказаних точках радіус кривизни змінює знак на протилежний.

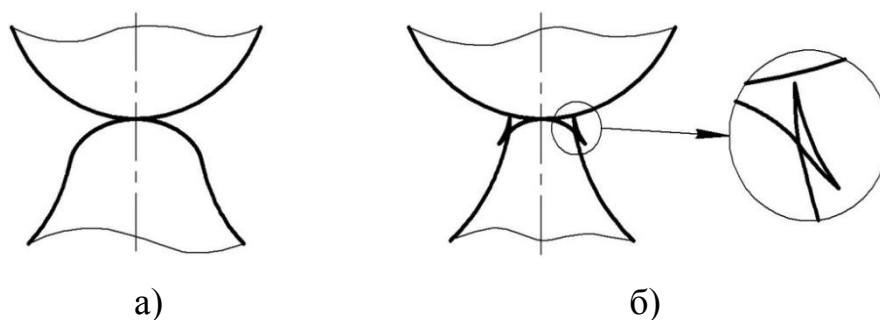


Рисунок 2.1 Еквідистанта до вкороченої епіциклоїди без дефектів (а),
і крива з «виродженими ділянками» (б)

Проаналізуємо радіус кривизни в точках вкороченої епіциклоїди в межах $0 \leq \varphi \leq 2\pi \cdot z_2/z_1$. Використовуючи відому формулу для радіуса кривизни плоскої кривої [15, 16], можемо записати (допускаємо від'ємні значення):

$$\rho(\varphi) = \frac{\left(\left(\frac{dx}{d\varphi} \right)^2 - \left(\frac{dy}{d\varphi} \right)^2 \right)^{\frac{3}{2}}}{\frac{dx}{d\varphi} \cdot \frac{d^2y}{d\varphi^2} - \frac{d^2x}{d\varphi^2} \cdot \frac{dy}{d\varphi}} = \frac{e \left(R_2^2 + R_{у.у.}^2 - 2 \cdot R_2 \cdot R_{у.у.} \cdot \cos \left(\frac{z_1}{z_2} \varphi \right) \right)^{\frac{3}{2}}}{R_{у.у.}^2 \cdot e + R_2^3 - R_2 \cdot R_{у.у.} \cdot (R_2 + e) \cdot \cos \left(\frac{z_1}{z_2} \varphi \right)}. \quad (2.1)$$

Виконавши необхідні перетворення, дістаємо формулу для обчислення радіуса кривизни еквідистанти до епіциклоїди:

$$\rho_{екв.}(\varphi) = \rho(\varphi) - r_{у.} \quad (2.2)$$

На основі формул (2.1) і (2.2) побудовані типові залежності ρ від кутового параметру φ (для проміжку $0 \leq \varphi \leq 2\pi \cdot z_2/z_1$), які представлені на рис. 2.2.

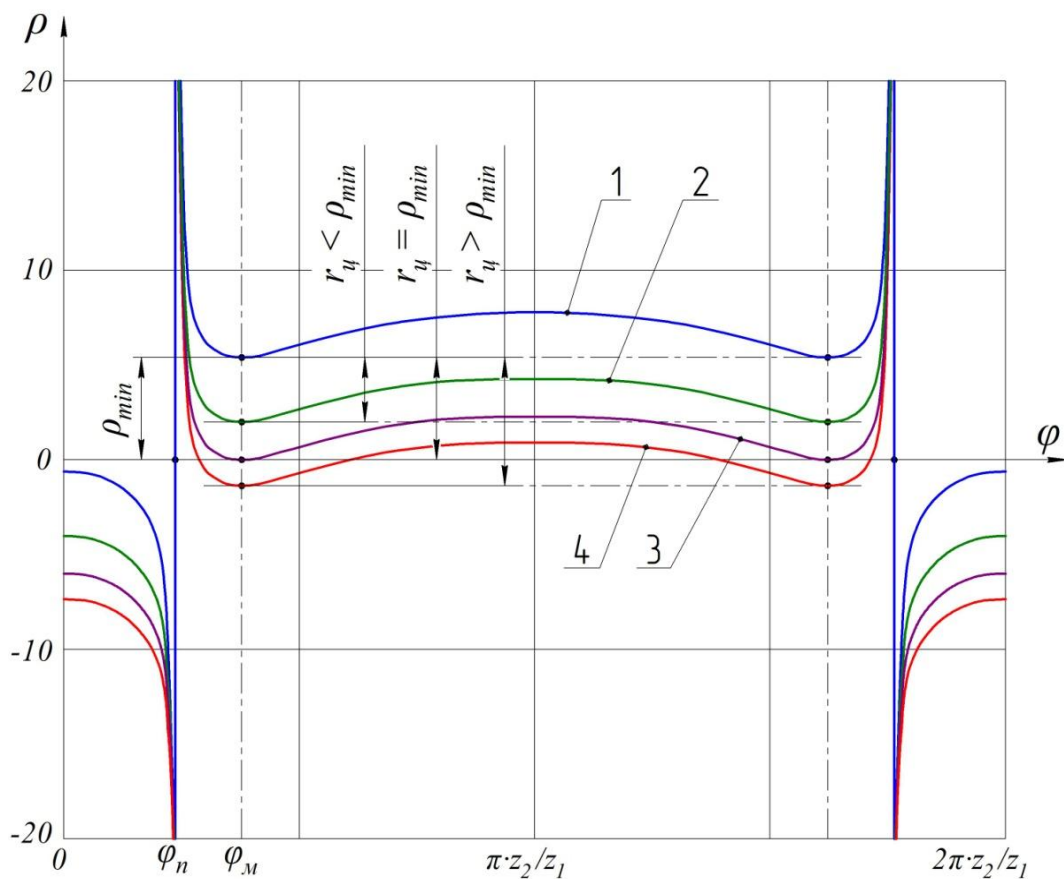


Рисунок 2.2 Графіки залежності радіуса кривизни вкороченої епіциклоїди та її еквідистант від кутового параметру φ

1 – графік, що відповідає $r_{у.} = 0$; 2 – $0 < r_{у.} < \rho_{min}$; 3 – $r_{у.} = \rho_{min}$; 4 – $r_{у.} > \rho_{min}$

При $r_y = 0$ (крива 1) розглядаємо кривизну вкороченої епіциклоїди. Як видно з графіка, епіциклоїда на досліджуваному проміжку $2\pi \cdot z_2/z_1$ має дві симетрично розташовані точки перегину (ліву позначено через φ_n), де радіус кривизни прямує до нескінченності, змінюючи знак з «-» на «+», та дві точки з мінімальним радіусом кривизни ρ_{min} (ліву позначено через φ_m). На проміжку $0 < r_y < \rho_{min}$ (крива 2) розглядаємо кривизну робочого профілю сателіта. Очевидно, що кутові параметри φ_n і φ_m , які відповідають особливим точкам, залишаються однаковими як для епіциклоїди, так і для її еквідистанти. Збільшення значення r_y веде за собою зменшення радіусу кривизни профілю сателіту. Якщо $r_y = \rho_{min}$ (крива 3), радіус кривизни профілю в точці, що відповідає φ_m , дорівнює 0. В цьому випадку графік дотикається до вісі φ в точці, яка відповідає φ_m . Якщо прийняти $r_y > \rho_{min}$ (крива 4), графік перетне вісь φ і на профілі з'являться «вироджені ділянки».

Знайдемо значення величин φ_n , φ_m і ρ_{min} . Прирівнявши знаменник функції (2.1) до нуля, дістаємо формулу для визначення точки перегину:

$$\varphi_n = \frac{z_2}{z_1} \cdot \arccos \left[\frac{R_2^3 + R_{y.ц.}^2 \cdot e}{R_2 \cdot R_{y.ц.} \cdot (R_2 + e)} \right]. \quad (2.3)$$

Дослідивши функцію (2.1) на точки екстремуму, отримуємо:

$$\varphi_m = \frac{z_2}{z_1} \cdot \arccos \left[\frac{R_{y.ц.}^2 \cdot (2 \cdot e - R_2) + R_2^2 \cdot (2 \cdot R_2 - e)}{R_2 \cdot R_{y.ц.} \cdot (R_2 + e)} \right], \quad \rho_{min} = \rho(\varphi_m). \quad (2.4)$$

Умова відсутності «вироджених ділянок» на еквідистанті може бути представлена у вигляді (дотримання цієї умови усуває наявність точок, в яких радіус кривизни еквідистанти змінює знак):

$$\frac{e \left(R_2^2 + R_{y.ц.}^2 - 2 \cdot R_2 \cdot R_{y.ц.} \cdot \cos \left(\frac{z_1}{z_2} \varphi_m \right) \right)^{\frac{3}{2}}}{R_{y.ц.}^2 \cdot e + R_2^3 - R_2 \cdot R_{y.ц.} \cdot (R_2 + e) \cdot \cos \left(\frac{z_1}{z_2} \varphi_m \right)} > r_y. \quad (2.5)$$

При проектуванні ГП можливо обрати необхідне значення r_u , яке лежить в діапазоні від 0 до ρ_{min} . Дотримання цієї умови забезпечить цілісність і плавність переходів еквідистантної кривої, плавний обкат та постійність контакту в точках спряження профілів в зачепленні. Наявність загострених «вироджених ділянок» матиме негативний вплив на експлуатаційні характеристики зачеплення ГП, а саме – спричинити інтенсивний знос в зоні загострення та мінімальної кривизни. Порушення гладкості кривої також ускладнює процес виготовлення колеса обкатним інструментом.

Як зазначалось в п. 1.1, великого практичного застосування набули циклоїдальні передачі внутрішнього зачеплення, в яких профіль цівкового колеса задається у вигляді спряженої обвідної сімейства положень еквідистанти до вкороченої епіциклоїди. Синтез цієї кривої відрізняється великою трудомісткістю, навіть за умови використання сучасних CAD-систем. Більш раціональним буде аналітичний опис кривої системою параметричних рівнянь. Складність полягає в тому, що необхідно описати єдиними рівняннями $X(\varphi)$ і $Y(\varphi)$ профіль, який містить в собі дуги постійного радіусу r_u , спряжені з ділянками еквідистанти до епіциклоїди, які формують міжцівкові западини.

Для більш детального розуміння процесу побудови цілісного профілю цівкового колеса складемо розрахункову схему і введемо позначення (рис. 2.3) Маємо дві системи координат – інерціальну $(X; Y)$, яка пов'язана з нерухомим цівковим колесом, та рухому $(\xi; \eta)$, пов'язану із сателітом. Саме в інерціальній системі координат буде визначатись обвідна. Вхідними параметрами для вирішення поставленої задачі є число зубців коліс z_1 і z_2 , ексцентриситет зачеплення e , радіус центрів цівок $R_{ц.ц.}$, радіус цівки r_u . Профіль сателіту здійснює планетарний рух, утворюючи множину власних положень. Аналогічний рух здійснює пов'язана з ним епіциклоїда і рухома система координат. В початковому положенні полюс зачеплення центроїд R_1 і R_2 відповідає точці p_1 . Далі центроїда R_1 починає рух кочення по внутрішній стороні центроїди R_2 , а її центр переміщується по колу з центром O і

радіусом e . Коли центр O_1 опиниться в положенні O_2 , а полюс зачеплення відповідатиме точці p_2 , рухома система координат переміститься по колу на кут t і повернеться відносно початкового положення на кут t/z_1 .

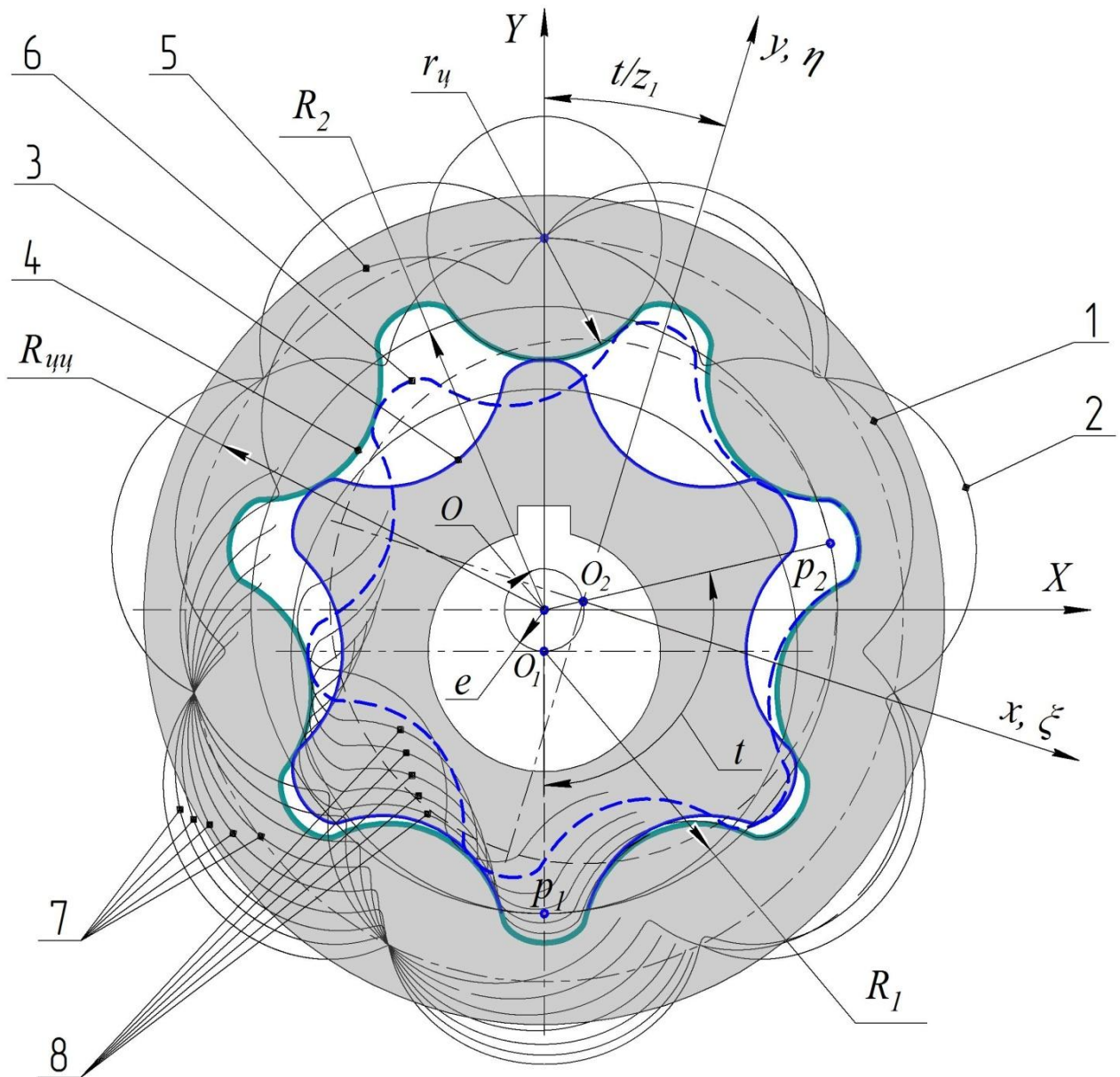


Рис. 2.3 Розрахункова схема для визначення профілю цівкового колеса як неперервної обвідної сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд

1 – вкорочена епіциклоїда в початковому положенні; 2 – обвідна сімейства вкорочених епіциклоїд; 3 – еквідистанта до вкороченої епіциклоїди в початковому положенні; 4 – обвідна сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд; 5, 6 – положення епіциклоїди і її еквідистанти, що відповідає куту t ; 7, 8 – сімейства вкорочених епіциклоїд і їх еквідистант

Координати вкороченої епіциклоїди, що змістилась на кут t і здійснила поворот на кут t/z_1 , в інерціальній системі координат будуть мати вигляд:

$$X(\varphi; t) = x(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{t}{z_1}\right) + y(\varphi) \cdot \sin\left(\frac{t}{z_1}\right) + e \cdot \cos t, \quad (2.6)$$

$$Y(\varphi; t) = y(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{t}{z_1}\right) - x(\varphi) \cdot \sin\left(\frac{t}{z_1}\right) + e \cdot \sin t. \quad (2.7)$$

Оскільки кожному конкретному значенню t відповідає певне положення рухомої системи координат та пов'язаних з нею кривих, цей кут можна трактувати як параметр сімейства кривих, відносно яких будуватиметься обвідна. Кожна з епіциклоїд сімейства має одну точку, яка одночасно належить обвідній. З теорії формоутворення умова існування обвідної базується на відомій теоремі яка стверджує, що точки обвідної належать множині, в якій дискримінанта сімейства кривих дорівнює нулеві [10, 27, 44, 89, 90, 113]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} \cdot \frac{\partial Y}{\partial \varphi} - \frac{\partial X}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial Y}{\partial t} = 0. \quad (2.8)$$

Знаходимо частинні похідні за параметрами φ і t :

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -\frac{1}{z_1} \cdot x(\varphi) \cdot \sin\left(\frac{t}{z_1}\right) + \frac{1}{z_1} \cdot y(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{t}{z_1}\right) - e \cdot \sin t, \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial X}{\partial \varphi} = \frac{dx}{d\varphi} \cdot \cos\left(\frac{t}{z_1}\right) + \frac{dy}{d\varphi} \cdot \sin\left(\frac{t}{z_1}\right), \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = -\frac{1}{z_1} \cdot y(\varphi) \cdot \sin\left(\frac{t}{z_1}\right) - \frac{1}{z_1} \cdot x(\varphi) \cdot \cos\left(\frac{t}{z_1}\right) + e \cdot \cos t, \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial \varphi} = \frac{dy}{d\varphi} \cdot \cos\left(\frac{t}{z_1}\right) - \frac{dx}{d\varphi} \cdot \sin\left(\frac{t}{z_1}\right). \quad (2.12)$$

Підставляючи знайдені похідні у рівняння (2.8) і виконавши спрощення, отримуємо наступну рівність:

$$\frac{dy}{d\varphi} \cdot \sin\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right) + \frac{dx}{d\varphi} \cdot \cos\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right) - \frac{R_{y.u.}}{z_2} \cdot \sin\left(\frac{\varphi \cdot z_2}{z_1}\right) = 0. \quad (2.13)$$

Отриманий вираз являє собою неявно задану функцію виду $f(\varphi; t) = 0$, яку необхідно привести до вигляду $t = f(\varphi)$. Розв'яжемо рівняння (2.13) відносно t .

Розділивши його на $\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}$ (так як вкорочена епіциклоїда не

має кутових точок, то $(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2 \neq 0$), отримуємо:

$$\frac{\frac{dy}{d\varphi} \cdot \sin\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right) - \frac{dx}{d\varphi} \cdot \cos\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right)}{\sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2}} = \frac{R_{u.u.} \cdot \sin\left(\frac{\varphi \cdot z_2}{z_1}\right)}{z_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2}}. \quad (2.14)$$

Введемо додаткову функцію $\beta(\varphi)$, яка задовольняє умовам:

$$\begin{cases} \cos(\beta(\varphi)) = \frac{dy/d\varphi}{\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}} \\ \sin(\beta(\varphi)) = \frac{dx/d\varphi}{\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}} \\ \operatorname{tg}(\beta(\varphi)) = \frac{dx/d\varphi}{dy/d\varphi} \end{cases}. \quad (2.15)$$

Підставляючи $\beta(\varphi)$ у вираз (2.14), маємо рівність:

$$\cos(\beta(\varphi)) \cdot \sin\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right) + \sin(\beta(\varphi)) \cdot \cos\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1}\right) = \frac{R_{u.u.} \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{z_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2}}, \quad (2.16)$$

а після перетворення:

$$\sin\left(\frac{t \cdot z_2}{z_1} + \beta(\varphi)\right) = \frac{R_{u.u.} \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{z_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2}}. \quad (2.17)$$

Звідси знаходимо t :

$$t(\varphi) = \frac{z_1}{z_2} \cdot \left(\arcsin\left(\frac{R_{u.u.} \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{z_2 \cdot \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2}} \right) - \beta(\varphi) \right). \quad (2.18)$$

Визначимо тепер більш чітко функцію $\beta(\varphi)$. Відмітимо, що у відповідності з умовою (2.15), величина β визначає кут між нормаллю вкороченої епіциклоїди і додатним напрямом вісі абсцис. В якості $\beta(\varphi)$ не можна брати один з формальних розв'язків одного з рівнянь (2.15). На рис.2.4

показані графіки окремих функцій (2.15). У всіх випадках відмічаємо порушення неперервності і гладкості окремо взятих функцій.

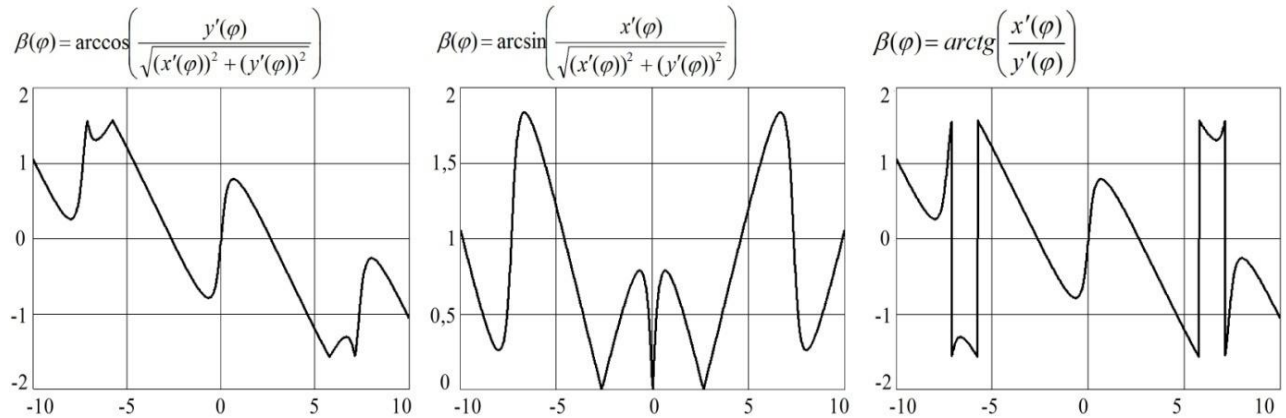


Рис. 2.4. Функція $\beta(\varphi)$ при різних вихідних співвідношеннях

Функція $\beta(\varphi)$ може бути отримана методом підбору коефіцієнтів. Для цього виписуємо всі розв'язки, наприклад, 3-го рівняння (2.15):

$$\beta(\varphi) = \operatorname{arctg}\left(\frac{dx/d\varphi}{dy/d\varphi}\right) - \pi \cdot k, \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (2.19)$$

Значення коефіцієнту k необхідно підбирати так, щоб функція $\beta(\varphi)$ залишалася неперервною і виконувалися два перших рівняння (2.15). Для цього задаються граничні умови:

$$k = \begin{cases} 0, & \text{якщо } dx/d\varphi \geq 0, dy/d\varphi \geq 0; \\ 0, & \text{якщо } dx/d\varphi \geq 0, dy/d\varphi \leq 0; \\ 1, & \text{якщо } dx/d\varphi \leq 0, dy/d\varphi \geq 0; \\ 1, & \text{якщо } dx/d\varphi \leq 0, dy/d\varphi \leq 0; \\ 2, & \text{якщо } dx/d\varphi \geq 0, dy/d\varphi \geq 0, \varphi \geq \pi \cdot z_2; \\ 2, & \text{якщо } dx/d\varphi \geq 0, dy/d\varphi \leq 0, \varphi \geq \pi \cdot z_2; \\ 3, & \text{якщо } dx/d\varphi \leq 0, dy/d\varphi \geq 0, \varphi \geq 2\pi \cdot z_2; \\ 3, & \text{якщо } dx/d\varphi \leq 0, dy/d\varphi \leq 0, \varphi \geq 2\pi \cdot z_2. \end{cases} \quad (2.20)$$

Даний підхід є досить складним, оскільки виникає необхідність відстежувати тенденцію зміни знаків похідних $dx/d\varphi$ і $dy/d\varphi$. Коефіцієнти від 0 до 3 визначаються саме з міркувань неперервності. Графік при цьому не має різких переходів, зберігаються умови гладкості (див. рис. 2.5, а).

Наступний, більш раціональний варіант визначення $\beta(\varphi)$, оснований на

перетворенні за допомогою відомої формули додавання для тангенсу [12, 97]:

$$\operatorname{tg}(x+y) = \frac{\operatorname{tg}x + \operatorname{tg}y}{1 - \operatorname{tg}x \cdot \operatorname{tg}y}. \quad (2.21)$$

Підставляючи третій розв'язок (2.15) в формулу (2.21), можемо записати:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\left(\beta(\varphi) + \frac{\varphi}{z_2}\right) &= \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{dx/d\varphi}{dy/d\varphi}\right) + \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{z_2}\right)}{1 - \operatorname{tg}\left(\frac{dx/d\varphi}{dy/d\varphi}\right) \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{z_2}\right)} = \frac{\frac{-R_{u.u.} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{z_2}\right) + R_2 \cdot \sin(\varphi)}{R_{u.u.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right) - R_2 \cdot \cos(\varphi)} + \frac{\sin\left(\frac{\varphi}{z_2}\right)}{\cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right)}}{1 - \frac{-R_{u.u.} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{z_2}\right) + R_2 \cdot \sin(\varphi)}{R_{u.u.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right) - R_2 \cdot \cos(\varphi)} \cdot \frac{\sin\left(\frac{\varphi}{z_2}\right)}{\cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right)}} = \\ &= \frac{R_2 \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{R_{u.u.} \cdot \cos\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)^2 - R_2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right) \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right)} = \frac{R_2 \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{R_{u.u.} - R_2 \cdot \cos\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Тоді шукану функцію $\beta(\varphi)$ можна представити у вигляді:

$$\beta(\varphi) = \operatorname{arctg} \left(\frac{R_2 \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{R_{u.u.} - R_2 \cdot \cos\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)} \right) - \frac{\varphi}{z_2}. \quad (2.23)$$

Графік отриманої функції (2.23) аналогічний графіку функції (2.19) і має вигляд плавно спадаючої кривої синусоїдальної форми (див. рис. 2.5, б) без порушень геометрії. Так як $R_{u.u.} > R_2$, то при будь-якому φ знаменник правої частини (2.23) відмінний від нуля. Звідси випливає, що аргумент тангенса не виходить за межі інтервалу $(-\pi/2; \pi/2)$ і функція $\beta(\varphi)$, яка визначається за формулою (2.23), є неперервною. Відмітимо, що знайдена функція $\beta(\varphi)$ містить лінійну складову $-\varphi/z_2$. Значення самої функції коливаються відносно цієї складової із симетричною амплітудою.

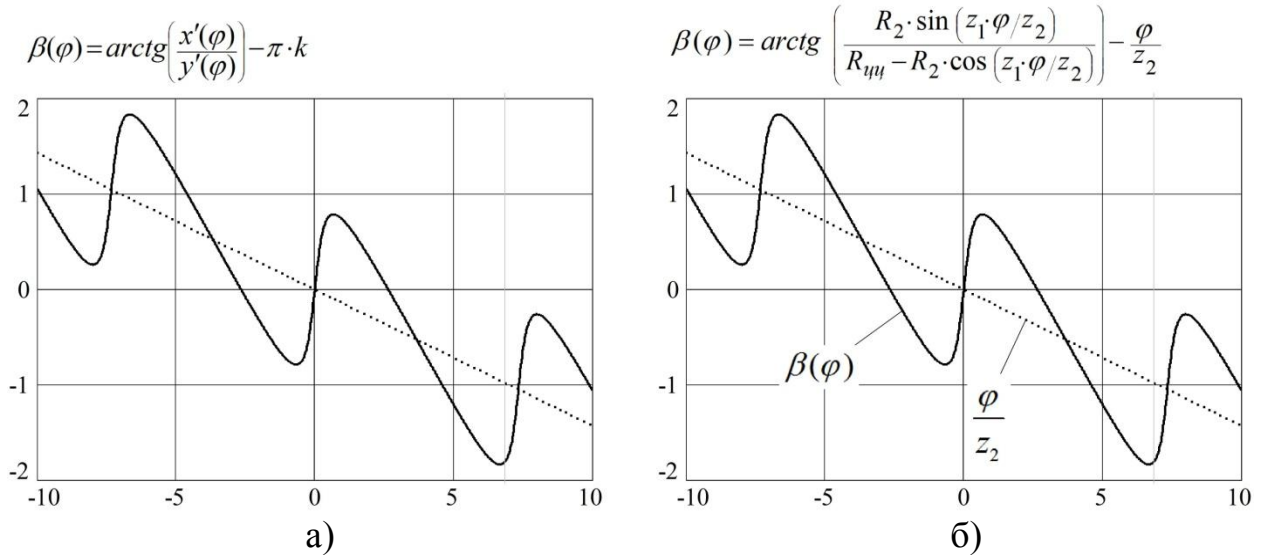


Рис. 2.5 Функція $\beta(\varphi)$ без порушень геометрії отримана шляхом підбору коефіцієнтів (а) і в результаті перетворення (б)

Підставивши відповідні вирази у формулу (2.18) і виконавши перетворення, маємо зв'язок φ і t :

$$t(\varphi) = \frac{z_1}{z_2} \cdot \left(\operatorname{arcsin} \left(\frac{R_{y.u.} \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{\sqrt{R_{y.u.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{y.u.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}} \right) - \operatorname{arctg} \left(\frac{R_2 \cdot \sin\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)}{R_{y.u.} - R_2 \cdot \cos\left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2}\right)} \right) - \frac{\varphi}{z_2} \right). \quad (2.24)$$

Підставляючи значення $x(\varphi)$ і $y(\varphi)$ в рівняння (2.6) (2.7), використовуючи залежність $t(\varphi)$, обвідна сімейства вкорочених епіциклоїд виражається наступними рівняннями:

$$X_{e.e.}(\varphi) = e \cdot \cos(t(\varphi)) + R_{y.u.} \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) - e \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right), \quad (2.25)$$

$$Y_{e.e.}(\varphi) = e \cdot \sin(t(\varphi)) - R_{y.u.} \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) + e \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right). \quad (2.26)$$

Перехід до обвідної сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд здійснюється шляхом підстановки $\xi(\varphi)$ і $\eta(\varphi)$ в рівняння (2.6) (2.7), замість

$x(\varphi)$, $y(\varphi)$. Після підстановки та перетворення маємо рівняння, що описують обвідну сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд:

$$X_{у.к.}(\varphi) = e \cdot \cos(t(\varphi)) + R_{у.у.} \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) - e \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right) - \frac{r_{у.} \cdot \left(R_{у.у.} \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) - R_2 \cdot \cos\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right) \right)}{\sqrt{R_2^2 + R_{у.у.}^2 - 2 \cdot R_2 \cdot R_{у.у.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}, \quad (2.27)$$

$$Y_{у.к.}(\varphi) = e \cdot \sin(t(\varphi)) - R_{у.у.} \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) + e \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right) + \frac{r_{у.} \cdot \left(R_{у.у.} \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \frac{\varphi}{z_2}\right) - R_2 \cdot \sin\left(\frac{t(\varphi)}{z_1} - \varphi\right) \right)}{\sqrt{R_2^2 + R_{у.у.}^2 - 2 \cdot R_2 \cdot R_{у.у.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}. \quad (2.28)$$

Область визначення аргументу φ для побудови повного профілю цівкового колеса буде виражатись інтервалом:

$$\varphi \in \left[0; 2\pi \cdot \frac{z_2^2}{z_1} \right]. \quad (2.29)$$

Приклади побудови сімейств вкорочених епіциклоїд та їх еквідистант на основі отриманих рівнянь, а також їх обвідних, приведені на рис. 2.6. Ділянки западини і ділянки дуг постійного радіусу окреслено у вигляді єдиної неперервної кривої, що описується рівняннями (2.27) і (2.28). Детальний аналіз побудованих спряжених профілів ГП за отриманими формулами показав відсутність інтерференції в точках контакту, що підтверджує правильність синтезу зачеплення. Таким чином можна зробити висновок про придатність формул (2.24), (2.27) і (2.28) для практичного використання в інженерних розрахунках або при розробці спеціального програмного забезпечення для автоматизованої побудови зачеплення ГП із заданими параметрами.

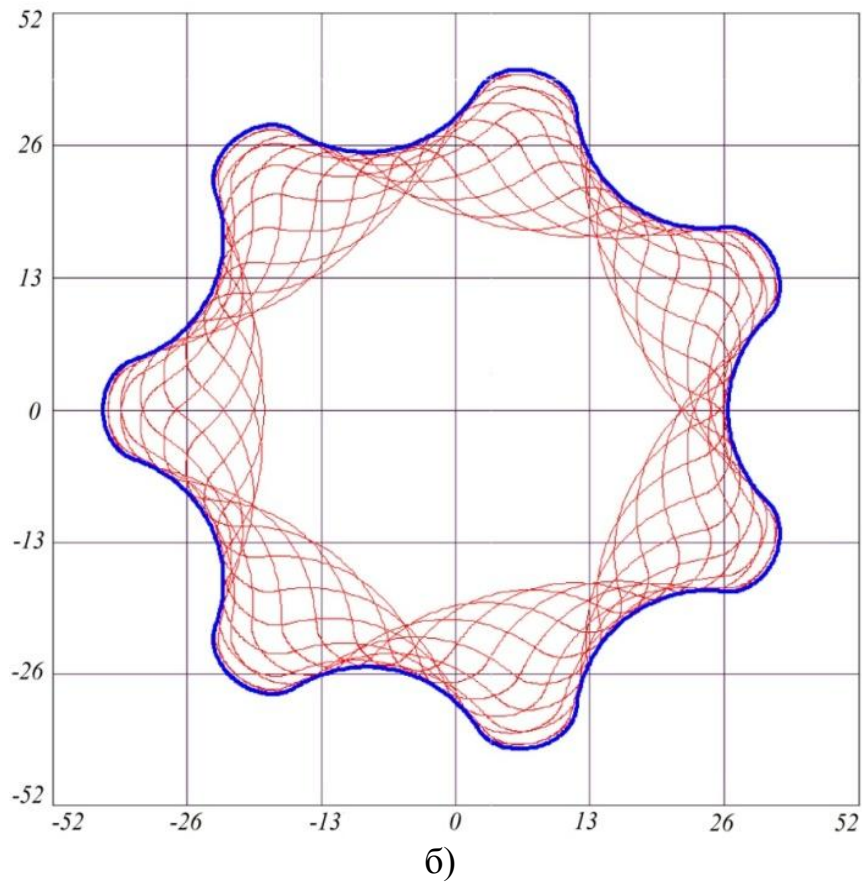
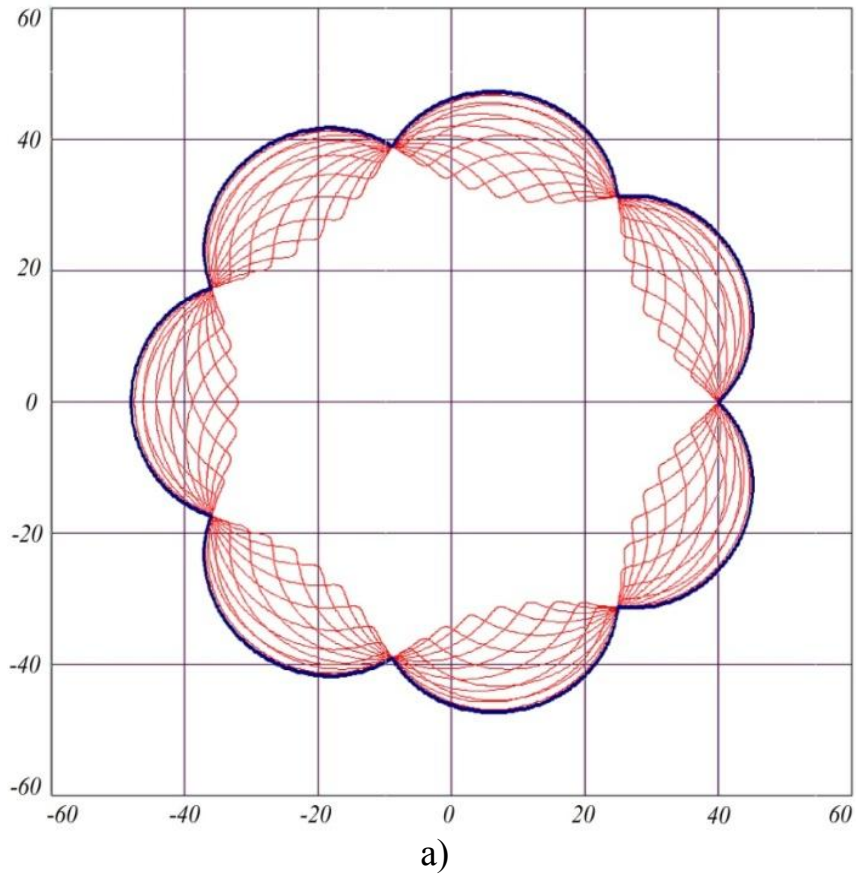


Рис. 2.6 Сімейства вкорочених епіциклоїд (а), та сімейство еквідистант до вкорочених епіциклоїд (б) і їх обвідні

Профілі коліс ГП із різними співвідношеннями z_1/z_2 придатні для створення діючого зачеплення, приведено на рис. 2.7.

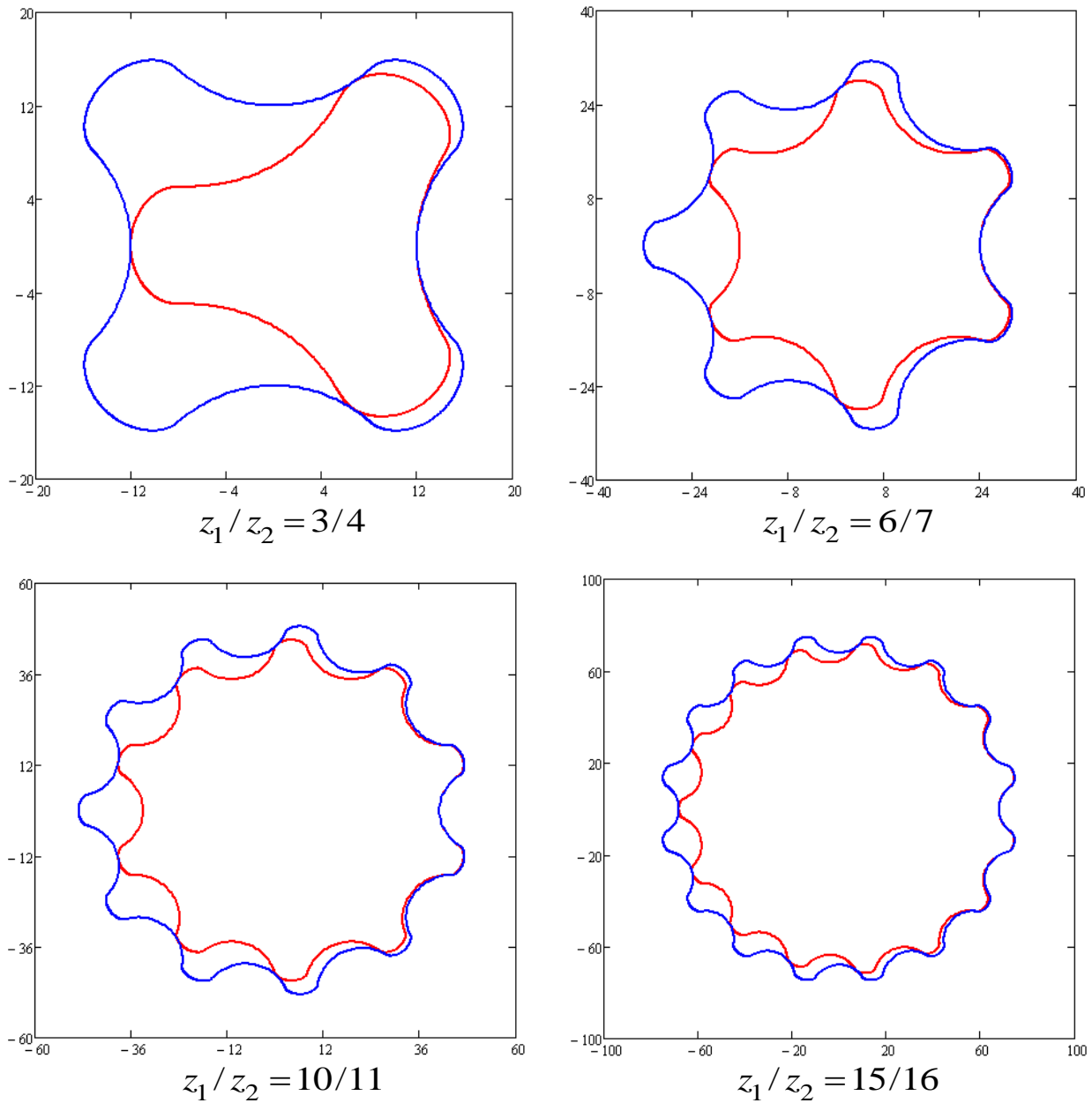


Рис. 2.7 Профілі коліс ГП при різних співвідношеннях z_1/z_2

В приведеному дослідженні за основу взята вкорочена епіциклоїда, але можливо використання і інших кривих (наприклад, вкорочених гіпоциклоїд, колових синусоїд і т.д.) з послідуочим розв'язком для зовнішніх або внутрішніх обвідних. Не виключається можливість синтезу зачеплень, в яких різниця зубців більша за 1, при проектуванні циклоїдальних редукторів або зуборізних обкатних інструментів для виготовлення коліс ГП.

2.2 Застосування увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди в якості форматворного 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. Натомість взаємодія опуклого і увігнутого профілю характеризується значно більшими довжинами задіяних в роботі ділянок і меншими значеннями висот мікронерівностей. Для зменшення висоти мікронерівностей під час шліфування згідно базового методу, на рівні з ОДЕЕ пропонується застосувати для профілювання інструменту увігнуту ділянку еквідистанти до епіциклоїди (УДЕЕ). Дане технічне рішення дозволяє досягти кращих показників точності і шорсткості обробки, за рахунок можливості диференціації процесу обробки на чорнове і чистове шліфування. Чорнове шліфування здійснюється інструментом з профілем на основі ОДЕЕ, а для чистового застосовується профіль на основі УДЕЕ. Теоретично краща шорсткість досягатиметься за рахунок більшої довжини задіяного в роботі профілю УДЕЕ, який охоплює дугу цівки і має кривизну того ж знаку. На метод шліфування, який передбачає комбіновану обробку цівкових коліс інструментами з профілями на основі ОДЕЕ і УДЕЕ, було отримано патент України [78] (додаток А). На рис. 2.8 представлена схема шліфування цівкового колеса дисковим шліфувальним кругом з профілем на основі УДЕЕ.

Але профіль на основі УДЕЕ має низку недоліків:

- в граничних точках профілю T_1 і T_2 утворюються гострі кромки, які схильні до сколювання і руйнування;
- ширина УДЕЕ перевищує ширину ОДЕЕ в 1,5-3 рази (для різних конструктивних параметрів коліс це число може змінюватись), що вимагає додаткового простору для розміщення конструктивних елементів оснащення та його вільного проходження крізь порожнину колеса;

- велика довжина задіяної в роботі ділянки УДЕЕ, що може стати причиною виникнення значних зусиль і як наслідок спричинити зниження точності обробки.

Шляхи усунення наведених недоліків:

- введення додаткових конструктивних елементів для усунення гострих кромek (наприклад, округлень);
- виведення оправки з інструментом з порожнини колеса в періоди інтерференції елементів оправки і профілю деталі;
- мінімізація припуску, зменшення швидкості обкату.

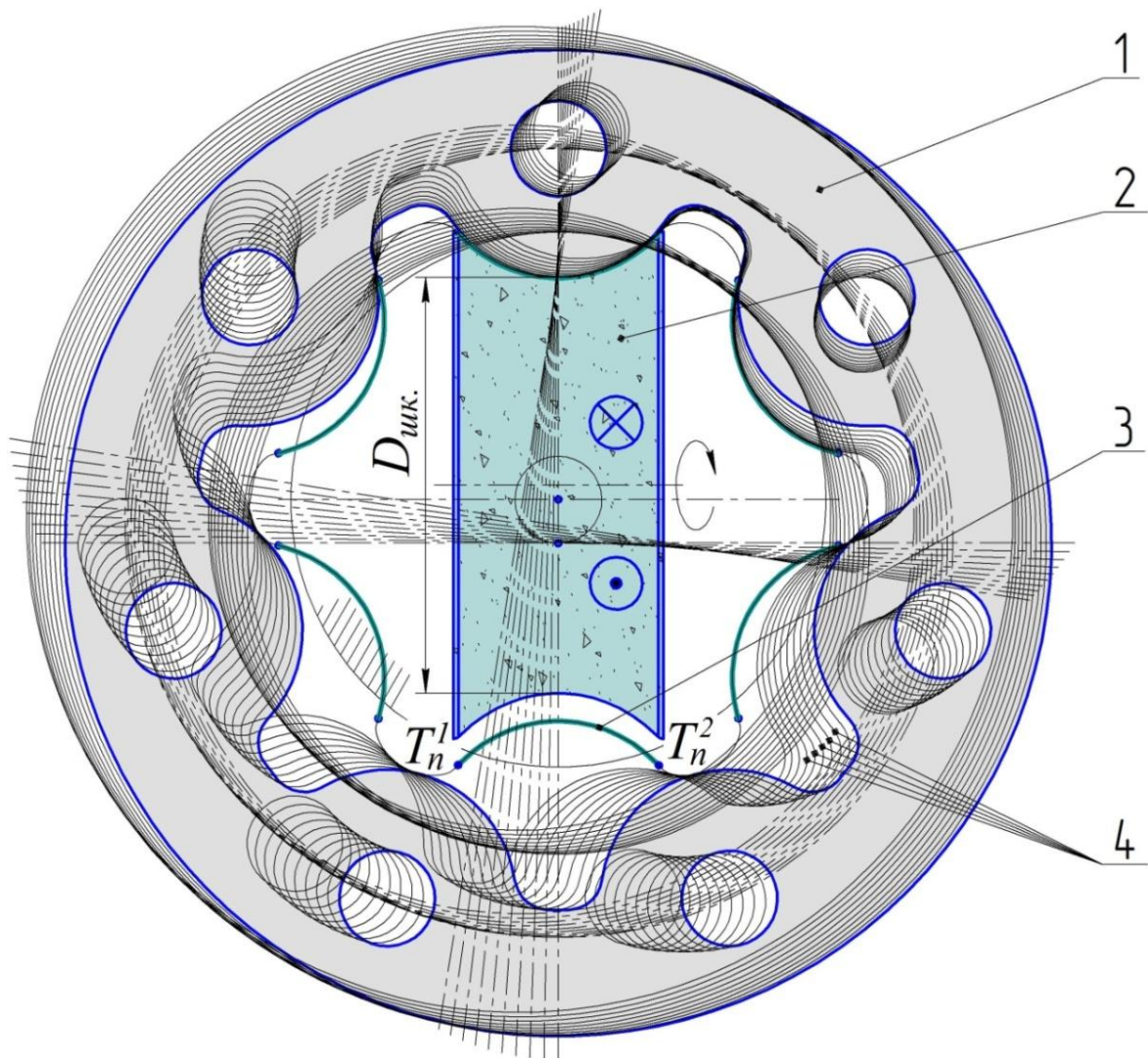


Рис. 2.8 Схема шліфування профілю цівкового колеса в умовах обкату дисковим кругом, формотворний профіль якого окреслено УДЕЕ

1 – цівкове колесо; 2 – шліфувальний круг; 3 – увігнута ділянка $T_n^1 - T_n^2$ еквідистанти до вкороченої епіциклоїди (УДЕЕ); 4 – положення цівкового колеса в процесі обкату;
 $D_{шк.}$ – діаметр круга

Застосування УДЕЕ характеризується розривом контакту інструмента із профілем колеса. Як видно зі схеми рис. 2.8, ділянка $T_n^1 - T_n^2$ не контактує із колесом, в той час як опуклі ділянки завжди знаходяться в контакті з цівками, незалежно від фази обкату. Процес шліфування кругом з профілем на основі УДЕЕ має періоди контактного і безконтактного обкату. Період безконтактного обкату можливо зменшити шляхом збільшення швидкості обкату, що дозволить скоротити час на обробку. Період безконтактного обкату можна використовувати для виведення оправки з порожнини колеса в моменти інтерференції, уникаючи зіткнення. Застосування УДЕЕ також має позитивну особливість, яка дозволяє підвищити продуктивність процесу обробки в 2 рази – якщо прийняти діаметр круга $D_{ш.к.}$ рівним діаметру западин сателіта, то інструмент здійснюватиме обробку по обидві сторони. Це вимагає збереження постійності діаметра круга і відповідно – його високої стійкості. Також реалізація цієї властивості можлива за умови, якщо z_1 – парне число. Подальші дослідження методу шліфування цівкового колеса доцільно здійснювати диференційовано, для обробки інструментами з опуклою та увігнутою формою профілю, порівнюючи отримані результати.

Застосування УДЕЕ також матиме позитивний вплив на стійкість інструменту. Як відомо, гострі кути або місця з малою кривизною, які можуть мати місце на профілях абразивних інструментів, найбільш схильні до сколювання і руйнування. Профілі зі стабільною і плавною геометрією здатні довгий час працювати без помітної зміни форми. Для методу шліфування цівкового колеса, здатність інструмента довгий час зберігати геометричну форму є одним з ключових аспектів процесу формоутворення. Похибка профілю, котра виникла в результаті зносу, в процесі обкату пошириться на весь профіль колеса.

Розглянемо схематичну взаємодію профілів абразивних інструментів з цівкою, геометрія яких відповідає ОДЕЕ і УДЕЕ (рис. 2.9). Як вже відмічалось, опуклий профіль і дуга цівки мають кривизну різних знаків. Під час взаємодії

одиночного зерна із матеріалом, породжується сила різання P , яка розподіляється в шар сполучного компоненту. Дія розподілених сил породжує в товщі сполучного компоненту процеси тріщиноутворення, що в результаті призводить до викришування окремих зерен. За недостатньої міцності прилеглого до зерна шару сполучного компоненту, зростатиме імовірність тріщиноутворення. У порівнянні з ОДЕЕ, геометрія УДЕЕ забезпечує більш міцну структуру прилеглого до зерна шару сполучного компоненту (рис. 2.9, б). Розподілені сили тут направлені в товщу сполучного компоненту. Довжина лінії розколу (тріщини) при відокремленні зерна від тіла інструменту, для профілю на основі УДЕЕ буде завжди більша.

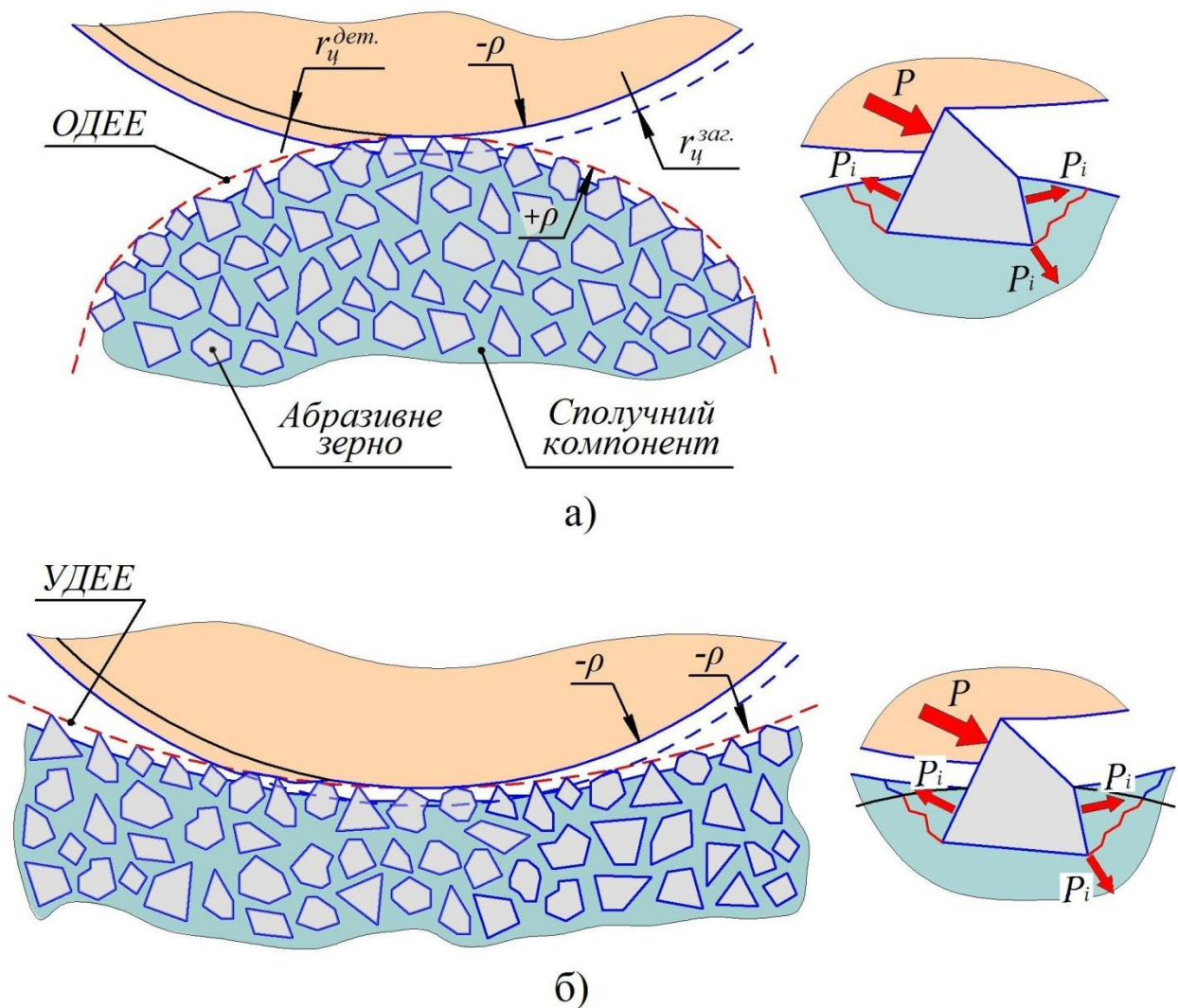


Рис. 2.9 Схема взаємодії абразивних інструментів з профілями на основі ОДЕЕ (а) і УДЕЕ (б) із профілем цівки, та схема дії сили різання на одиночне зерно інструмента

На основі проведеного аналізу можна висловити припущення, згідно якому профіль на основі УДЕЕ забезпечує меншу схильність до викришування і руйнування як окремих абразивних зерен, так і профілю в цілому. Виникає необхідність ввести поняття «геометричної стійкості», яка буде напряму пов'язана із геометричними особливостями різального профілю (кривизною, гострими кромками і т.д.). Результати аналізу стійкості окремого абразивного зерна для різних типів геометрії профілю, вказують на доцільність застосування УДЕЕ в якості формотворного профілю абразивного інструменту.

2.3 Вплив зміни форми профілю шліфувального круга на шорсткість шліфованих поверхонь цівкового колеса

Шорсткість, що забезпечується при шліфуванні цівкового колеса обкатом, можливо теоретично спрогнозувати, шляхом графічного моделювання верстатного зачеплення профілів інструмента і колеса. В даному випадку слід розрізняти шорсткість, що залежить від зернистості круга, і шорсткість, що забезпечується особливостями базового методу шліфування. Оскільки перший тип шорсткості регламентується стандартом (ISO 8486-1: 1996), де зазначені рекомендації по вибору зернистості для досягнення необхідної шорсткості поверхні, дослідженню підлягає другий тип шорсткості. Актуальним буде проаналізувати, як впливає форма профілю інструменту опукла-увігнута на шорсткість поверхні, та встановити характер розподілу висоти мікронерівностей уздовж шліфованої ділянки дуги цівки.

Схема моделювання утворення мікронерівностей представлена на рис. 2.10. Сутність моделювання зводиться до графічної побудови множини положень інструменту в різних фазах обкату з певною дискретністю. Значення дискретності відображає технологічні параметри обробки. Побудову достатньо виконати в межах половини довжини дуги цівки. Моделювання не враховує стійкість інструмента, його знос а також не враховує неточності, породжені пружними силами в системі ВПД.

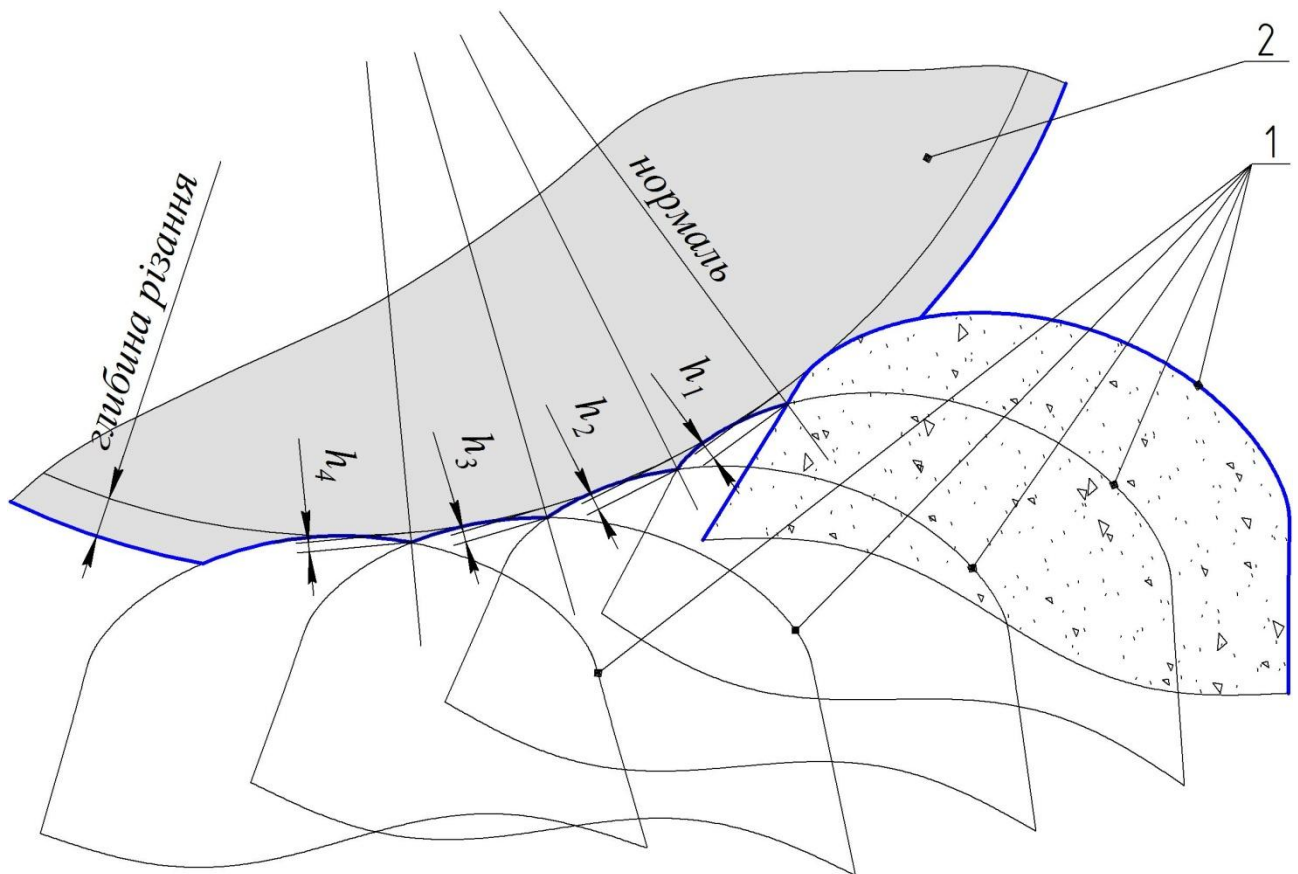


Рис. 2.10 Схема графічного моделювання утворення мікронерівностей при шліфуванні цівкового колеса в умовах обкату

1 – фрагмент цівки; 2 – положення інструменту в різних фазах обкату;
 $h_1 \dots h_5$ – висоти мікронерівностей у відповідних фазах обкату

Величину дискретності побудови визначаємо наступним чином. Для побудови повного замкненого контуру еквідистанти до епіциклоїди, область визначення аргументу визначатиметься як $\varphi \in [0; 2\pi \cdot z_2]$. Відповідно, щоб здійснити обкат однієї цівки, центроїда цівкового колеса має здійснити 1 оберт навколо нерухомої центроїди сателіту, що відповідатиме куту 2π (360°). В даному випадку значення кута 2π справедливе для ОДЄЄ. Сумарний кут обкату увігнутих ділянок, яких налічується z_1 , визначатиметься різницею повного кута обкату еквідистанти $2\pi \cdot z_2$ і кількості обкатів опуклих ділянок сателіту $2\pi \cdot z_1$, що відповідає куту 2π . Таким чином, для УДЄЄ значення кута обкату для однієї цівки визначатиметься відношенням $2\pi/z_1$. Тоді дискретність побудови множини положень $\delta\varphi_i$ задаватиметься як відношення кута повороту центроїди

цівкового колеса, необхідного для повного обкату дуги цівки відповідним профілем інструменту, до кількості врізань інструменту.

Моделювання проводилось в для 5-ти значень $\delta\varphi_i$ ($2,40^\circ$; $3,0^\circ$; $4,0^\circ$; $5,0^\circ$; $6,0^\circ$). Для ОДЄЄ ці значення відповідатимуть кількостям врізань на одну цівку – $360^\circ/2,4^\circ=150$; 120; 90; 72 і 60 відповідно. Приймавши параметри зачеплення $z_1/z_2 = 6/7$, для УДЄЄ – $360^\circ/6 \cdot 2,4^\circ=25$; 20; 15; 12; 10. При однаковій дискретності $\delta\varphi_i$, число врізань що приходить на УДЄЄ менше в 6 (z_1) разів, оскільки кути, а відповідно і періоди обкату для ОДЄЄ і УДЄЄ також відрізняються в z_1 разів. Виконавши побудови сімейств положень профілів у відповідності з приведеними співвідношеннями, було визначено висоти мікронерівностей як відстані уздовж нормалі до дуги цівки (від точки перетину дуги з нормаллю до точки перетину сусідніх положень інструменту в межах дискретності побудови). Після визначення усіх значень, побудовано графіки залежностей висоти мікронерівностей h від фази обкату для 5-ти значень $\delta\varphi_i$ (рис. 2.11). Побудову виконано в межах половини довжини активної ділянки дуги цівки, оскільки у другому півперіоді, графік має дзеркальне відображення. Слід додати, що в результаті взаємодії ОДЄЄ з цівкою, маємо чітко виражені гребінці шорсткості. Для УДЄЄ рельєф шліфованої поверхні має вигляд огранки з менш вираженим мікрорельєфом. Побудову виконано окремо для опуклої і увігнутої форми профілів.

Відмічаємо нерівномірний розподіл мікронерівностей, обумовлений кривизною профілів інструментів. Кожна із залежностей має пікове значення h_{max} . Для рис. 2.11, а, це значення відповідає області взаємодії дуги цівки з ділянкою профілю круга з мінімальним радіусом кривизни (див. п. 2.1). На рис. 2.11, б, пікове значення h_{max} припадає на центральносиметричну фазу. Графіки демонструють класичну залежність висоти мікронерівностей від зміни кількості врізань на одиницю довжини шліфованої поверхні. Збільшення $\delta\varphi_i$ супроводжується ростом h в будь-якій фазі обкату і навпаки.

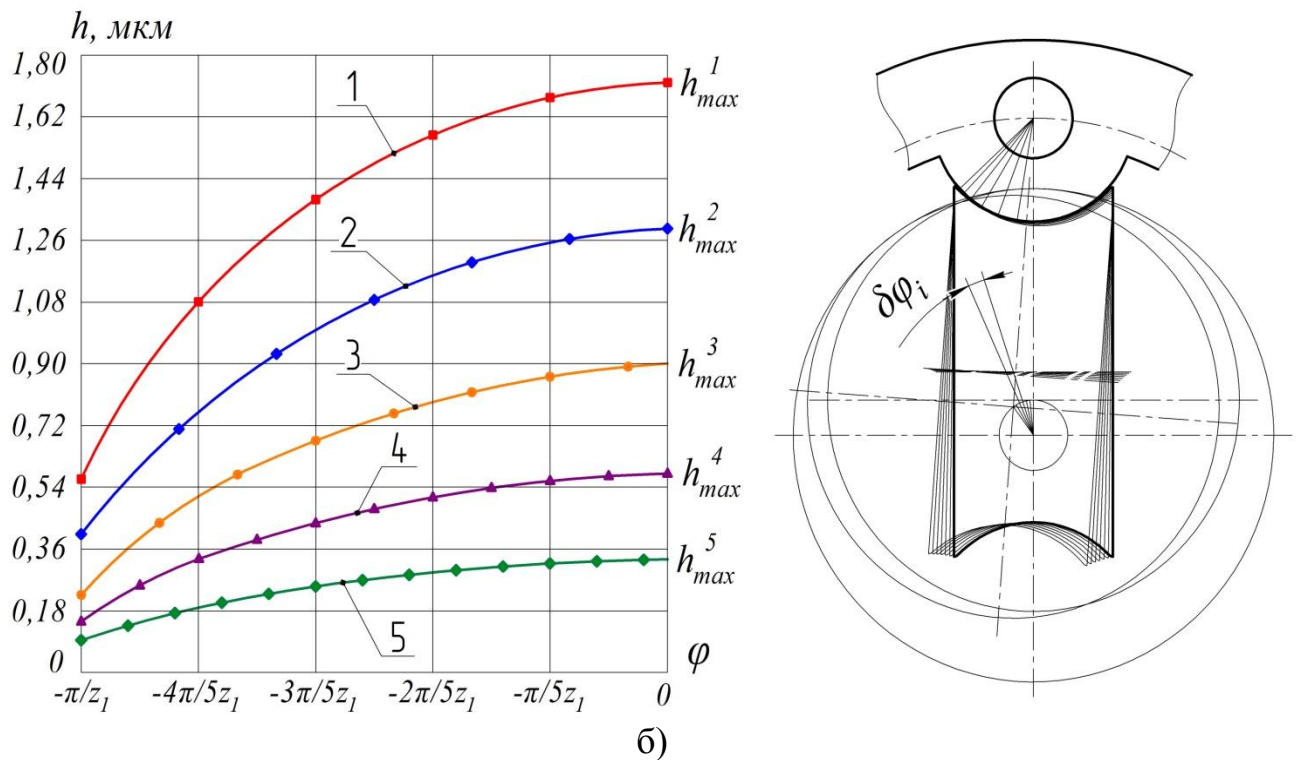
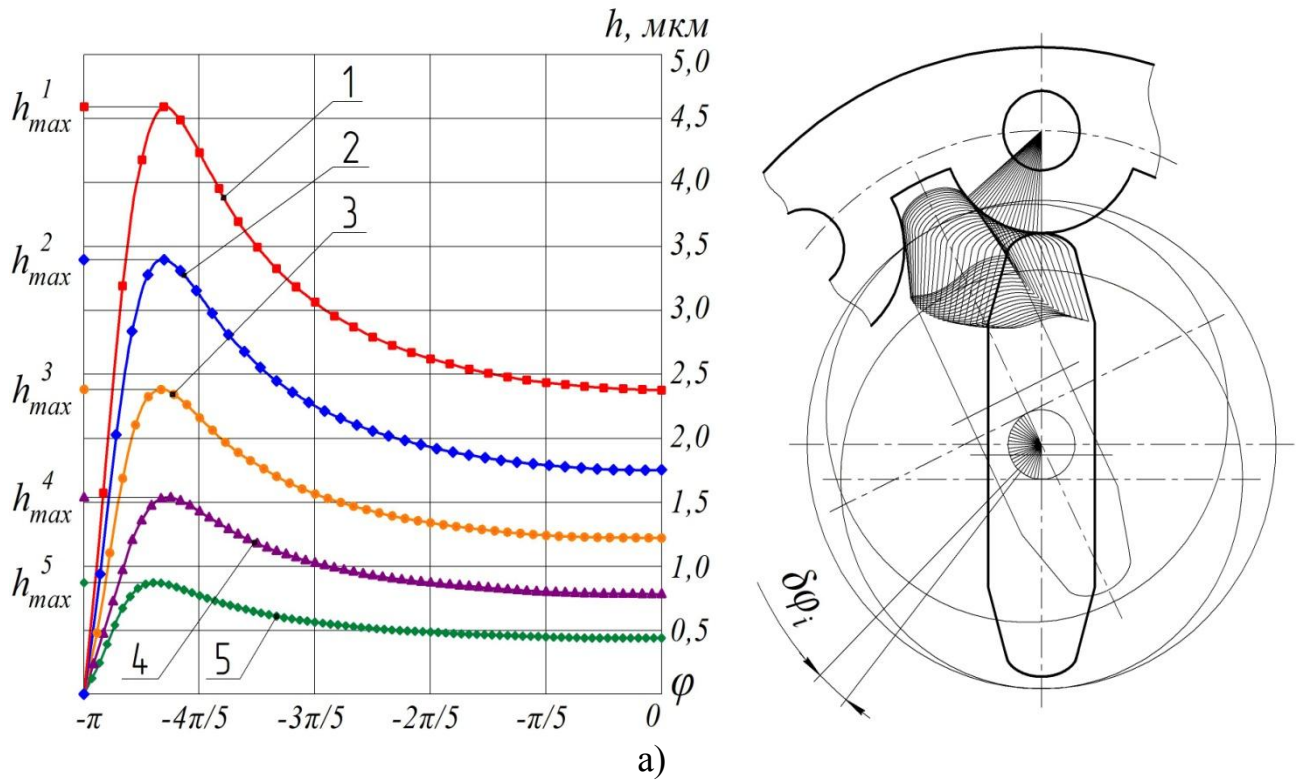


Рис. 2.11 Графіки розподілу висоти мікронерівностей h уздовж активної ділянки дуги цівки для моделювання обробки кругом з профілем на основі ОДЕЕ (а) і УДЕЕ (б)

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 – $\delta\varphi_i = 2,4^\circ$

Визначивши значення h_{max} , виконано побудову графіків їх залежності для 5ти значень $\delta\varphi_i$ (рис 2.12).

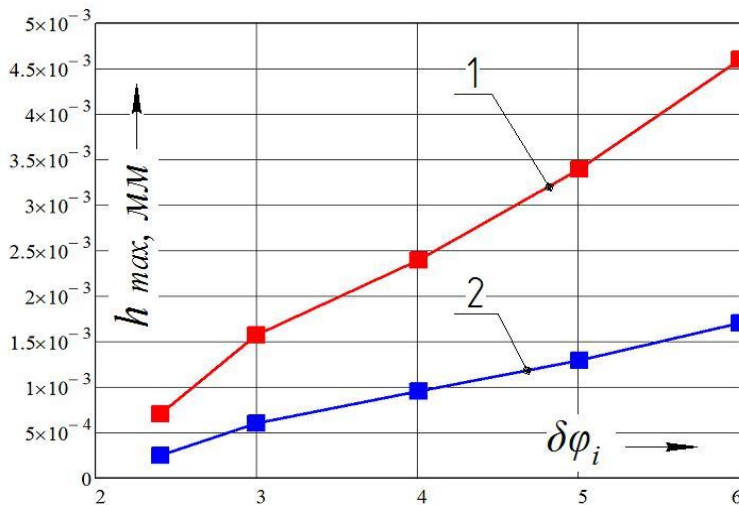


Рис. 2.12 Графіки, що виражають залежність максимальної висоти мікронерівностей h_{max} від $\delta\varphi_i$

1 – графік що відповідає профілю на основі ОДЕЕ;
2 – для профілю на основі УДЕЕ

Аналіз результатів моделювання утворення мікронерівностей дозволяє зробити наступні висновки:

- 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 $\delta\varphi_i$;

- висота мікронерівностей змінюється пропорційно зміні кривизни еквідистанти до епіциклоїди, причому для ОДЕЕ чим менше значення радіусу кривизни, тим більше значення висоти мікронерівностей. Для профілю окресленого УДЕЕ спостерігається зворотна тенденція;

- представлені результати моделювання утворення мікрорельєфу дають змогу попередньо обрати значення технологічних параметрів для досягнення необхідної шорсткості перед початком експериментальних досліджень.

Таким чином теоретично доведено, що застосування УДЕЕ дозволяє покращити параметр шорсткості обробки, і відповідно, дозволяє вдосконалити базовий метод шліфування. Але отримані результати моделювання потребують подальшої експериментальної перевірки. Також виникає необхідність розробити інженерну методику профілювання круга на основі УДЕЕ, та визначення його конструктивних параметрів.

2.4 Синтез профілю шліфувального круга на основі увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди та дослідження його робочих параметрів

Одним із недоліків застосування УДЕЕ під час профілювання інструменту є наявність загострень профілю в граничних точках. Для їх усунення, пропонується ввести допоміжні ділянки за межами граничних точок. Увігнута ділянка є достатньою для повноцінного формоутворення активної ділянки дуги цівки, що доведено результатами досліджень процесу обробки лезовими багатозубими інструментами [83, 84, 104]. Якщо профіль цівкового колеса окреслений обвідною сімейства еквідистант до епіциклоїд, то виникає необхідність шліфування міжцівкової западини. Формоутворення западини профілем на основі УДЕЕ здійснити неможливо, натомість застосування ОДЕЕ дає змогу здійснити обробку западини, причому як одиничним діленням, так і обкатом. Якщо профіль міжцівкової западини конструктивно не задіяний в роботі, обробці підлягають лише активні ділянки дуги цівки (ті що сприймають контакт із профілем сателіту). В такому випадку цівкове колесо може бути оброблено шліфувальним кругом з профілем на основі УДЕЕ за одну установку. УДЕЕ описується рівняннями (1.4) і (1.5). Після диференціювання і спрощення, рівняння (1.4) (1.5) еквідистанти до епіциклоїди приймають вигляд:

$$\xi(\varphi) = R_{ц.ц.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right) - e \cdot \cos\varphi + \frac{r_ц \cdot \left(R_{ц.ц.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right) - R_2 \cdot \cos\varphi \right)}{\sqrt{R_2^2 + R_{ц.ц.}^2 - 2 \cdot R_2 \cdot R_{ц.ц.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}, \quad (2.30)$$

$$\eta(\varphi) = R_{ц.ц.} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{z_2}\right) - e \cdot \sin\varphi + \frac{r_ц \cdot \left(R_{ц.ц.} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{z_2}\right) - R_2 \cdot \sin\varphi \right)}{\sqrt{R_2^2 + R_{ц.ц.}^2 - 2 \cdot R_2 \cdot R_{ц.ц.} \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}. \quad (2.31)$$

Допоміжні ділянки за межами точок перегину можуть мати різні конструктивні виконання. Найбільш прийнятним з точки зору умов врізання інструменту, та мінімізації приросту на ширину круга, буде виконання у вигляді спряженого кола. На рис. 2.13 представлений варіант виконання допоміжного радіусного профілю.

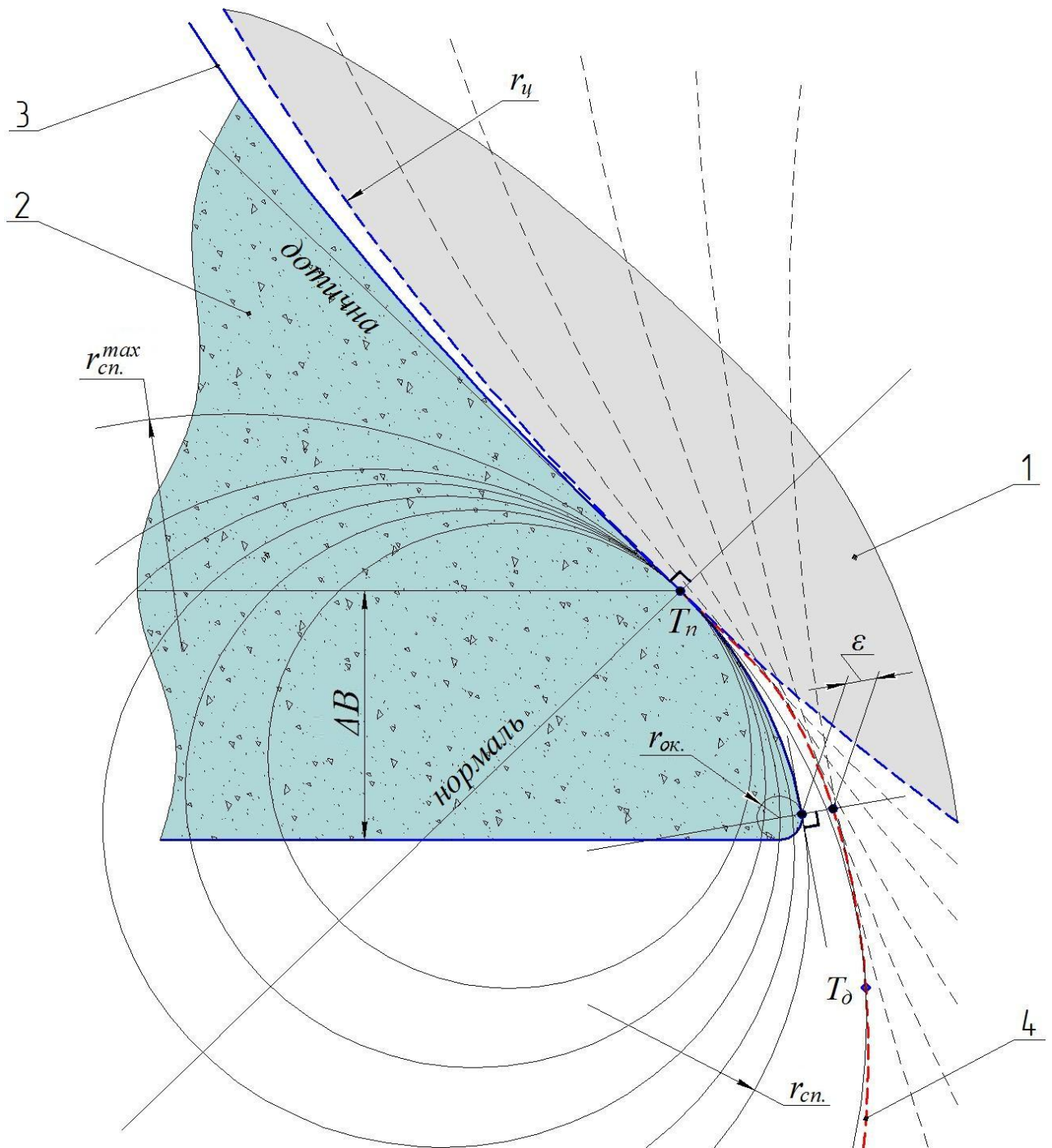


Рис. 2.13 Конструктивне виконання допоміжного профілю шліфувального круга за межами точки перегину у вигляді спряженого кола

1 – фрагмент цівки; 2 – фрагмент круга; 3 – УДЕЕ; 4 – ОДЕЕ; r_{cn} – радіус спряження; r_{cn}^{max} – максимальний радіус спряження; $r_{ок.}$ – радіус округлення гострої кромки; T_0 – точка дотику кола r_{cn}^{max} і опуклої ділянки; T_n – точка перегину; ΔB – приріст на ширину інструменту; ϵ – гарантований зазор між контурами інструменту і зоною інтерференції

Точка спряження допоміжного профілю з УДЕЕ відповідає точці перегину. Значення радіуса спряженого кола 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_δ . 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:

- контури допоміжного профілю повинні вписуватись в область, окреслену еквідистантою до епіциклоїди без інтерференції;
- значення $r_{cn.}$ необхідно обирати максимально близьким до $r_{cn.}^{max}$ (для забезпечення геометричної стійкості), при цьому забезпечуючи гарантований 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 інструмента і оснащення для їх вільного проходження крізь порожнину цівкового колеса.

Для оцінки робочих параметрів круга, ефективності його експлуатації, застосуємо коефіцієнт використання різального профілю $k_{e.n.}$. Цей показник буде визначатись як відношення довжини задіяної в роботі ділянки профілю інструменту до довжини активної ділянки дуги цівки. Для шліфування в умовах копіювання $k_{e.n.} = 1$, оскільки формоутворення здійснюється повністю задіяним профілем. В процесі шліфування цівкового колеса в умовах обкату, профіль інструменту завжди задіяний частково, причому довжина задіяної в роботі ділянки залежить від фази обкату. Дана особливість обумовлена властивостями еквідистанти до епіциклоїди. Оскільки довжина активної ділянки цівки є постійною величиною, основний вплив на $k_{e.n.}$ буде мати довжина Δs задіяної в роботі ділянки профілю інструменту. В свою чергу на Δs впливатиме величина врізання (глибина різання), оскільки довжина задіяної в роботі дуги профілю збільшуватиметься по мірі заглиблення в тіло заготовки. Окремий вплив обумовлений формою профілю опуклий-увігнутий. На рис. 2.14 представлено графіки, які показують залежність Δs від величини радіального врізання в

центральносиметричній фазі для кругів з профілями на основі опуклої і увігнутої ділянки еквідистанти.

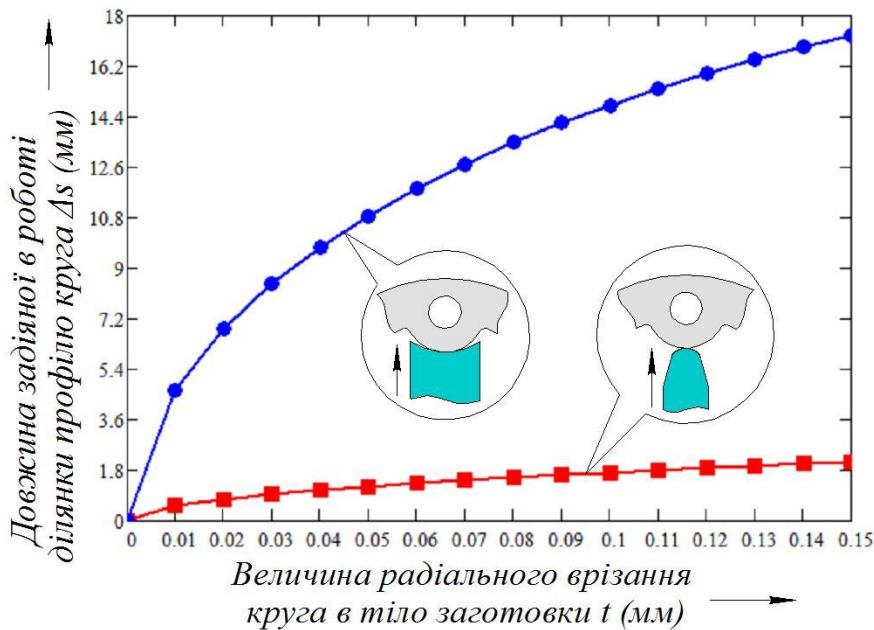


Рис. 2.14 Залежність довжини задіяного в роботі профілю круга від величини радіального врізання

Графіки показують, що величина Δs для профілю на основі УДЕЕ відрізняється набагато більшими значеннями, ніж для ОДЕЕ. Увігнута ділянка і профіль цівки мають кривизну однакового знаку, що забезпечує охоплення значно більших довжин дуг взаємодіючих профілів. Так, для значення $t=0,05$ мм, довжина задіяного профілю на основі УДЕЕ перевищує цей же показник для ОДЕЕ в 8,9 разів, для $t=0,1$ – в 8,6 разів, для $t=0,15$ – в 8,2 рази. Даний аналіз дає підстави стверджувати, що профіль на основі УДЕЕ використовується набагато ефективніше, має кращу здатність до вигладжування поверхні та забезпечення мінімальної шорсткості, тим самим підтверджуючи результати п. 2.3.

Ще одним показником, який визначатиме ефективність роботи інструменту, є питоме навантаження на профіль. Для його визначення скористуємось формулою для коефіцієнту питомого ковзання двох спряжених профілів [113]:

$$\lambda = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_2}{\Delta L_1}, \quad (2.32)$$

де ΔL_1 – довжина дуги формотворного профілю (ОДЕЕ або УДЕЕ);

ΔL_2 – довжина шліфованої активної ділянки дуги цівки.

Формула (2.32) є узагальненою і не враховує значення прикладених сил та їх розподіл по довжині профілю, основним критерієм є довжини дуг взаємодіючих профілів. Відповідно, питоме навантаження на профіль інструменту тим більше, чим менше його довжина ΔL_1 і чим більша довжина ΔL_2 . Довжина дуги ΔL_2 визначатиметься як добуток $\theta \cdot r_u$, де θ – кут, що стягує дугу. Відповідно, значення конструктивного параметру цівкового колеса r_u буде мати вплив на величини ΔL_1 і ΔL_2 . Розглянемо, як залежить величина λ для профілів на основі ОДЕЕ і УДЕЕ від параметру r_u . На рис. 2.15 представлена схема, яка наглядно ілюструє зміну ΔL_1 і ΔL_2 в залежності від значення r_u . Запишемо повну формулу для визначення ΔL_2 , з урахуванням значення кута θ , яке визначаємо згідно схеми рис. 2.15:

$$\Delta L_2 = \arcsin \left[\frac{R_{u.ч.} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{z_2}\right)}{\sqrt{R_{u.ч.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{u.ч.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{z_2}\right)}} \right] \cdot r_u. \quad (2.33)$$

Довжина дуги ΔL_1 визначається за формулою:

$$\Delta L_1 = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{\left(\frac{d\xi}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{d\varphi}\right)^2} d\varphi. \quad (2.34)$$

Межі інтегрування для визначення довжини дуги:

- ОДЕЕ $\Delta L_1^{on.}$ – $\varphi_1 = \varphi_n$, $\varphi_2 = 2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n$;
- УДЕЕ $\Delta L_1^{y6.}$ – $\varphi_1 = -\varphi_n$, $\varphi_2 = \varphi_n$.

На основі отриманих формул було обчислене значення коефіцієнту λ і побудовано графік його залежності від параметру r_u , який представлено на рис. 2.16.

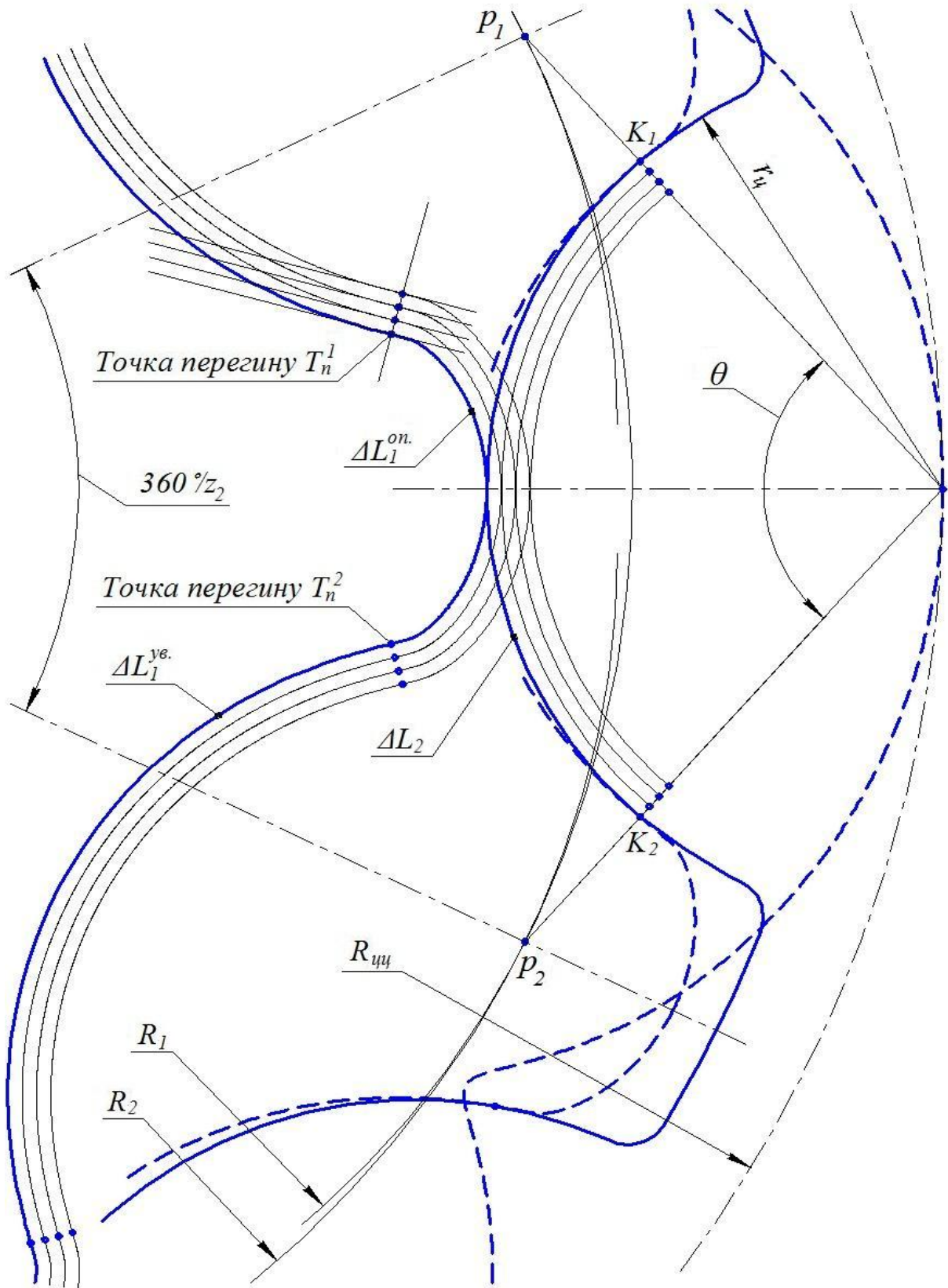


Рис. 2.15 Розрахункова схема визначення довжин дуг взаємодіючих профілів цівки і інструмента для різних значень радіуса цівки

$\Delta L_1^{on.}$, $\Delta L_1^{yb.}$ – довжини дуг ОДЕЕ і УДЕЕ; ΔL_2 – довжина дуги активної ділянки цівки, обмежена точками K_1 , K_2 і кутом θ ; p_1 , p_2 – положення полюсу зачеплення центрів R_1 і R_2 , які відповідають центральносиметричним положенням ОДЕЕ і міжцвкової западини

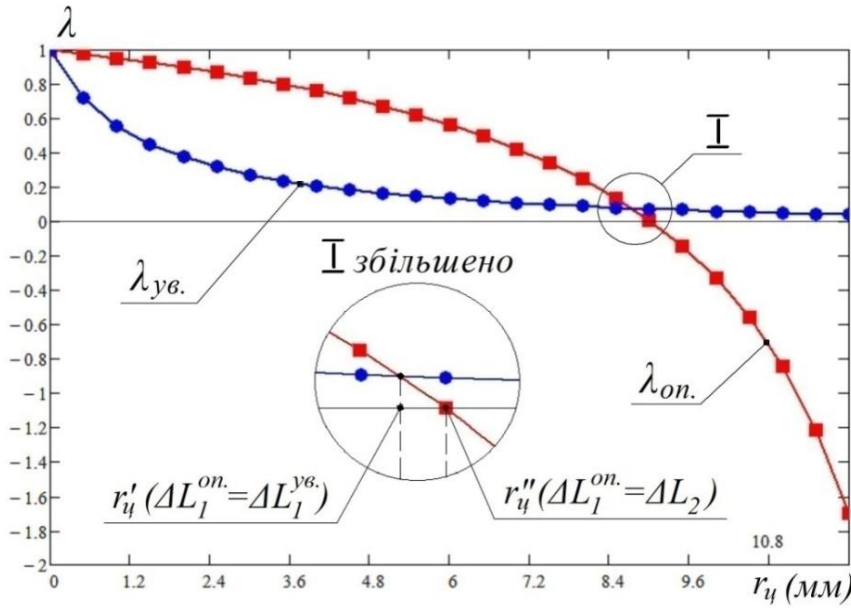


Рис. 2.16 Залежність коефіцієнта питомого навантаження λ на профіль інструменту від конструктивного параметру r_u

Навантаження на ОДЄЄ буде зменшуватись, якщо $\lambda_{on.} \rightarrow 1$. Відповідно, тенденція зменшення питомого навантаження на УДЄЄ буде спостерігатись, якщо $\lambda_{ув.} \rightarrow 0$. Як видно, графіки мають особливі точки, яким відповідають значення радіусів r_u' і r_u'' . Значенню r_u' відповідає точка перетину графіків і відповідно, досягається рівність $\lambda_{on.} = \lambda_{ув.}$, яка в свою чергу можлива за умови $\Delta L_1^{on.} = \Delta L_1^{y6.}$. Значення r_u'' відповідає нульовому значенню $\lambda_{on.}$, яке досягається за умови рівності дуг $\Delta L_1^{on.} = \Delta L_2$. Знайдемо r_u' і r_u'' . Запишемо формулу (2.34), виразивши довжину дуги через радіус кривизни $\rho(\varphi)$:

$$\Delta L_1 = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sqrt{\left(\frac{d\xi}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{d\varphi}\right)^2} d\varphi = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \frac{\rho_{екв.}(\varphi)}{\rho(\varphi)} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2} d\varphi. \quad (2.35)$$

Для зручності позначимо $\sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2} = \Delta V_E(\varphi)$. Запишемо умову $\Delta L_1^{on.} = \Delta L_1^{y6.}$, враховуючи вираз (2.35):

$$2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n \int_{\varphi_n}^{\varphi_n} \frac{\rho(\varphi) - r_u}{\rho(\varphi)} \cdot \Delta V_E(\varphi) d\varphi = \int_{-\varphi_n}^{\varphi_n} \frac{\rho(\varphi) - r_u}{\rho(\varphi)} \cdot \Delta V_E(\varphi) d\varphi. \quad (2.36)$$

Розв'язуючи отримане рівняння відносно r_u , маємо перше шукане значення r'_u :

$$r'_u = \frac{\int_{\varphi_n}^{2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n} \Delta V_E(\varphi) d\varphi + \int_{-\varphi_n}^{\varphi_n} \Delta V_E(\varphi) d\varphi}{\int_{\varphi_n}^{2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n} \frac{\Delta V_E(\varphi)}{\rho(\varphi)} d\varphi + \int_{-\varphi_n}^{\varphi_n} \frac{\Delta V_E(\varphi)}{\rho(\varphi)} d\varphi}. \quad (2.37)$$

Аналогічно, прирівнюючи вирази (2.33) і (2.35) згідно умови $\Delta L_1^{on.} = \Delta L_2$ і розв'язуючи отримане рівняння, маємо друге шукане значення r''_u :

$$r''_u = \frac{\int_{\varphi_n}^{2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n} \Delta V_E(\varphi) d\varphi}{\theta + \int_{\varphi_n}^{2\pi \frac{z_2}{z_1} - \varphi_n} \frac{\Delta V_E(\varphi)}{\rho(\varphi)} d\varphi}. \quad (2.38)$$

Первісна підінтегрального виразу $\Delta V_E(\varphi)$ не виражається в елементарних функціях, оскільки інтеграл типу $\int \Delta V_E(\varphi) d\varphi$ належить до еліптичних інтегралів другого роду [121].

Аналіз коефіцієнта питомого навантаження λ , дозволяє сформулювати наступні рекомендації щодо інструментів:

- застосування ОДЄЕ в якості профілю інструменту рекомендовано, якщо $r_u < r'_u$ (при цьому виконується умова $\Delta L_1^{on.} > \Delta L_2$);
- застосування УДЄЕ рекомендовано, якщо $r_u \geq r'_u$;
- якщо $r_u \geq r'_u$, застосування ОДЄЕ не рекомендовано, оскільки окрім збільшення навантаження на опуклу ділянку, спостерігається зменшення радіуса кривизни і відповідно, утворення уразливих і схильних до руйнування ділянок профілю.

Встановлено, що для обробки кругом з профілем на основі УДЄЕ, характерна наявність контактних і безконтактних періодів обкату. Керування і контроль над процесом шліфування, вимагає визначення перехідних фаз, яким відповідають точки початку і закінчення контакту інструмента із заготовкою. Розглянемо схему переміщення окремої цівки в процесі обкату і її контакт із профілем на основі УДЄЕ (рис. 2.17).

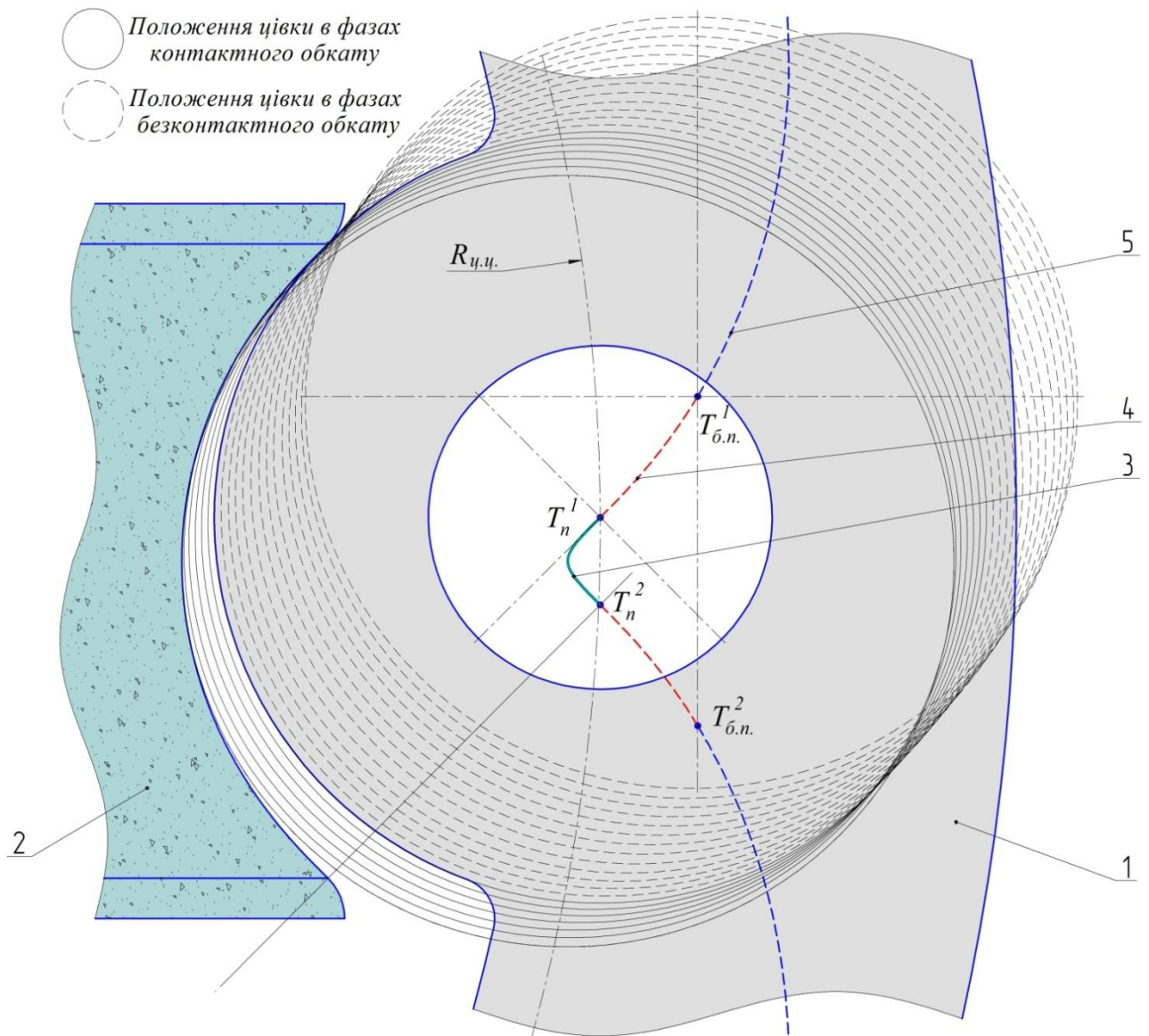


Рис. 2.17 Схема визначення періодів контактного і безконтактного обкату при обробці кругом з профілем на основі УДЄЕ

1 – фрагмент цівки; 2 – фрагмент круга; 3 – ділянка епіциклоїди, що відповідає періоду контакту інструмента із заготовкою (обмежена точками перегину $T_n^1 - T_n^2$); 4 – ділянка що відповідає періоду безударного підводу-виводу (ділянка підводу обмежена точками $T_n^1 - T_{б.н.}^1$, ділянка виводу відповідно $T_n^2 - T_{б.н.}^2$); 5 – ділянка, що відповідає періоду безконтактного обкату, який може здійснюватись в прискореному режимі

Центри цівок одночасно рухаються по спільній єдиній траєкторії – вкороченій епіциклоїді. Профіль круга і цівки перебувають в контакті під час руху уздовж увігнутої ділянки траєкторії, обмеженої точками перегину T_n^1 і T_n^2 . Переміщення уздовж опуклої ділянки супроводжується відсутністю контакту. Як було зазначено в п. 2.2, з метою скорочення часу на обробку цівкового колеса, рух що відповідає фазам безконтактного обкату, може здійснюватись в прискореному режимі. Якщо періоди безконтактного обкату здійснювати в прискореному режимі, то до початку врізання швидкість необхідно зменшити, забезпечуючи безударний підвід. Аналіз кінематики обкату вказує на необхідність введення допоміжного періоду між періодами контактного і безконтактного обкату. Допоміжний період необхідний для зменшення швидкості обкату до робочої величини. Основною вимогою при визначенні положення точки безударного підводу $T_{б.н.}$ є відсутність інтерференції цівки і профілю круга у фазі, яка відповідає цій точці. Тому, з міркувань безпеки, значення періоду безударного підводу $t_{б.н.}$ має бути не меншим за період контактного обкату $t_{к.о.}$ для УДЄЕ.

2.5 Висновки до розділу

1. Визначено умови існування еквідистанти до вкороченої епіциклоїди та визначені її особливі точки. Встановлено, що параметр $r_{ц}$ впливає на умови існування: якщо $r_{ц}$ перевищує мінімальний радіус кривизни вкороченої епіциклоїди ρ_{min} , то еквідистанта матиме «вироджені ділянки», що унеможливило її нормальне використання в якості робочого профілю ГП або інструменту. Отримана формула, яка дозволяє точно визначати ρ_{min} .

2. Визначено умови існування обвідної сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд, та отримані єдині рівняння в параметричній формі, які описують профіль цівкового колеса як єдину та неперервну криву. Знайдено

раціональний розв'язок рівняння, що поєднує в собі параметр побудови кривої φ і параметр t , що визначає криву із множини сімейства.

3. Удосконалено базовий метод шліфування профілю цівкового колеса шляхом застосування УДЕЕ в якості формотворного профілю інструменту. 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. Встановлено, що характер зміни висоти мікронерівностей уздовж профілю цівки відповідає кривизні ділянки еквідистанти до епіциклоїди, яка прийнята за основу для профілювання інструменту.

4. Представлено конструктивний варіант профілю шліфувального круга з профілем на основі УДЕЕ з допоміжними ділянками у вигляді дуг спряжених кіл. Розроблено відповідні рекомендації для застосування даного інструменту, визначено значення r_u , для яких доцільним є застосування інструмента з профілем на основі ОДЕЕ або УДЕЕ.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ПРОФІЛЮ ЦІВКОВОГО КОЛЕСА В УМОВАХ ОБКАТУ

3.1 Аналіз кінематичних процесів формоутворення профілю цівкового колеса в умовах обкату

Розглянемо більш детально рух обкату цівкового колеса згідно схеми базового методу шліфування (рис. 3.1). Оброблюване колесо і інструмент утворюють верстатне зачеплення, в якому центроїда цівкового колеса обкатується без проковзування навколо нерухомої центроїди уявного сателіта, заміненого інструментом (рис. 3.1, а). Колесо здійснює планетарний рух обкату, адекватний робочому циклу ГП, навколо нерухомого сателіту. Інструмент здійснює зворотно-поступальні рухи у вертикальній площині (паралельно вісі колеса), залишаючись нерухомим в горизонтальній. Планетарний рух обкату цівкового колеса складається з двох окремих рухів – поступального переміщення по колу обкату з радіусом e і обертального руху цівкового колеса навколо власної вісі. Відносно центру кола обкату, вісь цівкового колеса обертається із частотою n_{ex} . – вхідною частотою, яка задає темп обкату (рис. 3.1, б). Частота обертання цівкового колеса навколо власної геометричної вісі $n_{вих}$. – вихідна частота, яка пов'язана із n_{ex} . кінематичним співвідношенням:

$$n_{вих} = n_{ex} / z_2 . \quad (3.1)$$

Для обробки однієї цівки центроїда цівкового має здійснити один повний обкат навколо центроїди сателіту (див. п. 2.4). Часу для цього знадобиться $1xв./n_{ex}$, а для обробки усіх цівок це число необхідно помножити на їх кількість. Кінематичне співвідношення (3.1) зберігатиметься незалежно від форми профілю інструменту (опукла або увігнута).

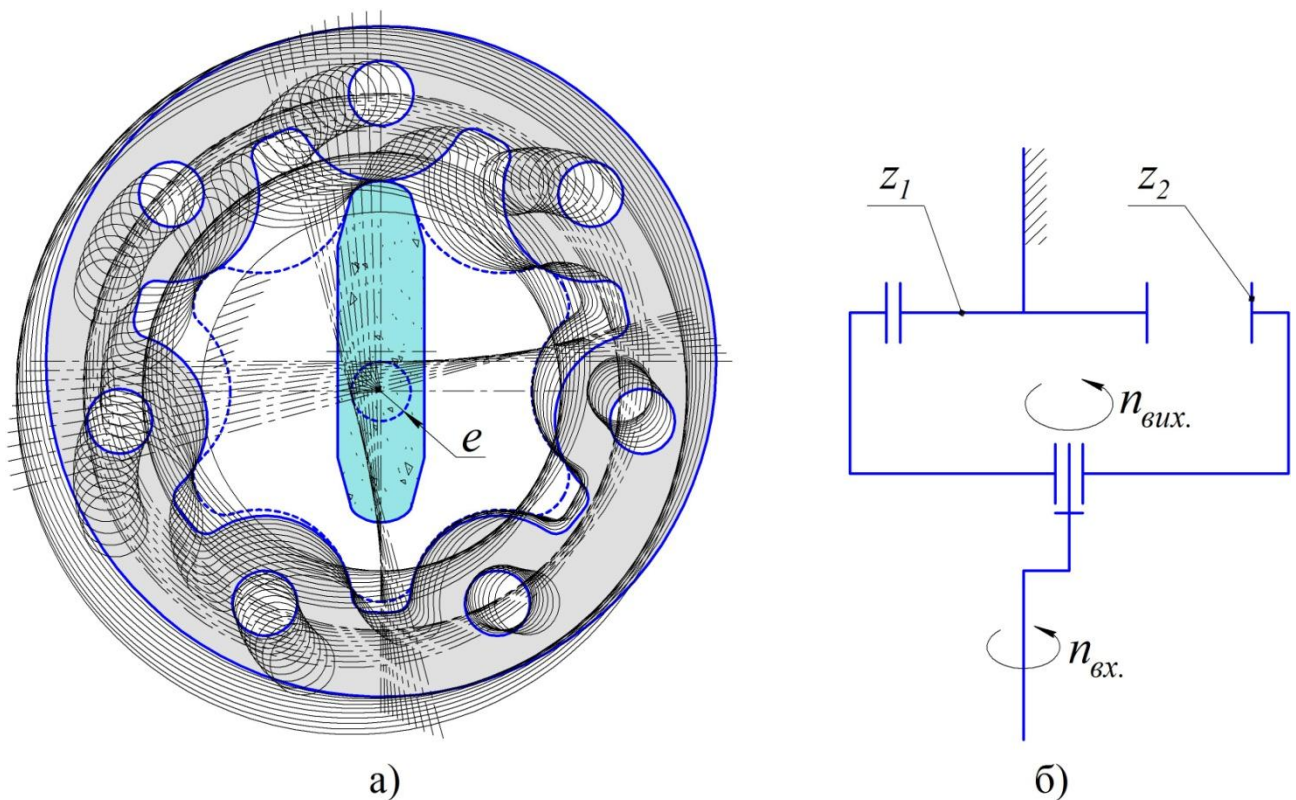


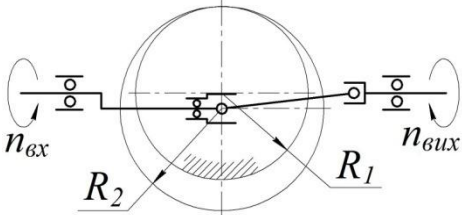
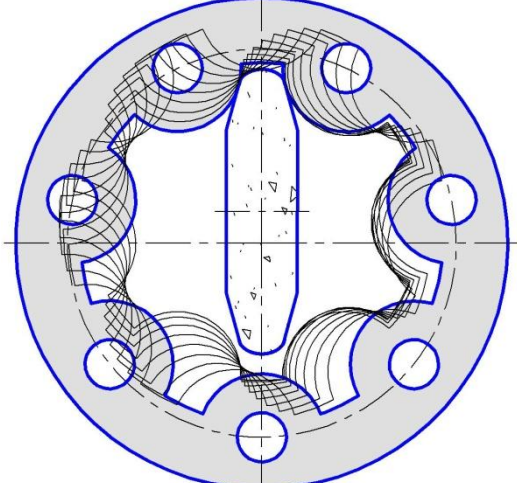
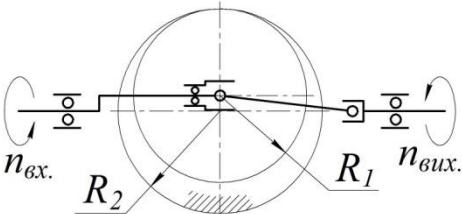
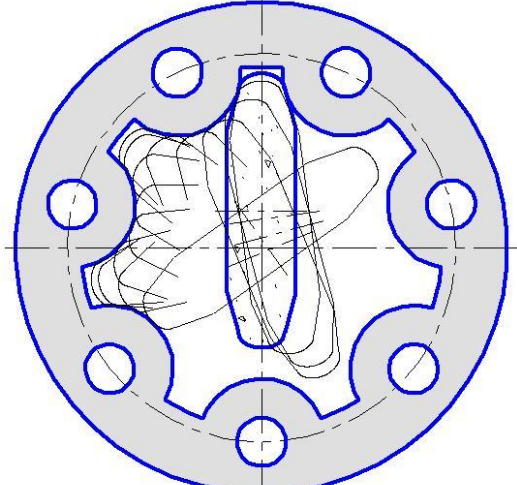
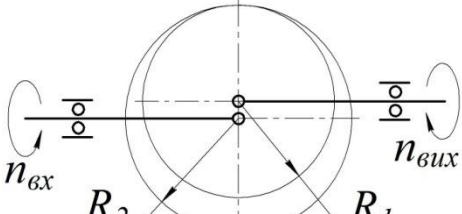
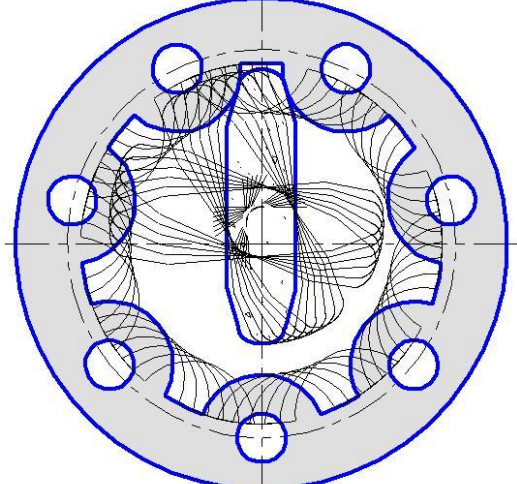
Рис. 3.1 Рух обкату цівкового колеса і сімейство миттєвих положень при обкочуванні його центроїди навколо нерухомої центроїди інструменту (а), та кінематична схема верстатного зачеплення (б)

$n_{вх.}$ – вхідна частота обертання вісі цівкового колеса навколо вісі обкату; $n_{вих.}$ – вихідна частота обертання цівкового колеса навколо власної геометричної вісі

Окрім представленої на рис. 3.1 схеми, шліфування цівкового колеса в умовах обкату може бути здійснено за п'ятьма різними схемами, які представлені в таблиці 3.1. Кожній кінематичній схемі верстатного зачеплення відповідає схема взаємних переміщень круга і заготовки. Схема №1 відповідає рис 3.1. Схема №2 передбачає обкат центроїди інструмента по внутрішній стороні нерухомої центроїди цівкового колеса. На схемі №3 обидві центроїди здійснюють обертові узгоджені рухи навколо власних осей, при цьому їх осі мають фіксоване положення. Згідно схеми №4, центроїда цівкового колеса здійснює обертання навколо нерухомої вісі, в той час як центроїда інструмента здійснює поступальний рух по колу обкату без обертання. В схемі №5 обертовий рух надається центроїді інструменту, а поступальний без обертання – центроїді цівкового колеса.

Таблиця 3.1

Схеми шліфування цівкового колеса в умовах обкату

№ п/п	Кінематика верстатного зачеплення	Схема формоутворення	Частота вихідної ланки (хв ⁻¹)
1	2	3	4
1			$n_{\text{ex.}} = \frac{n_{\text{ex.}}}{Z_2}$ $n_{\text{вих.}}$
2			$n_{\text{ex.}} = \frac{n_{\text{ex.}}}{Z_1}$ $n_{\text{вих.}}$
3			$n_{\text{вих.}} = n_{\text{ex.}} \frac{Z_1}{Z_2}$

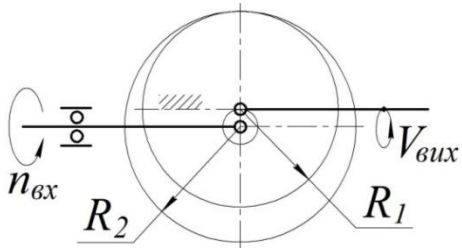
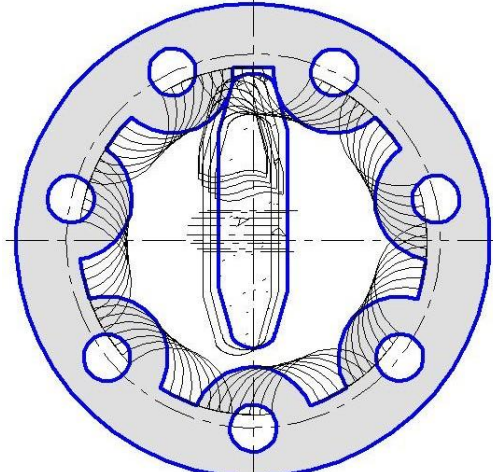
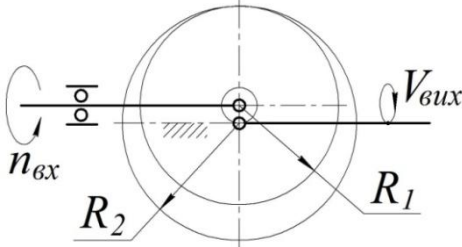
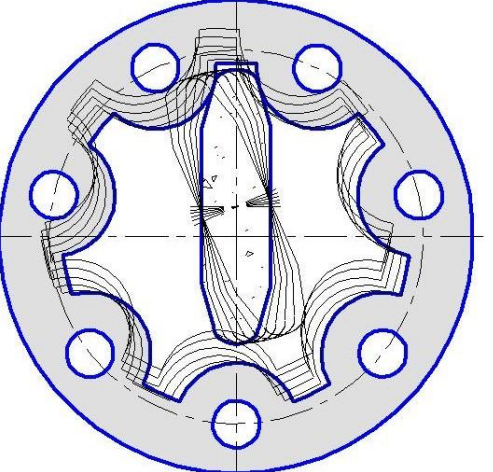
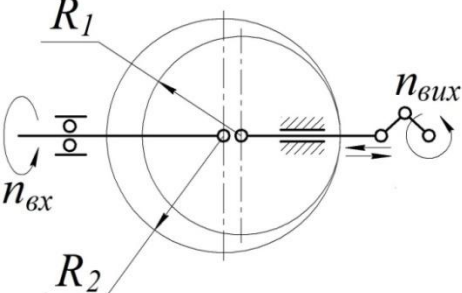
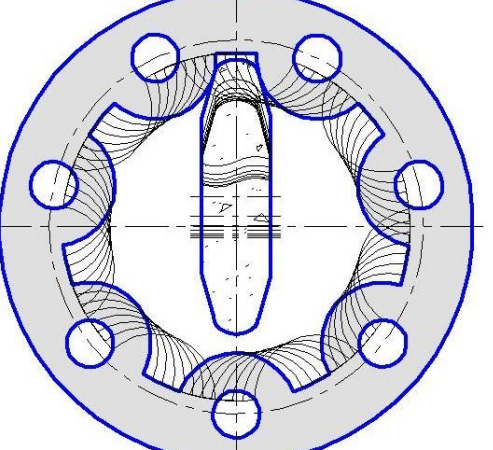
1	2	3	4
4			$V_{вих.} = \frac{2\pi \cdot n_{ex} \cdot Z_2 \cdot e}{60}$
5			$V_{вих.} = \frac{2\pi \cdot n_{ex} \cdot e}{60 \cdot Z_1}$
6			$n_{вих.} = \frac{n_{ex} \cdot Z_1 \cdot \sin\varphi}{Z_2}$

Схема №6 передбачає обертання центроїди цівкового колеса з постійною частотою і осцилюючі рухи центроїди інструмента. Вихідна частота, що перетворюється в осцилюючий рух при такій схемі, є функція кутового параметру φ , який визначає поточне положення цівкового колеса.

В кожній схемі є вхідна кінематична ланка, котра приводить верстатне зачеплення в рух і обертається з частотою $n_{ex.}$. Частота обертання $n_{вих.}$ вихідної кінематичної ланки для кожної зі схем визначається за індивідуальною формулою, яка виражає кінематичний зв'язок між $n_{вих.}$ і $n_{ex.}$. В четвертій і п'ятій схемах вихідна ланка здійснює поступальний рух, тому $n_{вих.}$ тут замінюється поступальною швидкістю $V_{вих.}$. Точність формоутворення профілю цівкового колеса буде безпосередньо залежати від точності відтворення кінематичних співвідношень між $n_{ex.}$ і $n_{вих.}$ ($V_{вих.}$) у верстатному зачепленні.

Аналіз представлених схем показує, що для формоутворення профілю цівкового колеса, можливо застосовувати менш складні диференційовані рухи, замість планетарного руху. На основі схеми №3 була запропонована верстатна компоновка для виготовлення коліс ГП, опис якої подано в патенті [75] (див. додаток Б). Основною перевагою цієї компоновки є те, що процес формоутворення реалізується через суміщення двох простих обертальних рухів виконавчих органів, які здійснюються від окремих приводів. Узгодженість обертальних рухів (частот $n_{ex.}$ і $n_{вих.}$) досягається за рахунок ЧПК. Представлені схеми формоутворення будуть актуальними для здійснення шліфування інструментами з різною формою профілю (опукла або увігнута).

3.2 Дослідження кінематики контактної взаємодії профілів інструмента і цівкового колеса в плоскому перерізі

Кінематика контактної взаємодії передбачає закони руху точки контакту взаємодіючих профілів цівкового колеса та шліфувального круга в процесі взаємного переміщення. Дослідження законів руху включає в себе аналітичне визначення швидкостей відносних переміщень профілів, визначення факторів впливу на швидкість обкату і характеру цього впливу. На даному етапі дослідження не враховує осциляцію інструмента, розглядається лише взаємодія

профілів в плоскому перерізі. Наступним етапом є дослідження просторової взаємодії, яке враховує осциляцію.

На швидкість обкату буде мати вплив єдиний керований фактор – вхідна частота $n_{\text{вх}}$. Другорядний некерований фактор – нерівномірна кривизни еквідистанти до епіциклоїди (див. п. 2.1). Дослідження впливу наведених факторів вимагає проведення детального аналізу кінематики контактної взаємодії у верстатному зачепленні. Спочатку визначимо поступальну швидкість переміщення центру цівки уздовж епіциклоїди. Розрахункова схема для її визначення з відповідними позначеннями, представлена на рис. 3.2.

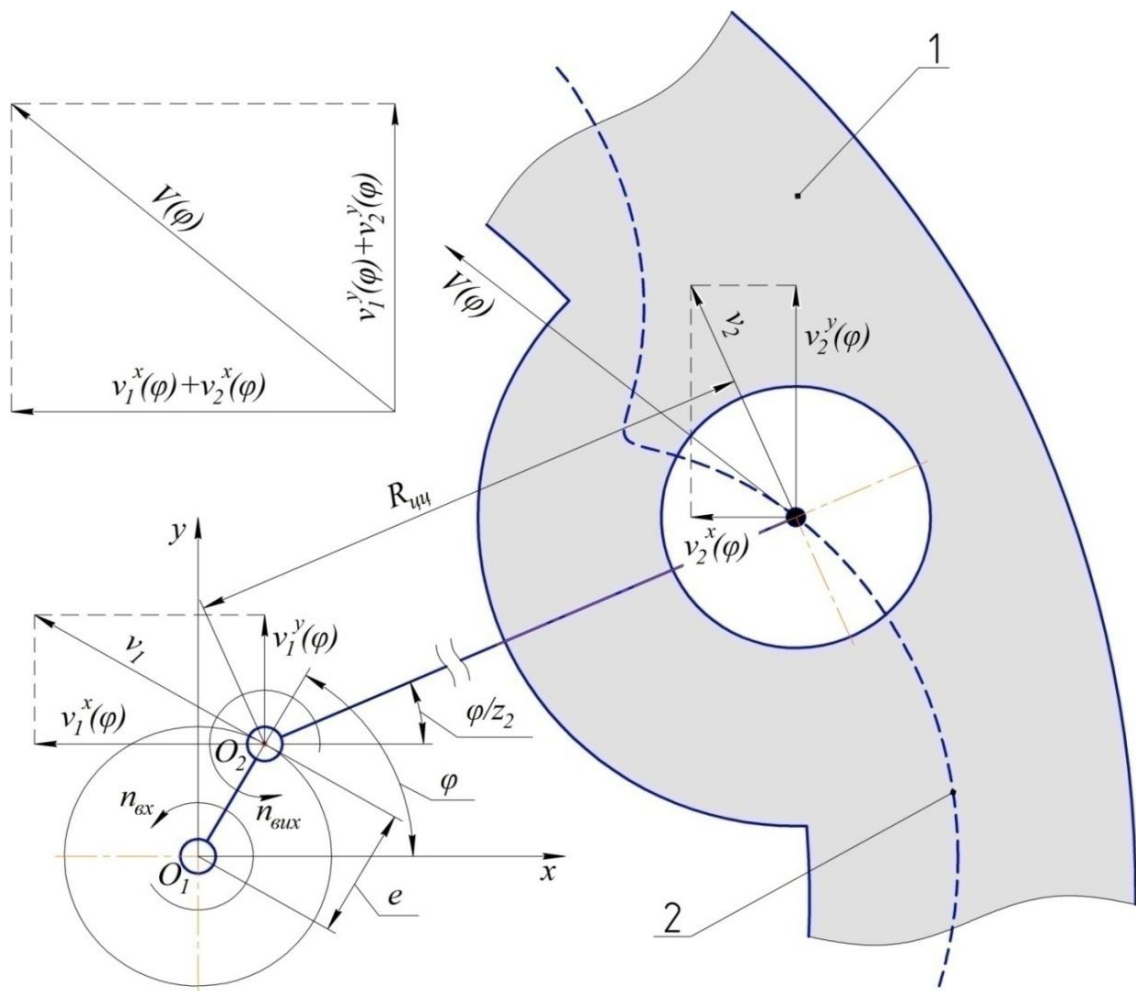


Рис. 3.2 Розрахункова схема визначення швидкості переміщення центру цівки уздовж епіциклоїдальній траєкторії

1 – фрагмент цівкового колеса; 2 – траєкторія переміщення центру цівки в процесі обкату; ν_1 – поступальна швидкість переміщення цівкового колеса по колу радіусом e відносно центру O_1 ; ν_2 – поступальна швидкість переміщення центру цівки відносно миттєвого центру обертання O_2 ; $v_1^x(\varphi)$, $v_2^x(\varphi)$, $v_1^y(\varphi)$, $v_2^y(\varphi)$ – проекції векторів швидкостей ν_1 і ν_2 на координатні осі; $V(\varphi)$ – швидкість переміщення центру цівки по епіциклоїдальній кривій

В процесі обкату, цівкове колесо як відомо, здійснює два обертових рухи – по колу з радіусом e з вхідною частотою $n_{ex.}$ і навколо власної вісі з вихідною частотою $n_{вих.} = n_{ex.}/z_2$. Центри усіх цівок колеса одночасно рухаються по спільній епіциклоїдальній траєкторії, а вектор їх швидкості співпадає з дотичною до траєкторії в миттєвих точках.

Кутові швидкості ω_1 і ω_2 обертальних рухів відносно центрів O_1 і O_2 :

$$\omega_1 = 2\pi \cdot n_{ex.}, \quad (3.2)$$

$$\omega_2 = 2\pi \cdot n_{вих.} = 2\pi \cdot n_{ex.}/z_2. \quad (3.3)$$

Розмірність частоти $n_{ex.}$ у формулах (3.2) і (3.3) – c^{-1} . Використовуючи формулу зв'язку кутової і поступальної швидкостей, знаходимо поступальні швидкості руху центра цівкового колеса по коловій траєкторії з радіусом e і точки, що належить колу $R_{ц.ц.}$:

$$v_1 = e \cdot \omega_1, \quad (3.4)$$

$$v_2 = R_{ц.ц.} \cdot \omega_2 = R_{ц.ц.} \cdot \omega_1/z_2. \quad (3.5)$$

Залежно від фази обкату, значення знайдених швидкостей залишатимуться постійними і матимуть різні напрямки, що вплине на їх результуючу. Тому квадрат модулю результуючої швидкості необхідно визначати як суму квадратів проекцій швидкостей на вісі координат. Визначаємо проекції швидкостей v_1 і v_2 з урахуванням фази обкату φ :

$$v_1^x(\varphi) = e \cdot \omega_1 \cdot \cos\varphi; \quad v_2^x(\varphi) = R_{ц.ц.} \cdot \frac{\omega_1}{z_2} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right), \quad (3.6)$$

$$v_1^y(\varphi) = e \cdot \omega_1 \cdot \sin\varphi; \quad v_2^y(\varphi) = R_{ц.ц.} \cdot \frac{\omega_1}{z_2} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{z_2}\right). \quad (3.7)$$

Вектори знайдених проекцій лежать на спільних координатних осях, а отже, знайдемо їх суми:

$$\Sigma v^x(\varphi) = v_1^x(\varphi) + v_2^x(\varphi) = e \cdot \omega_1 \cdot \cos\varphi + R_{ц.ц.} \cdot \frac{\omega_1}{z_2} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{z_2}\right), \quad (3.8)$$

$$\Sigma v^y(\varphi) = v_1^y(\varphi) + v_2^y(\varphi) = e \cdot \omega_1 \cdot \sin\varphi + R_{ц.ц.} \cdot \frac{\omega_1}{z_2} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{z_2}\right). \quad (3.9)$$

Визначивши всі складові, знаходимо результуючий модуль швидкості, одночасно виконуючи спрощення виразу:

$$\begin{aligned} V(\varphi) &= \sqrt{(\sum v^x(\varphi))^2 + (\sum v^y(\varphi))^2} = \\ &= 2\pi \cdot \frac{n_{ex.}}{z_2} \cdot \sqrt{R_{у.ц.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{у.ц.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Далі необхідно визначити швидкість переміщення точки контакту цівки з еквідистантою до епіциклоїдальної траєкторії. Розглянемо рухи відносного обкату профілів у верстатному зачепленні (рис. 3.3). Якщо розглядати рух цівки відносно нерухомого інструменту, то точка контакту переміщується уздовж еквідистанти до епіциклоїди зі швидкістю $V_1(\varphi)$. Але відносно нерухомої цівки та ж сама точка здійснює рух у протилежному напрямку, уздовж її дуги зі швидкістю $V_2(\varphi)$, при цьому $V_1(\varphi) \neq V_2(\varphi)$. В залежності від системи відліку, точка контакту переміщується одночасно уздовж еквідистанти і дуги цівки з різними швидкостями. Знайдемо $V_1(\varphi)$ і $V_2(\varphi)$. Очевидно, що напрями $V_1(\varphi)$ і $V_2(\varphi)$ завжди співпадатимуть з дотичною в точці контакту еквідистанти до епіциклоїди і цівки. Для визначення $V_1(\varphi)$ знову скористаємось формулою зв'язку поступальної і кутової швидкостей. Припустимо, що радіуси кривизни $\rho(\varphi)$ в точках A_1, A_2, A_3, A_4 , є миттєвими радіусами обертання цих точок. Тоді кутові швидкості обертання цих точок і точок $A_1^1, A_2^1, A_3^1, A_4^1$, які лежать на спільних миттєвих радіусах обертання будуть рівними і визначатимуться за формулою:

$$\omega_\rho(\varphi) = \frac{V(\varphi)}{\rho(\varphi)} = \frac{V_1(\varphi)}{\rho_{екв.}(\varphi)}. \quad (3.11)$$

Звідси визначаємо першу шукану швидкість $V_1(\varphi)$:

$$V_1(\varphi) = \frac{V(\varphi) \cdot (\rho(\varphi) - r_u)}{\rho(\varphi)}. \quad (3.12)$$

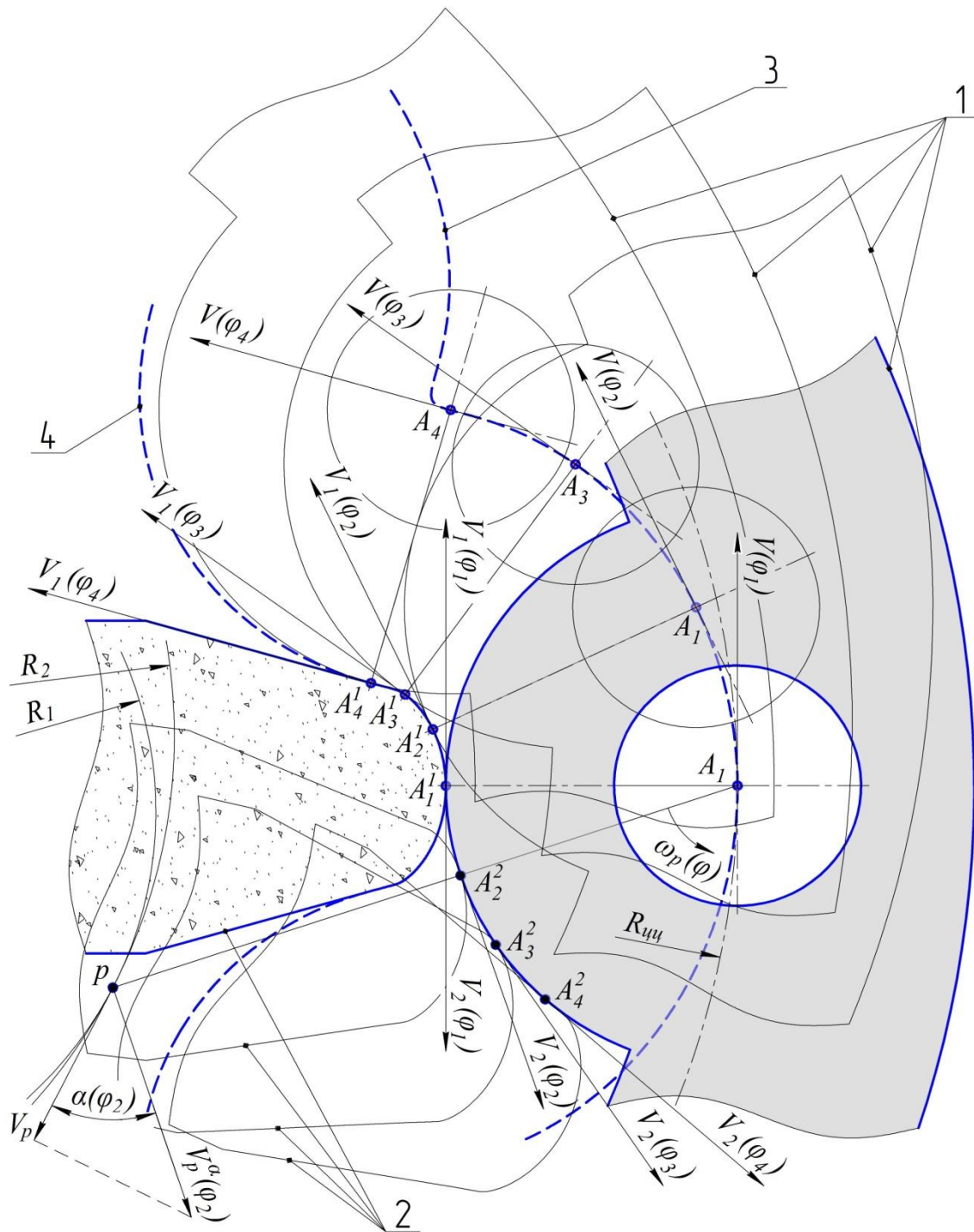


Рис. 3.3 Схема відносних переміщень цівки і інструменту

1 – положення цівкового колеса в різних фазах обкату; 2 – положення шліфувального круга в різних фазах обкату відносно цівки; 3 – траєкторія переміщення центру цівки (епіциклоїда); 4 – еквідистанта до епіциклоїди; $V(\varphi)$ – миттєва швидкість переміщення центру цівки уздовж циклоїдальної кривої; $V_1(\varphi)$ – миттєва швидкість переміщення точки контакту уздовж еквідистанти до циклоїдальної кривої; $V_2(\varphi)$ – миттєва швидкість переміщення точки контакту уздовж дуги постійного радіусу; V_p – поступальна швидкість переміщення полюса p зачеплення центроїд R_1 і R_2 ; $V_p^\alpha(\varphi)$ – проекція швидкості V_p ; $\alpha(\varphi)$ – проєктивний кут між напрямками швидкостей V_p і $V_p^\alpha(\varphi)$; $\omega_p(\varphi)$ – кутова швидкість обертання відрізка (між центром дуги і полюсом зачеплення) навколо центру дуги цівки

Другу швидкість $V_2(\varphi)$ визначаємо використовуючи закономірність, що нормаль в точці контакту завжди проходить через полюс зачеплення p центроїд R_1 і R_2 (теорема Вілліса). Поступальна швидкість V_p полюсу p уздовж центроїди R_1 буде визначатися як $\omega_1 \cdot R_1$, а швидкість $V_p^\alpha(\varphi)$ визначатиметься як добуток $V_p \cdot \cos(\alpha(\varphi))$. Кут $\alpha(\varphi)$ між напрямом швидкості V_p і перпендикуляром до відрізка A_1p , знаходимо за теоремами синусів і косинусів:

$$\alpha(\varphi) = \arcsin \left(\frac{R_{ц.ц.} \cdot \sin\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}{\sqrt{R_{ц.ц.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{ц.ц.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}} \right). \quad (3.13)$$

Вираз в знаменнику (3.13) виражає довжину відрізка A_1p , яка в залежності від положення полюсу p змінює значення. Перепишемо формулу для знаходження швидкості $V_p^\alpha(\varphi)$:

$$V_p^\alpha(\varphi) = R_1 \cdot \omega_1 \cdot \cos(\alpha(\varphi)). \quad (3.14)$$

Отримавши швидкість $V_p^\alpha(\varphi)$ і знаючи довжину відрізка A_1p у відповідній фазі обкату, визначаємо кутову швидкість $\omega_p(\varphi)$ повороту відрізка A_1p відносно центру цівки A_1 :

$$\omega_p(\varphi) = \frac{V_p^\alpha(\varphi)}{\sqrt{R_{ц.ц.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{ц.ц.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}. \quad (3.15)$$

Формула для визначення другої швидкості обкату $V_2(\varphi)$ буде мати вигляд:

$$|V_2(\varphi)| = \omega_p(\varphi) \cdot r_{ц.}. \quad (3.16)$$

Значення швидкості знайдене за формулою (3.16), позначене у вигляді модулю, так як завжди являтиме абсолютне додатне значення, яке не враховує знак, тобто напрямок руху. Однойменність знаків $V_1(\varphi)$ і $V_2(\varphi)$ свідчить про те, що має місце попутний обкат профілів (вектори швидкостей направлені в

однаковому напрямку уздовж дотичної), а різнойменні знаки свідчать про зустрічний обкат. Значення швидкості, яке враховує напрямок руху точки контакту уздовж дуги цівки буде визначатись за наступною формулою:

$$V_2(\varphi) = V_1(\varphi) - V(\varphi) - \delta_0 \quad (3.17)$$

$$\delta_0 = V_1(\varphi_0) - |V_2(\varphi_0)| - V(\varphi_0), \varphi_0 = 0 \quad (3.18)$$

За знайденими формулами були побудовані графіки залежності швидкостей $V(\varphi)$, $V_1(\varphi)$, $|V_2(\varphi)|$, $V_2(\varphi)$, які представлені на рис. 3.4. Графіки мають вигляд циклічних кривих, з чітко вираженими екстремумами, що вказує на різке прискорення точки контакту в певних фазах. Значення $V_1(\varphi)$ завжди додатне, що вказує на постійний напрямок руху точки контакту уздовж еквідистанти. За отриманою формулою (3.12) можна зробити висновок, що характер зміни швидкості $V_1(\varphi)$ обумовлений кривизною еквідистанти до епіциклоїди, що відображається в схожості графіків $V_1(\varphi)$ і радіуса кривизни $\rho(\varphi)$ (рис. 2.2). При шліфування кругом з профілем на основі ОДЄЕ відсутні різкі прискорення точки контакту, що створює сприятливі умови для обробки.

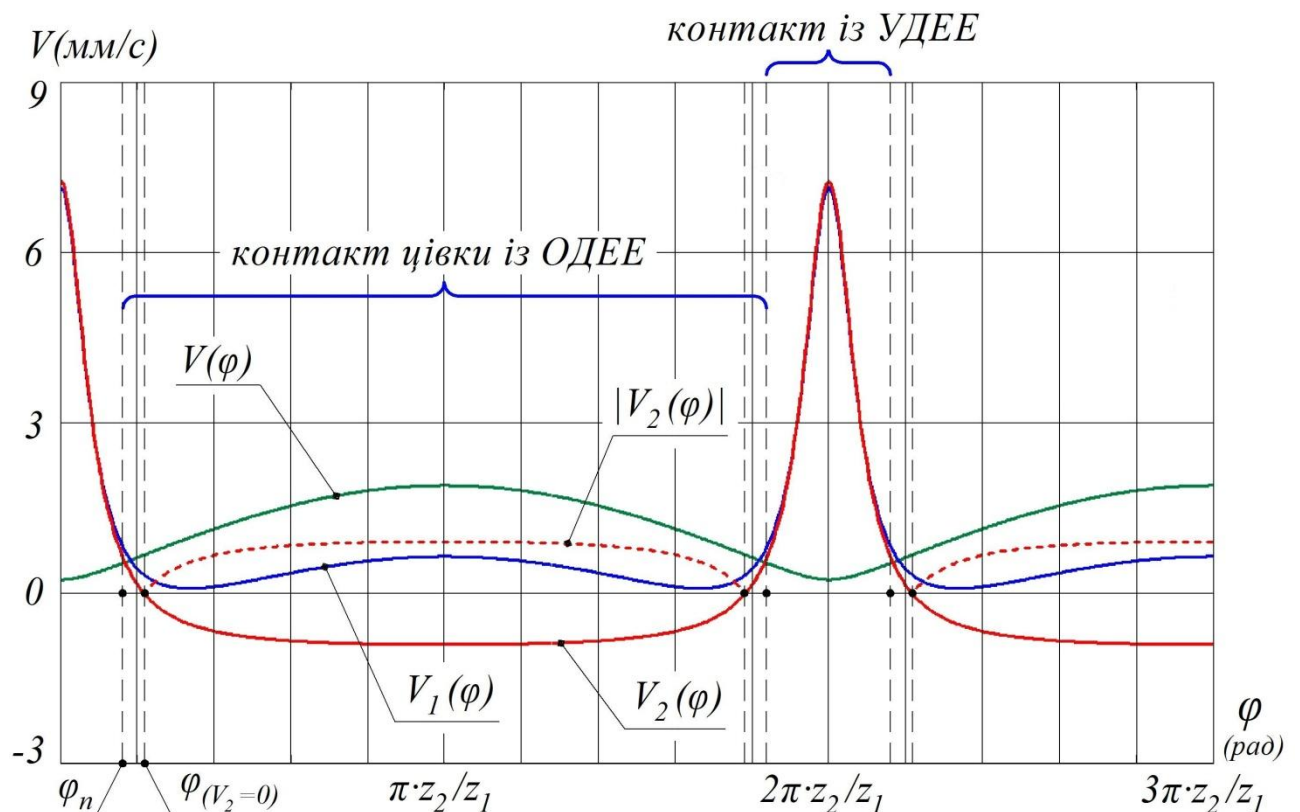


Рис. 3.4 Графіки зміни швидкостей $V(\varphi)$, $V_1(\varphi)$, $|V_2(\varphi)|$, $V_2(\varphi)$

На протязі періоду контакту цівки з ОДЕЕ, швидкість $V_2(\varphi)$ двічі змінює знак. Період $[\varphi_n; \varphi_{(V_2=0)}]$ попутного обкату змінюється періодом $[\varphi_{(V_2=0)}; 2\pi \cdot \frac{z_2}{z_1} - \varphi_{(V_2=0)}]$ зустрічного, де значення $V_1(\varphi)$ завжди додатне, а $V_2(\varphi)$ – від’ємне. Значення перехідної фази $\varphi_{(V_2=0)}$ отримуємо, прирівнявши вираз (3.16) до нуля і розв’язавши отримане рівняння відносно φ :

$$\varphi_{(V_2=0)} = \frac{z_2}{z_1} \cdot \arccos\left(\frac{R_2}{R_{ц.ц.}}\right) \quad (3.19)$$

Для контакту з УДЕЕ характерно стрімке зростання обох швидкостей і аналогічний стрімкий спад. Досліджуючи функції швидкостей, можна визначити їх екстремуми:

- для ОДЕЕ $V_1^{max} = V_1(\pi \cdot z_2 / z_1)$ і $V_2^{max} = V_2(\pi \cdot z_2 / z_1)$;
- для УДЕЕ $V_1^{max} = V_1(0)$ і $V_2^{max} = V_2(0)$.

Актуальним буде дослідити залежність екстремумів V_1^{max} і V_2^{max} від частоти $n_{ex.}$, яка визначатиме продуктивність процесу шліфування. Графіки таких залежностей, отримані на основі формул для визначення швидкостей, представлені на рис. 3.5 і демонструють прямопропорційний лінійний зв’язок між наведеними параметрами.

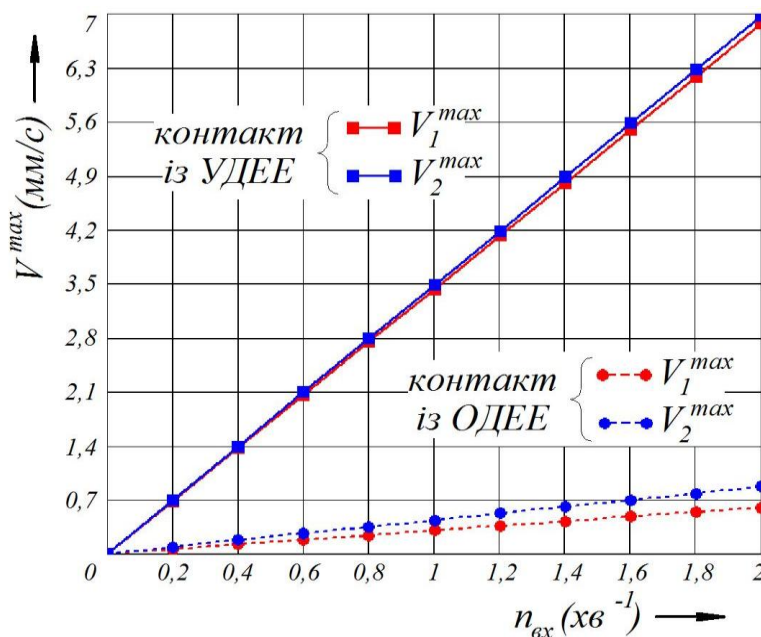


Рис. 3.5 Графіки залежності екстремальних значень V_1^{max} і V_2^{max} від частоти $n_{ex.}$

В результаті проведеного дослідження стає очевидним, що довжина дуги прошліфованої ділянки цівки за один подвійний хід інструмента (так звана подача на подвійний хід) не буде постійною. Колова подача $S_{n.x.}(\varphi)$ буде змінюватись за відповідним законом, пропорційно швидкості $V_2(\varphi)$ і визначатиметься за формулою:

$$S_{n.x.}(\varphi) = \frac{60 \cdot |V_2(\varphi)|}{V_{з.н.}}, \quad (3.20)$$

де $V_{з.н.}$ – швидкість зворотно-поступальних рухів (осциляції) інструменту.

Формула (3.20) виражає пропорційну залежність – збільшення швидкості обкату веде за собою збільшення $S_{n.x.}(\varphi)$ в будь-якій фазі обкату. Така зміна подачі буде призводити до зміни параметрів точності і шорсткості поверхні. Досягти постійності подачі на подвійний хід можливо шляхами адаптивної зміни режимів різання, або лінеаризації швидкості обкату.

Лінеаризація передбачає виконання умов $V_1(\varphi) = const$, $|V_2(\varphi)| = const$. Лінеаризація швидкості $V_1(\varphi)$ буде актуальною для обробки профілю сателіту, $|V_2(\varphi)|$ – для цівкового колеса. Для цього, частоту $n_{ex.}$ необхідно задавати вигляді функції лінеаризації $n_{ex.}(\varphi)$. Для її визначення, із формул (3.12) (3.16) необхідно вилучити значення $n_{ex.}$. При цьому формули (3.12) і (3.16) прирівнюються до постійних величин V_1 і V_2 , які обираються в залежності від бажаного значення подачі $S_{n.x.}$ (наприклад, для значення $S_{n.x.} = 0,1$ мм/п.х., при $V_{з.н.} = 50$ п.х./хв, необхідно задати значення $V_2 = 0,083$ мм/с). В результаті розв'язку отриманих рівнянь, знайдена частота буде мати вигляд залежності $n_{ex.}(\varphi)$. Вирішуючи рівняння для швидкостей $V_1(\varphi)$ і $|V_2(\varphi)|$ відносно $n_{ex.}$, знаходимо функції частот для лінеаризації:

$$n_{ex.}^1(\varphi) = \frac{30 \cdot V_1 \cdot z_2 \cdot \rho(\varphi)}{\pi \cdot (\rho(\varphi) - r_u) \cdot \sqrt{R_{у.у.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{у.у.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}, \quad (3.21)$$

$$n_{ex.}^2(\varphi) = \frac{30 \cdot z_2 \cdot V_2 \cdot \sqrt{R_{u.y.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{u.y.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}{2\pi \cdot r_y \cdot R_2 \cdot z_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{R_{u.y.}^2 \cdot \sin\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)^2}{R_{u.y.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{u.y.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}}}. \quad (3.22)$$

Знайдені функції $n_{ex.}^1(\varphi)$ і $n_{ex.}^2(\varphi)$ замість $n_{ex.}$ підставляємо у формули (3.12) і (3.16). Залежності $V_1(\varphi)$ і $|V_2(\varphi)|$ після такої підстановки будуть враховувати функції лінеаризації. Графіки лінеаризованих функцій представлені на рис. 3.6, для довільного значення $V = 5$ мм/с.

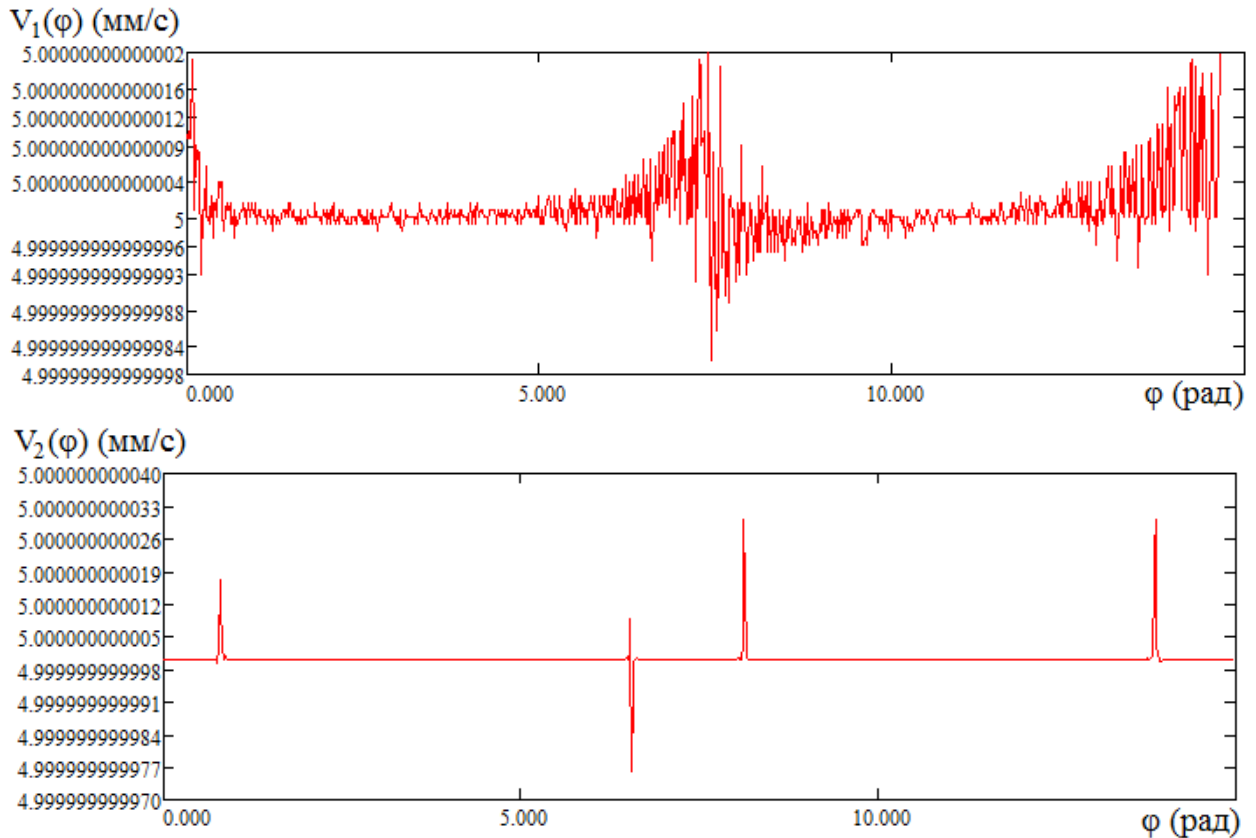


Рис. 3.6 Графіки швидкостей $V_1(\varphi)$ і $|V_2(\varphi)|$ після лінеаризації

Візуально отримані графіки відрізняються від лінійних завдяки збуренням, викликаних масштабом вертикальної вісі. Враховуючи те, що розмах відхилення від номінальної швидкості 5 мм/с, не перевищує $2 \cdot 10^{-14}$ мм/с для $V_1(\varphi)$ і $4 \cdot 10^{-12}$ для $|V_2(\varphi)|$, такі малі значення відхилень свідчать про лінійність наведених функцій.

Впровадження принципу лінеаризації потребує спеціальних технологічних можливостей обладнання та спеціальних опцій програмування в системах ЧПК. Для оцінки дієвості методу лінеаризації, необхідна експериментальна перевірка представлених теорій.

3.3 Дослідження просторової кінематики контактної взаємодії шліфувального круга з оброблюваною цівкою

Характер взаємодії інструмента та шліфованої поверхні визначає просторова кінематика їх взаємного контакту, яка є результатом узгоджених рухів формоутворення. Результатом цієї взаємодії є крива формоутворення, яка кінематично породжується на оброблюваній поверхні деталі, при цьому наглядно демонструє результат процесу формоутворення. Це траєкторія точки контакту інструменту з цівкою, яка у вигляді сліду генерується на циліндричній поверхні. Уздовж цієї траєкторії знімається припуск, утворюючи нову поверхню. Крива також буде визначати структуру ліній шорсткості.

Аналітичний опис кривої не враховує жорсткість технологічної системи, стійкість інструменту та температурні процеси. Розглядається точковий контакт інструмента і циліндричної поверхні цівки. Просторова взаємодія враховує осцилюючі рухи інструмента в площині, паралельній вісі цівкового колеса. Тому крива формоутворення матиме вигляд кривої синусоїдальної форми – графіку коливань інструмента, відображеного на циліндричній поверхні, яку можна представити у вигляді вектор-функції трьох компонентів $\Psi = F(X; Y; Z)$. На рис. 3.7, показана схема просторової контактної взаємодії під час здійснення базового методу шліфування, де зображена крива формоутворення Ψ , взаємодія шліфувального круга з цівковим колесом і схема знімання припуску. Вхідними параметрами, які матимуть вплив на криву є n_{ax} , та швидкість зворотно-поступального руху $V_{z.n.}$. Амплітуда коливань інструменту A задається з урахуванням висоти деталі та перебігу інструменту

під час його виходу за межі шліфованої поверхні. Період коливань кривої формоутворення – змінна колова подача $S_{n.x.}(\varphi)$.

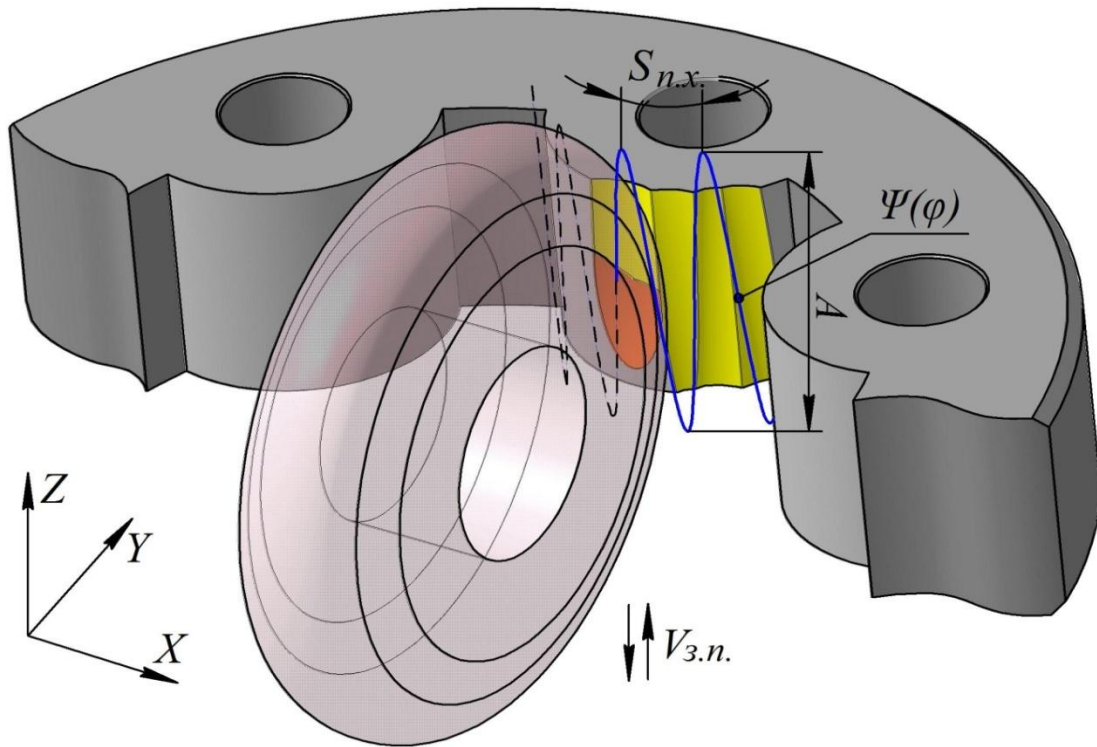


Рис. 3.7 Схема генерації кривої формоутворення в процесі шліфуванні внутрішнього профілю цівкового колеса в умовах обкату

Дослідивши закони руху точки контакту на площині в п. 3.2, можна одразу записати систему рівнянь, що описує криву формоутворення, додавши координату Z , яка змінює свої значення за законом тригонометричної функції:

$$\Psi(\varphi) = \begin{pmatrix} X(\varphi) = r_u \cdot \cos(\alpha(\varphi)) \\ Y(\varphi) = r_u \cdot \sin(\alpha(\varphi)) \\ Z(\varphi) = A \cdot \sin\left(\varphi \cdot \frac{V_{з.п.}}{n_{ex.}}\right) \end{pmatrix}, \quad (3.23)$$

де $\alpha(\varphi)$ – кут що визначається за формулою (3.13).

За формулою (3.23) були побудовані тривимірні графіки $\Psi(\varphi)$, для трьох значень $n_{ex.}/V_{з.п.}$ (2/45; 1,5/60; 1/80), які наведені в таблиці 3.2. Також було проведено моделювання генерації кривої формоутворення в додатку SOLIDWORKS Motion, яке підтвердило правильність отриманих результатів.

Таблиця 3.2

Крива формоутворення для різних значень $n_{\text{ex.}}/V_{3.п.}$

№ n/n	$n_{\text{ex.}}/V_{3.п.}$	Крива формоутворення	
		Шліфування інструментом з профілем на основі ОДЕЕ	Шліфування інструментом з профілем на основі УДЕЕ
1	2/45		
2	1,5/60		
3	1/80		

В горизонтальній площині XU , функція (3.23) одночасно описуватиме профіль цівки, а у вертикальній, координата Z описуватиме осцилюючий рух точки контакту на боковій поверхні цівки. Згідно отриманих даних, зі збільшенням значення $n_{ex.}/V_{z.n.}$, зменшується число подвійних ходів інструменту на одиницю довжини дуги цівки, що наглядно ілюструє характерна зміна $\Psi(\varphi)$. Ця закономірність підтверджується результатами досліджень в п. 3.2. Порівняння впливу форми профілю круга опукла-увігнута на криву формоутворення, також наглядно ілюструється графіками. Для профілю на основі УДЕЕ, період коливань кривої значно більший (в z_1 разів), ніж для ОДЕЕ, при однакових значеннях $n_{ex.}/V_{z.n.}$. Цей факт теж можна пояснити результатами досліджень п. 3.2, згідно яких, спостерігається значне збільшення швидкості обкату під час взаємодії цівки з УДЕЕ. Попри значне збільшення подачі, результати моделювання п. 2.3 свідчать про мінімальний вплив наведеного зростання швидкості на шорсткість обробки. Графік функції $\Psi(\varphi)$ можна трактувати як формалізовану модель процесу формоутворення циліндричної поверхні цівки. Дана модель наглядно демонструє сутність процесу шліфування цівкового колеса в умовах обкату, враховує режими обробки та геометрію профілю інструменту.

3.4 Аналіз силових факторів в зоні контакту шліфувального круга з поверхнею цівки, що породжують пружні деформації технологічних елементів оснащення

Точність отримання заданих розмірів, форми та розташування геометричних елементів деталі залежить від багатьох факторів, одним з яких є пружні деформації технологічних елементів. На їх значення буде впливати жорсткість елементів технологічної системи та значення сил різання, які є причиною їх виникнення. Процес шліфування профілю цівкового колеса здійснюється за допомогою консольної оправки з виносним шпинделем.

З точки зору жорсткості елементів технологічної системи, найбільш піддатливою її ланкою буде саме ця оправка. Це пояснюється конструктивними обмеженнями її розмірів у поперечному перерізі, консольним закріпленням та сприйняттям пікових значень згинальних моментів від сил різання. Жорсткість пристрою для відтворення руху обкату також буде мати вплив на точність. В той же час, компоновка цього пристрою не має конструктивних обмежень, що обумовлені особливостями здійснення методу шліфування, тому другий розглянутий вплив братись до уваги не буде.

В значній мірі жорсткість оправки буде залежати від її конструктивного виконання (спосіб кріплення, форма поперечного перерізу, довжина вильоту, наявність отворів або порожнистостей, матеріал деталей). Тому форму поперечного перерізу оправки найдоцільніше прийняти круглу, як таку, що однаково сприймає радіальні навантаження. Наступним фактором окрім жорсткості оправки, як вже відмічалось, будуть сили різання. Враховуючи динаміку методу шліфування, значення цих сил та їх вектори не будуть постійними, про що свідчать результати досліджень в п. 3.2, 3.3.

Для більш детального уявлення, розглянемо схему дії сил при шліфуванні цівкового колеса, представлену на рис 3.8. В процесі обробки оправка піддається циклічній дії навантажень. З моменту врізання і до моменту виходу круга оправка знаходиться в пружно-деформованому стані (положення 4). Під час виходу круга за межі висоти цівкового колеса (перебігу) оправка пружно повертається у початкове положення 3. Складові сили різання P_x , P_y і P_z будуть мати певну просторову орієнтацію залежно від фази обкату. Напрямок складової P_z буде знакозмінним і співпадатиме з напрямком зворотно-поступальних рухів оправки. Напрями складових P_x і P_y співпадатимуть з напрямками дотичної та нормалі до профілю круга і цівкового колеса в точці контакту, при цьому напрям складової P_y буде завжди спрямований в центр цівки. Відповідно, коливання значення радіуса цівки r_u , похибки форми в повздовжньому та поперечному перерізах будуть залежати від радіальної

складової P_y , яка породжує пружний відтиск Δy інструмента від заготовки в радіальному (нормальному) напрямку.

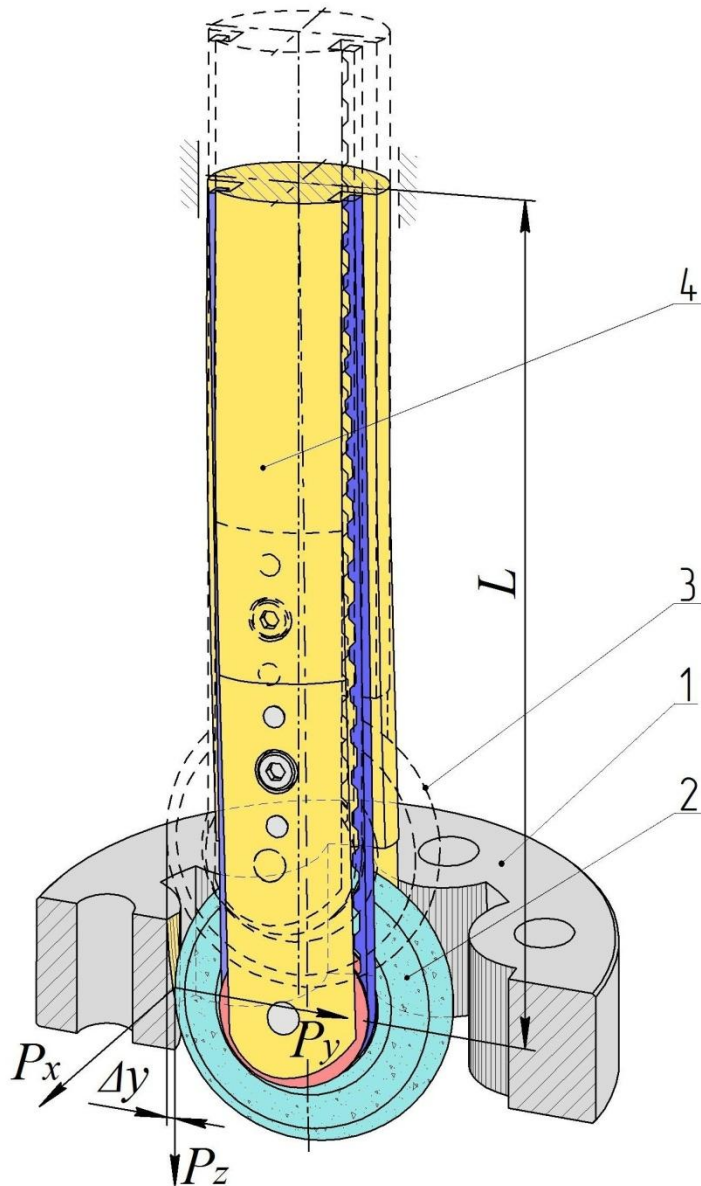


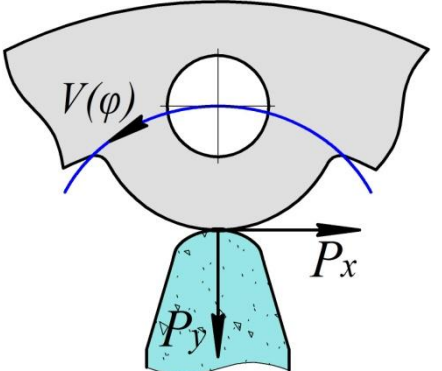
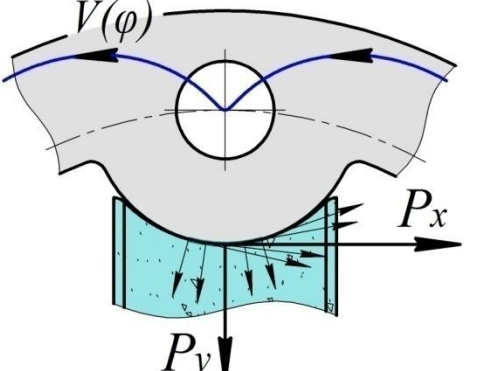
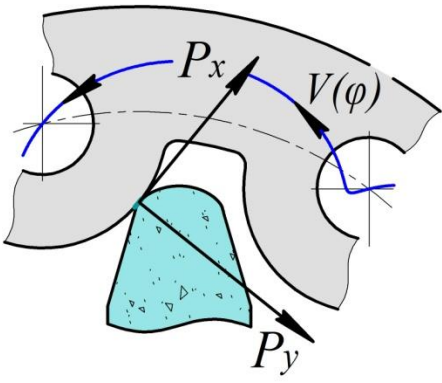
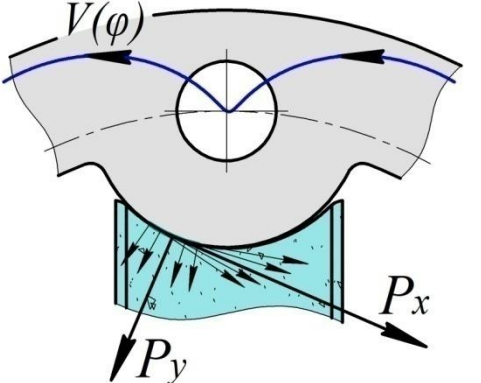
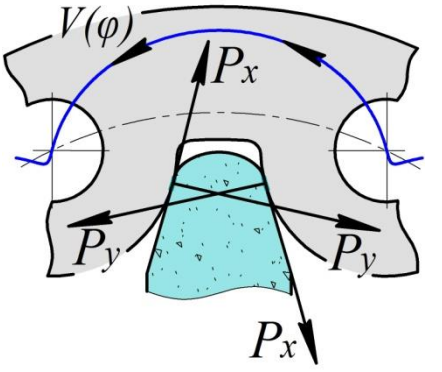
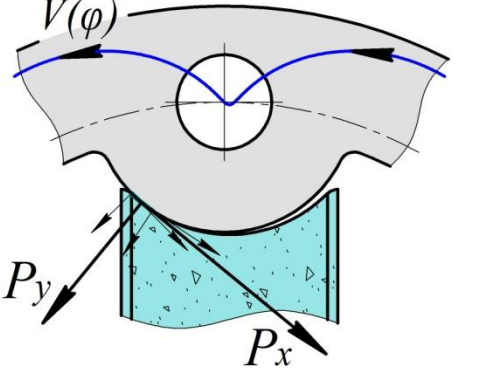
Рис. 3.8 Просторова схема дії складових сили різання, породжених в результаті контакту круга з поверхнею цівки

- 1 – цівкове колесо;
- 2 – шліфувальний круг;
- 3 – положення шліфувальної оправки без навантаження;
- 4 – положення шліфувальної оправки у відігнутому положенні (під дією сил)

Довжина вильоту L від місця фіксації оправки до горизонтальної площини, в якій лежить вектор радіальної складової P_y , є плечем згинального моменту від P_y . Відповідно значення L також матиме вплив на Δy . Під час проектування оправки, довжину L необхідно обирати з урахуванням її впливу на похибку обробки. Окремий вплив на точність обробки буде мати форма профілю круга опукла-увігнута. Розглянемо схеми дії складових сили різання в горизонтальній площині в різних фазах обкату (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3.

Схема дії складових сили різання в різних фазах обкату

№ n/n	Фаза обкату	Обробка інструментом з профілем на основі ОДЕЕ	Обробка інструментом з профілем на основі УДЕЕ
1	0		
2	$3\pi/2$		
3	π		

В положенні №3, коли точка контакту відповідає граничній точці активної дуги цівки, профіль на основі ОДЕЕ контактує з двома цівками одночасно. Обробка кругом з профілем на основі УДЕЕ відрізняється значно більшою довжиною задіяних в роботі ділянок профілів. Незалежно від форми профілю круга, напрямок дії складових P_x і P_y буде визначатися фазою обкату, що впливатиме на величину деформації Δy . На величину P_y також впливатиме змінна швидкість обкату $V_2(\varphi)$, обумовлена нерівномірною кривизною

еквідистанти до епіциклоїди.

В результаті проведеного аналізу технологічної системи та механізму дії сил при шліфуванні профілю цівкового колеса, постає необхідність у визначенні сил і значень пружних відтисків Δu в різних фазах обкату. Це дасть змогу попередньо спрогнозувати відхилення профілю цівки від номінального.

3.5 Моделювання пружних відтисків інструменту, що виникають в процесі шліфування цівкового колеса під дією радіальної складової сили різання

Окрім динамічної зміни напрямку радіальної складової P_y , є всі підстави очікувати зміни її значення по модулю. На користь цього припущення опосередковано вказують результати досліджень в п. 2,3 3.2, 3.3. Подібне коливання сил спричинить порушення стабільності умов різання на протязі технологічного циклу обробки. Щоб встановити як впливатимуть зазначені коливання на точність обробки, першочергово необхідно обчислити значення радіальної складової P_y , для подальшого моделювання пружної деформації оправки з інструментом.

Розрахунок складової сили різання P_y проводимо за методикою С. М. Корчака [37] для одиничного зерна. Згідно цієї методики, складова P_y^o складається з двох компонентів – сили від нормальних напружень пластичної деформації P_y^s і сили тертя металу по граням зерна P_y^f :

$$P_y^o = P_y^s + P_y^f . \quad (3.24)$$

Під час шліфування певної ділянки, коли задіяна m -кількість абразивних зерен, складова сил різання P_y буде визначатись як сума складових P_y^s і P_y^f від кожного задіяного в роботі одиничного зерна:

$$P_y = \sum_{i=1}^m P_{y_i}^o = \sum_{i=1}^m [P_{y_i}^s + P_{y_i}^f] . \quad (3.25)$$

Згідно моделі (3.24) для радіальної складової сили різання одиничним зерном, формули для визначення P_y^s і P_y^f матимуть вигляд:

$$P_y^s = \sqrt{3,25} \cdot a \cdot \tau_s \cdot \frac{\sin \beta}{\sin \beta_1}, \quad P_y^f = 0,5 \cdot l_3 \cdot \tau_s \quad (3.26)$$

де a – товщина зрізу одиничним зерном;

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, $\tau_s = (\sigma_i)_{gp} / \sqrt{3}$, де $(\sigma_i)_{gp}$ – граничне напруження руйнування, яке можна визначити за допомогою експериментальної залежності інтенсивності напружень σ_i від швидкості деформації ε_i [37, 105];

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

Розглядаючи силу різання під час шліфування ділянки певної площі, як суму сил від окремих абразивних зерен, рівномірно розподілених по поверхні цієї ділянки, виникає необхідність в обчисленні значень контактних площ. Той факт, що в кожній точці профілів на основі еквідистанти до епіциклоїди радіус кривизни і діаметр будуть змінюватись, дозволяє зробити висновок про зміну площі контакту між взаємодіючими поверхнями в процесі обкату.

Кількість задіяних в роботі зерен круга буде дорівнювати добутку миттєвої площі контакту ΔF круга із заготовкою і величини поверхневої концентрації зерен шліфувального круга k_F . Фаза обкату буде визначатись кутовим параметром φ , тому кількість зерен m і площа контакту ΔF є функції від φ :

$$m(\varphi) = \Delta F(\varphi) \cdot k_F. \quad (3.27)$$

Площа контакту $\Delta F(\varphi)$ була обчислена в CAD-системі SOLIDWORKS, оскільки її аналітичне визначення ускладнене. Ділянку контакту отримуємо шляхом обертання двовимірного профілю інструменту навколо власної вісі.

Тіло інструменту отримане обертанням, заглиблюється в тіло заготовки, згідно значення глибини різання. Ділянка перетину об'ємів твердотільних моделей видаляється, утворюючи нову поверхню – виріз обертанням. За допомогою спеціальних функцій аналізу моделей, маємо можливість здійснити обмір площі отриманої поверхні. Схема імітації обкату і визначення площі контакту представлена на рис. 3.9. Обчислення виконувалось для трьох значень глибини різання – 0,10 мм; 0,125 мм; 0,15 мм.

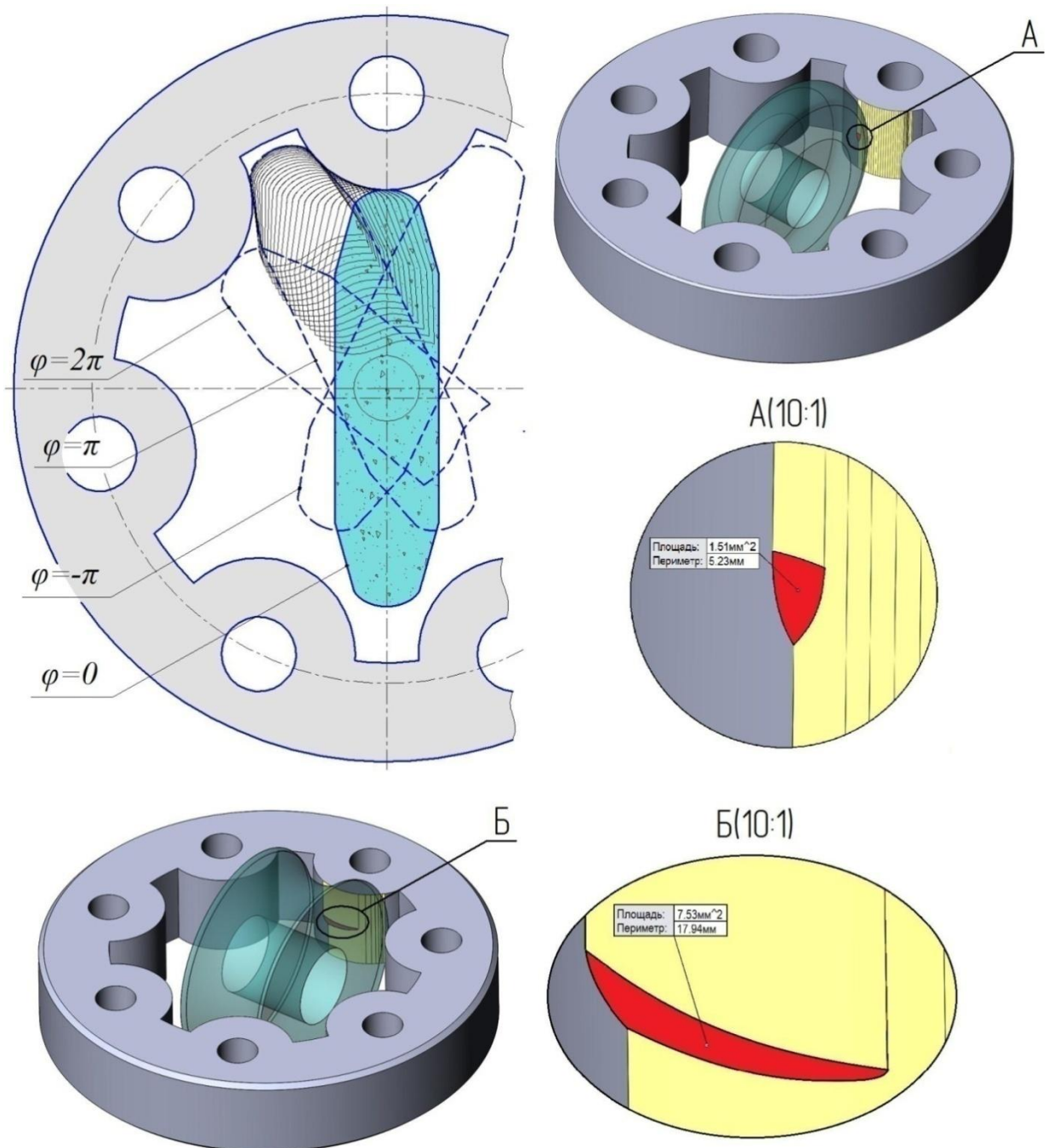


Рис. 3.9 Імітація контакту шліфувального круга з цівковим колесом в різних кутових фазах і визначення площі контакту в середовищі SOLIDWORKS

Приведена модель не повністю враховує специфіку методу шліфування, а саме параметри $S_{n.x.}(\varphi)$, $V_{з.п.}$, а також зміну діаметру $D_{ш.к.}(\varphi)$. Як зазначалось, профілі на основі еквідистанти до епіциклоїди характеризуються зміною діаметру інструменту в точці контакту. Відповідно і швидкість різання як функція діаметру шліфувального круга, буде змінюватись. Для того щоб модель (3.25) враховувала ці зміни, приймемо допущення, що товщина зрізу одиничним зерном a буде приблизно рівна подачі на зерно S_i (по аналогії з подачею на зуб при фрезеруванні), тобто $a \cong S_i$. З урахуванням зміни діаметру $D_{ш.к.}(\varphi)$, подача на зерно визначатиметься за формулою:

$$S_i = \frac{S_{об.}}{m(D_{ш.к.}(\varphi))}, \quad (3.28)$$

де $S_{об.}$ – подача на один оберт круга, мм/об;

$m(D_{ш.к.}(\varphi))$ – кількість зерен уздовж кола змінного діаметру $D_{ш.к.}(\varphi)$;

Якщо за час одного подвійного ходу інструменту величина подачі складає $S_{n.x.}(\varphi)$, то за час одного його обертину подача буде дорівнювати:

$$S_{об.}(\varphi) = \frac{S_{n.x.}(\varphi) \cdot V_{з.п.}}{n_{ш.к.}}, \quad (3.29)$$

де $n_{ш.к.}$ – частота обертання круга, $хв^{-1}$;

Беручи до уваги формулу (3.20), перепишемо значення $S_{об.}(\varphi)$:

$$S_{об.}(\varphi) = \frac{60 \cdot |V_2(\varphi)|}{n_{ш.к.}}. \quad (3.30)$$

Кількість зерен m уздовж кола діаметром $D_{ш.к.}(\varphi)$ є добуток довжини дуги цього кола і лінійної концентрації зерен k_L :

$$m(D_{ш.к.}(\varphi)) = \pi \cdot D_{ш.к.}(\varphi) \cdot k_L = 2\pi \cdot (\xi(\varphi) - b) \cdot k_L. \quad (3.31)$$

де b – розмір, що визначає відстань між віссю круга і віссю обкату.

Лінійна (k_L), поверхнева (k_F) і об'ємна концентрація (k_V) абразивних зерен будуть виражатися наступними формулами:

$$k_L = \frac{n}{L}; \quad k_F = \frac{n^2}{F}; \quad k_V = \frac{n^3}{V}. \quad (3.32)$$

Значення об'ємної концентрації можна вирахувати, знаючи зернистість круга, його розміри, та співвідношення абразивного і сполучного компонентів. Лінійну і поверхневу концентрацію визначаємо із співвідношення:

$$k_L = \sqrt{k_F} = \sqrt[3]{k_V} . \quad (3.33)$$

Підставляючи всі знайдені складові у формулу (3.28), маємо товщину зрізу одиничним зерном, яка буде змінюватись залежно від параметру φ , тобто взаємного положення цівкового колеса і круга:

$$a(\varphi) \cong S_i = \frac{60 \cdot |V_2(\varphi)|}{n_{ш.к.} \cdot 2\pi \cdot (\xi(\varphi) \pm b) \cdot k_L} . \quad (3.34)$$

Знак «+» в знаменнику відповідає УДЕЕ, знак «-» – ОДЕЕ. Формула враховує одночасно зміну діаметра круга в точці контакту і зміну кількості зерен уздовж кола змінного діаметру $D_{ш.к.}(\varphi)$. Запишемо формулу для складової P_y , для сумарного різання m -кількістю зерен, яка відповідає миттєвій площі контакту круга $\Delta F(\varphi)$:

$$\begin{cases} P_y(\varphi) = \sum_{i=1}^{m(\varphi)} P_{y_i}^o \cong \left(\frac{1,8 \cdot \tau_s \cdot 60 \cdot |V_2(\varphi)| \cdot \sin \beta}{n_{ш.к.} \cdot 2\pi \cdot (\xi(\varphi) \pm b) \cdot \sqrt[3]{k_V} \cdot \sin \beta_1} + 0,5 \cdot l_3 \cdot \tau_s \right) \cdot m(\varphi), \\ m(\varphi) = \Delta F(\varphi) \cdot k_F. \end{cases} \quad (3.35)$$

Графіки залежності P_y від φ представлені на рис. 3.10. Зміна P_y для ОДЕЕ (рис. 3.10, а) має нестабільний характер з різкими перепадами. Відмічається наявність екстремальних значень P_y на проміжку переходу від однієї цівки до шліфування наступної. Екстремум можна пояснити тим, що в момент переходу, цівка контактує з лінійною ділянкою профілю круга за межами ОДЕЕ, яка має нульову кривизну, що веде за собою різке зростання площі контакту. На проміжку переходу на круг діятимуть дві сили, одна із кривих графіка (позначено синім) іде на спад, доки контакт з попередньою цівкою не розірветься. Натомість інструмент входить в зачеплення з наступною цівкою, породжуючи нову силу, зміни якої відображені червоною кривою. В момент переходу спостерігається стрімке зростання і аналогічний стрімкий спад до нуля, після чого незначне зростання і процес стабілізується.

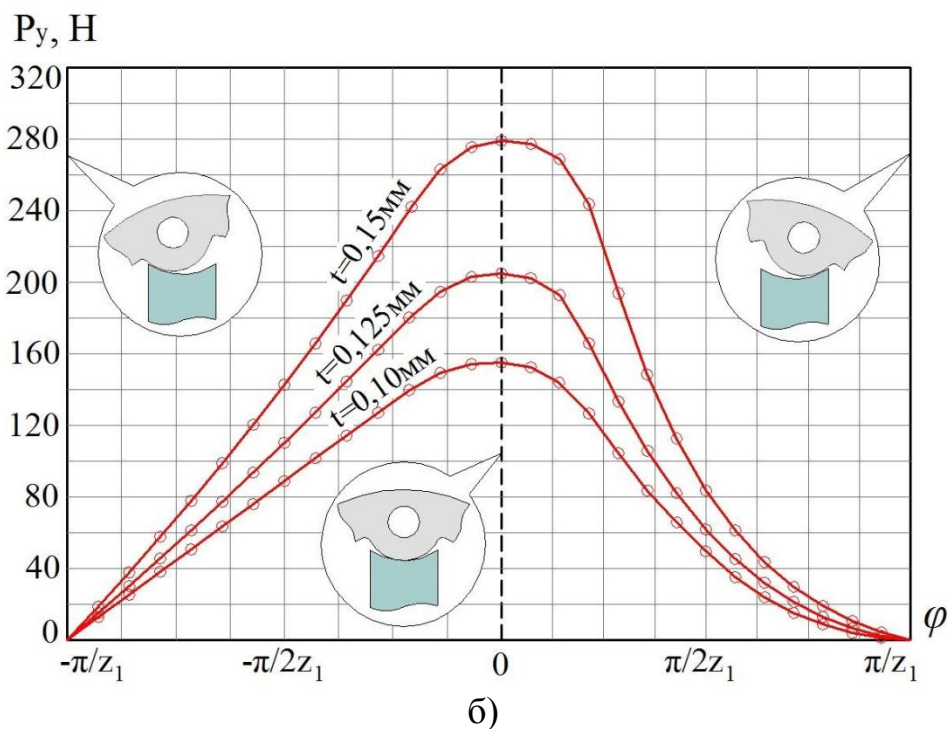
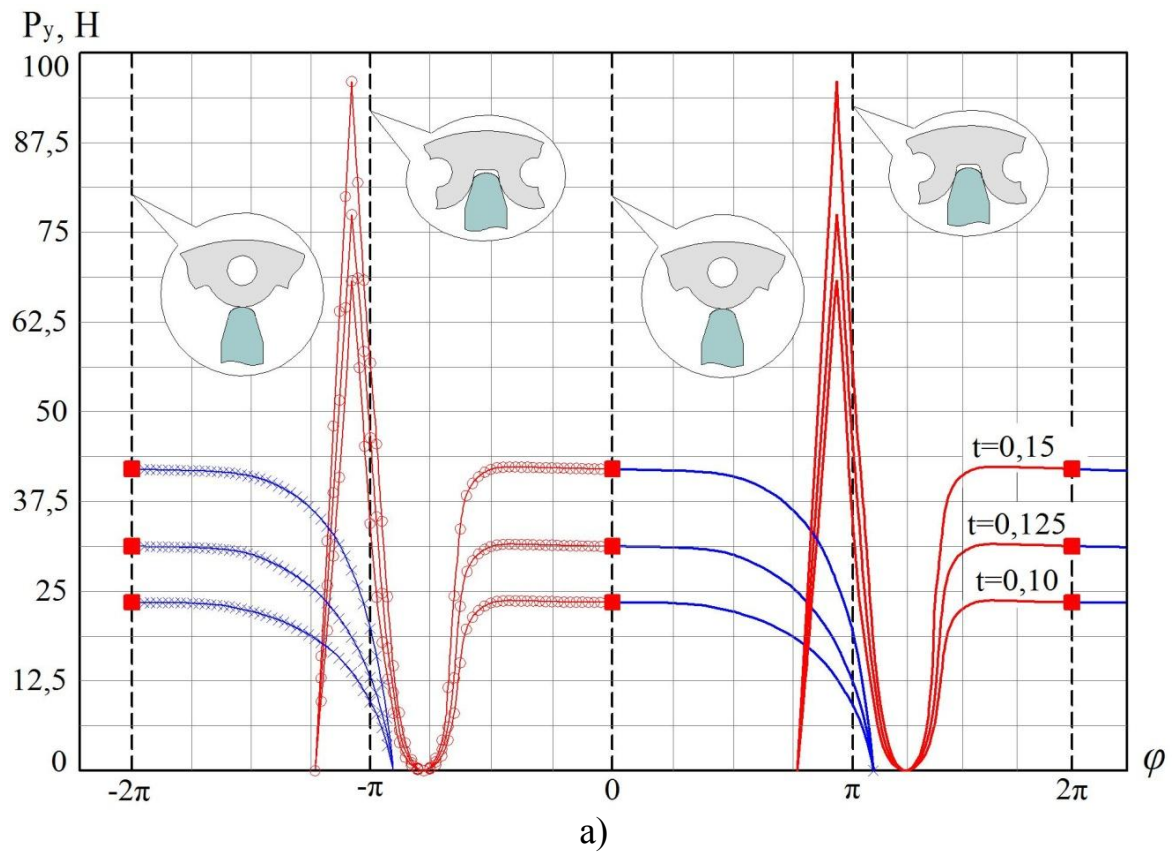


Рис. 3.10 Зміна радіальної складової сили різання P_y в процесі обкату, для трьох значень глибини різання – 0,10 мм; 0,125 мм; 0,15 мм

Силова залежність для обробки кругом з профілем на основі УДЄЕ показана на рис. 4.10, б. Під час входу в контактну фазу з цівкою, починається

поступове шліфування від крайньої точки активної ділянки дуги до симетрично протилежної точки. З моменту врізання в тіло заготовки, складова P_y стрімко зростає, досягає максимуму в центрі дуги, після чого починає спадати. Максимальні значення P_y для профілю на основі УДЕЕ перевищують пікові значення для ОДЕЕ в 3-9 разів. Процес шліфування інструментом з профілем на основі УДЕЕ, як і очікувалось, буде більш навантаженим.

Щоб з'ясувати який вплив матимуть отримані силові залежності на похибку формоутворення, необхідно прикласти отримані сили до інструменту у відповідних кутових фазах і обчислити значення пружних деформацій, порівнюючи їх з величиною допуску. Якщо значення Δu , породжене складовою P_y , не перевищуватиме допуск на розмір або допуск форми, це означатиме, що отримані значення P_y є допустимими.

Для отримання епюри пружних деформацій оправки, було застосовано програмний комплекс COSMOSWORKS (SOLIDWORKS Simulation) для вирішення прикладних задач механіки. Тривимірною моделлю була створена на основі існуючого аналога – шліфувальної оправки для координатно-шліфувального верстата Hauser 5SM. Зазначений програмний комплекс дає змогу отримати значення деформації Δu консольно закріпленої оправки складної конфігурації зі змінним поперечним перерізом. Значення складових $P_y(\varphi)$ для відповідних фаз обкату були прикладені у відповідних точках профілю з координатами $(\xi(\varphi); \eta(\varphi))$ до тривимірної моделі оправки з інструментом. Умови моделювання ідеалізуються, модель круга задається як абсолютно тверде тіло, яке не сприймає деформації. Моделювання не враховує також осциляцію інструменту, моменти його врізання і виходу за межі висоти заготовки. В рамках даного моделювання, похибка профілю цівкового колеса залежатиме лише від сил різання і жорсткості оправки. В результаті отримано епюри зміщення елементів моделі оправки відносно початкового стану спокою, та епюри механічних напружень (Von Mises), які представлені на рис. 3.11.

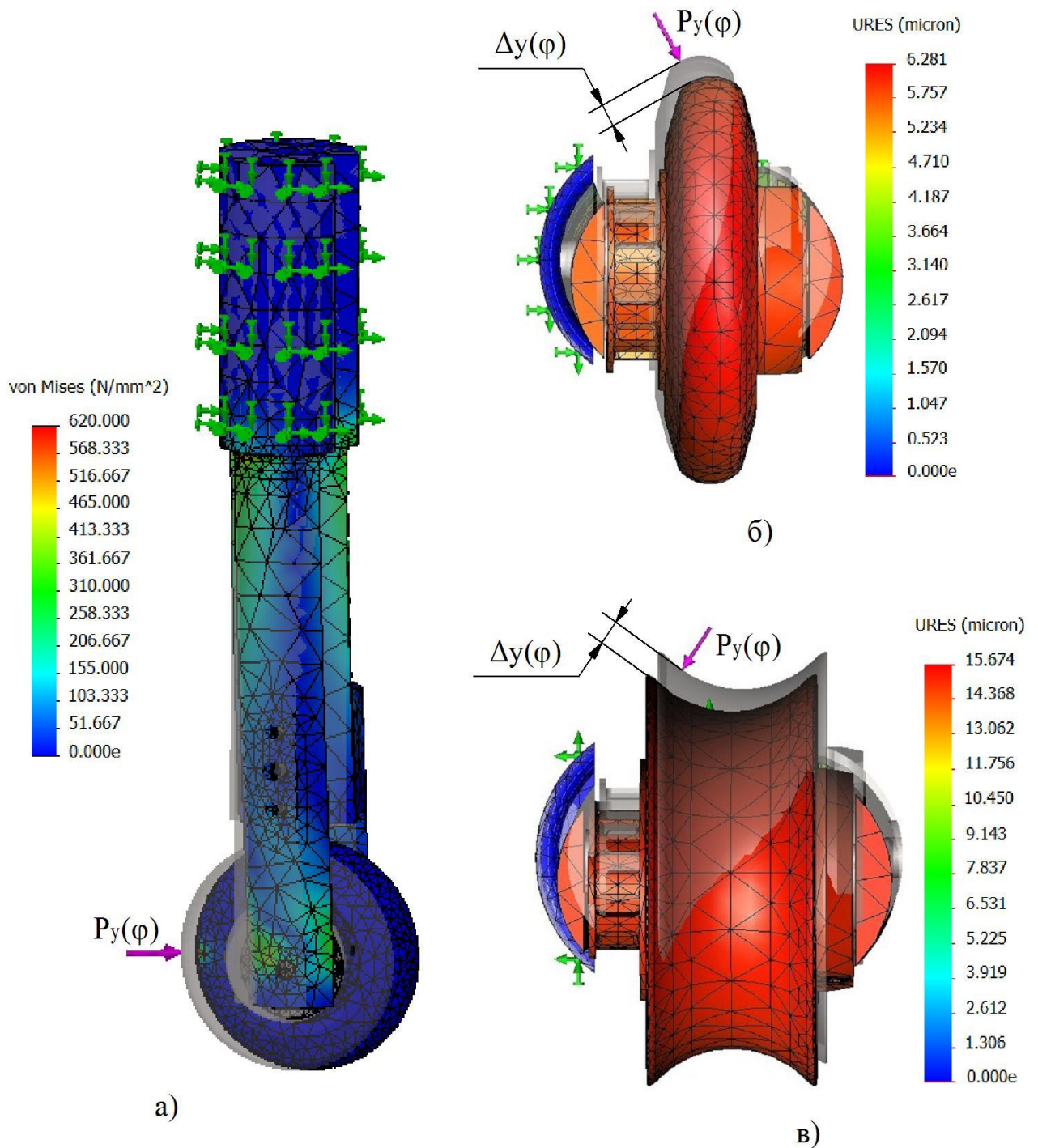


Рис. 3.11 Епюри напружень по Мізесу (а), та пружних деформацій шліфувальної оправки під дією складової $P_y(\varphi)$ (б, в), отримані в результаті моделювання в середовищі COSMOSWORKS

Кожному значенню $P_y(\varphi)$ відповідає індивідуальне значення величини деформації Δy . Для кожної фази проводилось окреме дослідження з однією або двома силами. Оскільки величина деформації є відхилення профілю цівки від

номіналу, графік зміни Δu доцільно представити у вигляді неповної (в межах активної дуги цівки) круглограми. За результатами моделювання, було побудовано кругові графіки зміни Δu , які відображають імовірно відхилення профілю від номіналу в межах однієї цівки (рис. 3.12).

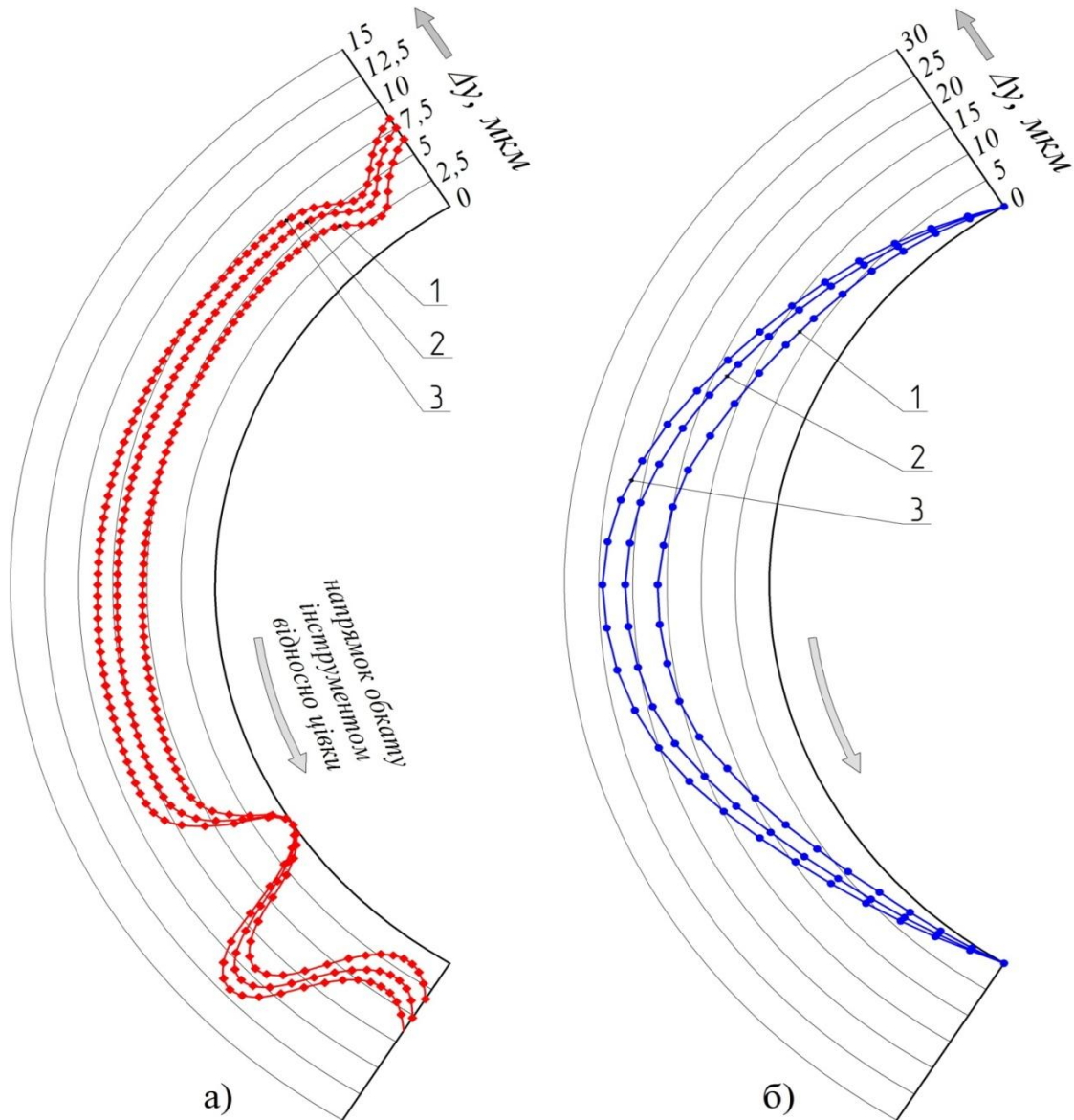


Рис. 3.12 Теоретичний прогноз очікуваної похибки профілю

в межах однієї цівки на основі отриманих значень Δu ,

при обробці кругом з профілем на основі ОДЕЕ (а) і УДЕЕ (б)

1 – графік що відповідає глибині різання $t=0,1$ мм; 2 – для $t=0,125$ мм; 3 – для $t=0,15$ мм

Епюра напружень деформованого стану дозволила виявити концентратори напружень в конструкції оправки. Такими місцями є перепади з утворенням кутів 90° . В подібних місцях були введені галтелі, які покращили

експлуатаційні властивості оправки. Аналіз графіків вказує на перевагу опуклої форми профілю, яка викликає менші відхилення від номіналу. Найбільше імовірно відхилення слід очікувати впродовж періоду переходу від шліфування однієї цівки до наступної, що пояснюється дією двох сил від двох ділянок контакту. Обробка кругом з профілем на основі УДЕЕ характеризується плавним зростанням відхилень, яке повторює тенденцію зміни $P_y(\varphi)$ на рис. 3.10, б. 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 заглиблення від 0,10 мм до 0,15 мм, значення відхилення має тенденцію нелінійного збільшення, причому $\Delta y(t = 0,125) - \Delta y(t = 0,10) > \Delta y(t = 0,15) - \Delta y(t = 0,125)$, що є результатом нелінійної жорсткості конструкції оправки.

Перевагу профілю на основі ОДЕЕ, з точки зору менших значень пружних відтисків, можна пояснити впливом наступних факторів:

- значно менші величини задіяних в роботі ділянок профілів ОДЕЕ і дуги цівки (див. рис. 2.14), що впливає на $\Delta F(\varphi)$ і відповідно, на $P_y(\varphi)$;
- неспіврозмірні значення $V_2(\varphi)$ для ОДЕЕ і УДЕЕ (див. рис. 3.4 і 3.5).

Ефективне застосування круга з профілем на основі УДЕЕ з мінімальним впливом на точність шліфування можливе, якщо дотримуватись вимог:

- значення глибини різання не повинно перевищувати 0,1 мм (згідно результатів рис. 3.12);
- значення частоти $n_{\text{ох}}$ необхідно зменшити таким чином, щоб значення V_2^{max} для УДЕЕ було співрозмірне із V_2^{max} для ОДЕЕ, тобто зменшити в $V_2^{\text{max}}(\text{УДЕЕ}) / V_2^{\text{max}}(\text{ОДЕЕ})$ разів (див. рис. 3.5);
- підвищення жорсткості оправки (наприклад, зменшення довжини вильоту або конічне виконання борштанги замість циліндричного).

3.6 Підвищення точності профілювання увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди

Особливістю геометрії еквідистанти до епіциклоїди є нерівномірний розподіл вузлових точок її побудови. В підтвердження, розглянемо схему рис. 3.12, яка ілюструє розподіл вузлових точок побудови кривої. Густина розподілу точок побудови профілю для ОДЕЕ більша ніж для УДЕЕ, що наглядно демонструється схемою рис. 3.12, а. Для аргументу φ з постійним кроком, відстань між точками є змінною величиною. Довжина дуги еквідистанти до епіциклоїди між двома сусідніми точками, яким відповідають кутові параметри φ_i і φ_{i+1} буде визначатись за формулою:

$$\Delta l(\varphi) = \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} \sqrt{\left(\frac{d\xi}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{d\varphi}\right)^2} \cdot d\varphi \quad (3.36)$$

Графік зміни довжини ділянки $\Delta l(\varphi)$ в межах сектору, обмеженого кутом $360^\circ/z_1$, представлено на рис. 3.12, б. Слід також додати, що відстань $\Delta l(\varphi)$ для УДЕЕ буде збільшуватися пропорційно відстані віддалення еквідистанти (параметру r_u).

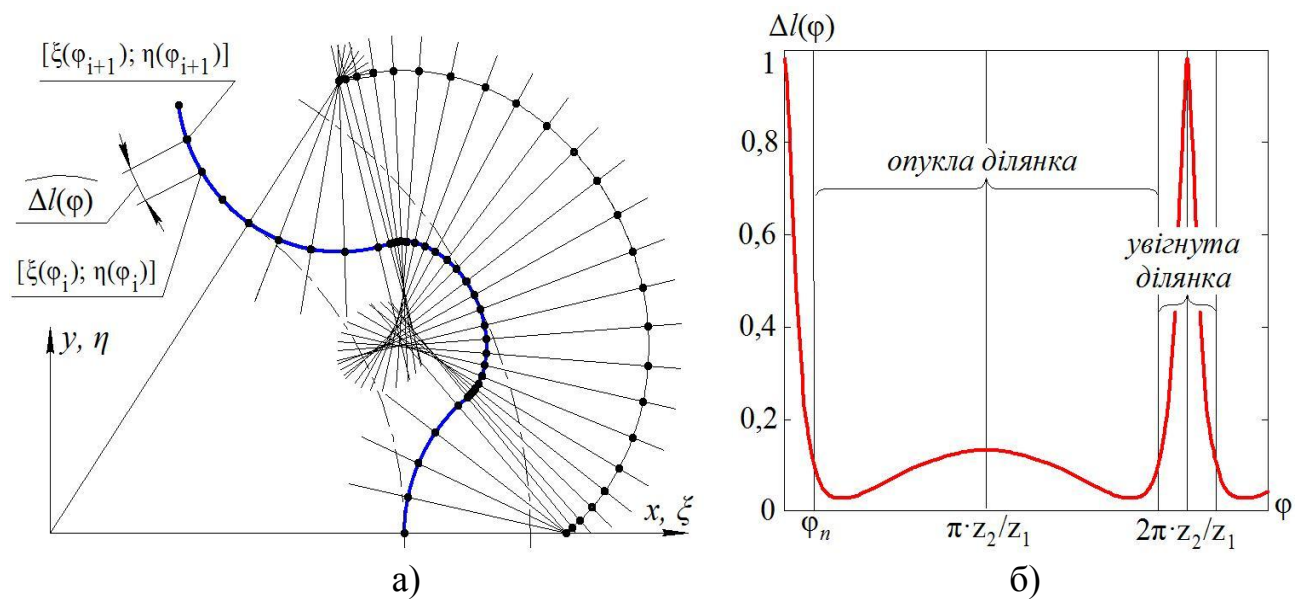


Рис. 3.13 Розподіл точок побудови еквідистанти до епіциклоїди

а) схема розподілу вузлових точок епіциклоїди і еквідистанти до неї; б) графік зміни відстані $\Delta l(\varphi)$ між вузловими точками

Дана особливість геометрії може виявитись причиною недостатньої точності профілю круга на основі УДЕЕ. В процесі його відтворення на верстаті, (наприклад, правки), система ЧПК задає рух між двома точками по лінійній траєкторії. Профіль в такому випадку складатиметься із прямих відрізків різної довжини. Віддаленість точок УДЕЕ може стати причиною огранки профілю. Підвищити точність УДЕЕ можливо за рахунок рівномірного розподілу вузлових точок побудови. Тобто необхідно створити умови, за яких відстані між двома сусідніми точками в будь-якій ділянці еквідистанти до епіциклоїди будуть рівними, не залежно від знаку кривизни. Для цього необхідно встановити характер зміни φ , щоб досягти рівності дуг $\Delta l(\varphi)$.

Особливістю графіка рис. 3.13, б, є його схожість із графіком залежності $V_1(\varphi)$ (рис. 3.4). Довжина відрізка $\Delta l(\varphi)$ змінюється за тим же законом, що і швидкість переміщення точки контакту уздовж еквідистанти в процесі обкату. Використовуючи формули (3.10) і (3.12), перепишемо формулу швидкості $V_1(\varphi)$, виключивши складову $2\pi \cdot n_{ex.} / z_2$:

$$w(\varphi) = \frac{\rho(\varphi) - r_{ц}}{\rho(\varphi)} \sqrt{R_{ц.ц.}^2 + R_2^2 + 2 \cdot R_{ц.ц.} \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2}\right)}. \quad (3.37)$$

Відношення $\Delta l(\varphi)$ до $w(\varphi)$ буде сталим на всій області визначення:

$$j(\varphi) = \Delta l(\varphi) / w(\varphi) = const. \quad (3.38)$$

Середнє значення довжини дуги між сусідніми точками, виражатиметься відношенням повної довжини дуги еквідистанти до кількості точок побудови:

$$\Delta l_{сер.} = \frac{1}{360 \cdot z_2} \int_0^{2\pi \cdot z_2} \sqrt{\left(\frac{d\xi}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{d\varphi}\right)^2}. \quad (3.39)$$

Швидкість зміни довжини дуги Δl відносно кроку $\Delta\varphi = \varphi_{i+1} - \varphi_i = \pi/180$:

$$\frac{\Delta l(\varphi)}{\Delta\varphi} = \frac{w(\varphi) \cdot j(\varphi)}{\Delta\varphi}. \quad (3.40)$$

Прирівняємо (3.40) до $\Delta l_{сер.}$ і введемо функцію корекції $\lambda(\varphi)$:

$$\Delta l_{сер.} = \lambda(\varphi) \cdot \frac{w(\varphi) \cdot j(\varphi)}{\Delta\varphi}. \quad (3.41)$$

В даному випадку, $\lambda(\varphi)$ забезпечує рівність $\Delta l(\varphi) \approx \Delta l_{сер.}$. Формулу для визначення функції корекції $\lambda(\varphi)$, дістаємо із виразу (3.41):

$$\lambda(\varphi) = \frac{\Delta l_{сер.} \cdot \Delta \varphi}{w(\varphi) \cdot j(\varphi)} = \frac{\Delta l_{сер.} \cdot \Delta \varphi}{\Delta l(\varphi)} = \frac{\pi \cdot \int_0^{2\pi \cdot z_2} \sqrt{\left(\frac{d\xi}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{d\varphi}\right)^2} d\varphi}{64800 \cdot z_2 \cdot \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} \sqrt{\left(\frac{d\xi}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{d\eta}{d\varphi}\right)^2} d\varphi}. \quad (3.42)$$

Кореговані рівняння еквідистантного профілю, які забезпечують побудову з рівновіддаленим розподілом точок будуть задаватися з урахуванням $\lambda(\varphi)$:

$$\xi_k(\varphi) = \xi(\varphi + \lambda(\varphi)), \quad \eta_k(\varphi) = \eta(\varphi + \lambda(\varphi)) \quad (3.43)$$

Як видно, рівняння (3.43) є функціями одного параметру φ , котрий задається з постійним кроком. На рис. 3.14 представлена еквідистанта до епіциклоїди зі звичайним (а) і рівновіддаленим розподілом точок (б).

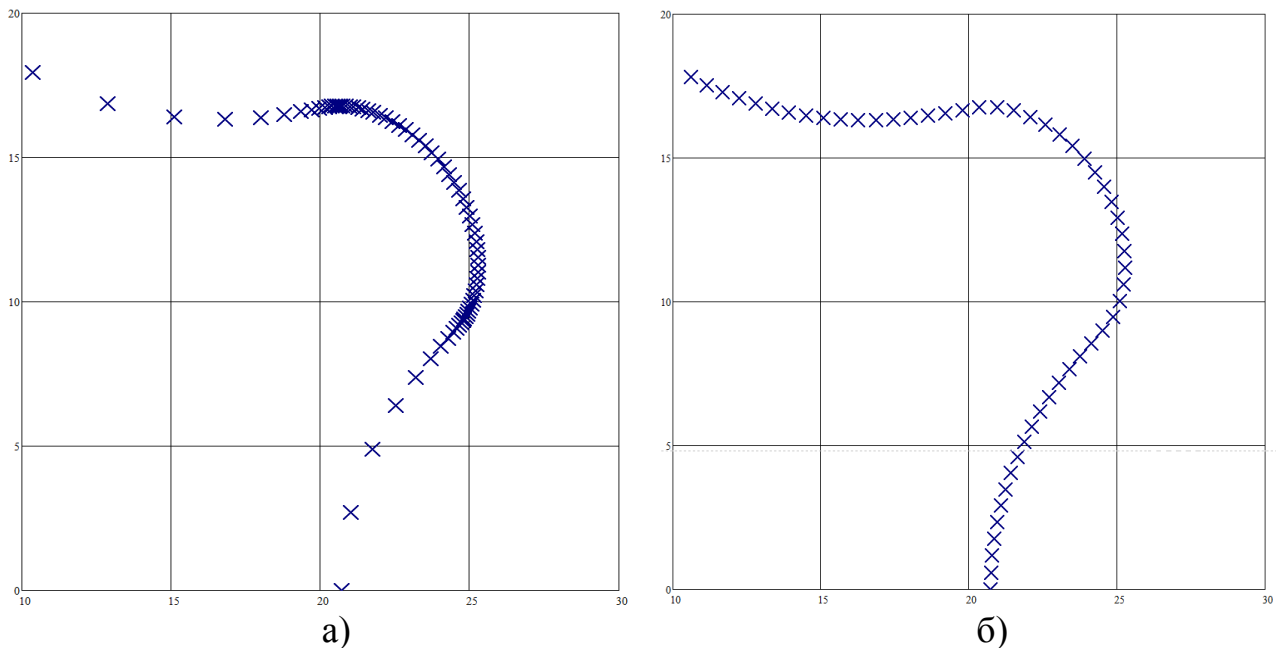


Рис. 3.14 Побудова еквідистанти до епіциклоїди зі звичайним (а) і рівновіддаленим (б) розподілом вузлових точок

Таким чином, кореговані рівняння еквідистанти до епіциклоїди $\xi_k(\varphi)$ і $\eta_k(\varphi)$ дають змогу досягати однакової точності побудови ОДЕЕ і УДЕЕ за рахунок однакової кількості точок на одиницю довжини дуги профілю. Причому точність буде зберігатись незалежно від значення параметру r_y .

3.7 Висновки до розділу

1. 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 верстатного зачеплення.

2. Визначено закони руху точки контакту профілів цівкового колеса і інструменту в процесі обкату, 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 $|V_2(\varphi)|$, що дає змогу досягти постійності подачі на подвійний хід інструменту ($S_{n.x.}(\varphi) = const$) і відповідно – підвищити точність формоутворення.

3. Виконано аналіз силових факторів, 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 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 впливу зазначених факторів.

4. Підвищено точність побудови УДЄЕ за рахунок введення функції корекції параметру φ , яка забезпечує рівновіддалений розподіл вузлових точок побудови по всій довжині еквідистанти до епіциклоїди.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ПРОФІЛЮ ЦІВКОВОГО КОЛЕСА В УМОВАХ ОБКАТУ

4.1 Опис обладнання та оснащення для проведення експериментальних досліджень

Для експериментальних досліджень базового методу шліфування і його вдосконаленого варіанту, було розроблено та виготовлено спеціальне оснащення, адаптоване до вертикального фрезерного оброблювального центру (ОЦ) моделі BMV-850 MILLSTAR (Тайвань) з ПЧПК FANUC (рис. 4.1). 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. Компоновка та принцип дії складових оснащення, приведені на рис. 4.2 – 4.5.

Пристрій для профільного шліфування внутрішніх поверхонь (рис. 4.2) включає в себе електродвигун 1 (MF 907079 Hauser) в чавунному корпусі, оправку з виносним шпинделем 2 із закріпленням на ній інструментом 3. Рух обертання круг отримує від електродвигуна через зубчасту пасову передачу. Оправка базується в посадковий отвір в корпусі електродвигуна. Цей корпус має фланець, на якому розміщені кріпильні отвори. За допомогою цього фланцю, електродвигун разом із оправкою жорстко приєднується до елементів шпиндельного вузла ОЦ через адаптер 4, який базується на циліндричну частину пінолі. Зворотно-поступальні рухи оправки з інструментом здійснюються за рахунок програмування циклічних лінійних переміщень каретки шпиндельного вузла по вісі Z. Також пристрій має можливість здійснення ручної радіальної подачі за допомогою мікрометричного гвинта.



Рис. 4.1 Обробний центр з ЧПК моделі BMV-850 MILLSTAR, оснащений пристроєм для профільного шліфування внутрішніх поверхонь і пристроєм для відтворення руху обкату

Пристрій для надання цівковому колесу руху обкату (рис. 4.2) включає в себе планетарний редуктор внутрішнього зачеплення 5, який встановлюється на поворотний стіл 6 (мод. РКВ 7205-4003). Конструкція даного пристрою була запозичена із роботи [104] і доповнена керованим мотор-редуктором. Поворотний стіл базується на плиті 7, яка має змогу повертатись в незакріпленому стані навколо вісі поворотного стола для здійснення наладки. На цій же плиті встановлений мотор-редуктор 8 (універсальний колекторний електродвигун УВ-061-М64, поєднаний з черв'ячним редуктором) та зубчаста передача 9 ($z=11/z=35$). Передача крутного моменту між мотор-редуктором, зубчатою передачею і поворотним столом відбувається через муфти 10.

Зміна частоти обертання мотор-редуктора здійснюється за допомогою лабораторного автотрансформатора ЛАТР-1М (0-220В, 9А), шляхом плавної зміни живлячої напруги. Точне значення частоти обертання на валу мотор-редуктора встановлювалось за допомогою оптичного тахометру DT-2234С.

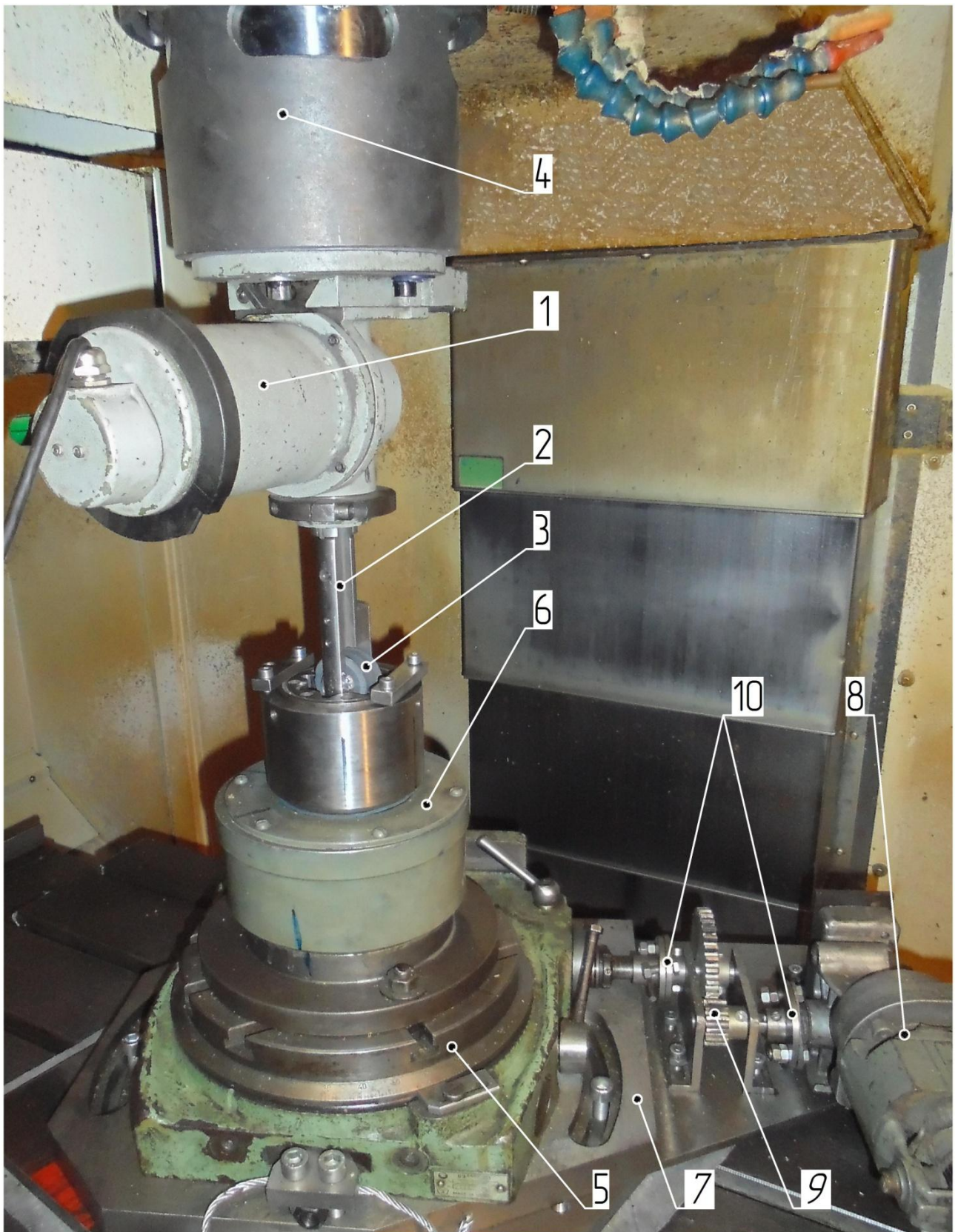


Рис. 4.2 Загальний вигляд оснащення для шліфування

цівкового колеса в умовах обкату

1 – привід обертання круга Hauser MF 907079; 2 – оправка; 3 – інструмент; 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 11/35; 10 – муфти

Електродвигун привода шліфувального круга MF 907079 Hauser живиться від трьохфазної мережі змінного струму з напругою 110-130В і частотою 240-440Гц. Перетворення частоти (з 50 Гц на 240 Гц), напруги (з 380 В на 110 В), та забезпечення можливості зміни частоти обертання досягається за допомогою частотного перетворювача Danfoss VLT AQUA Drive FC202 (рис. 4.3).



Рис. 4.3 Пристрій для профільного шліфування внутрішніх поверхонь Hauser і частотний перетворювач Danfoss VLT AQUA Drive FC202

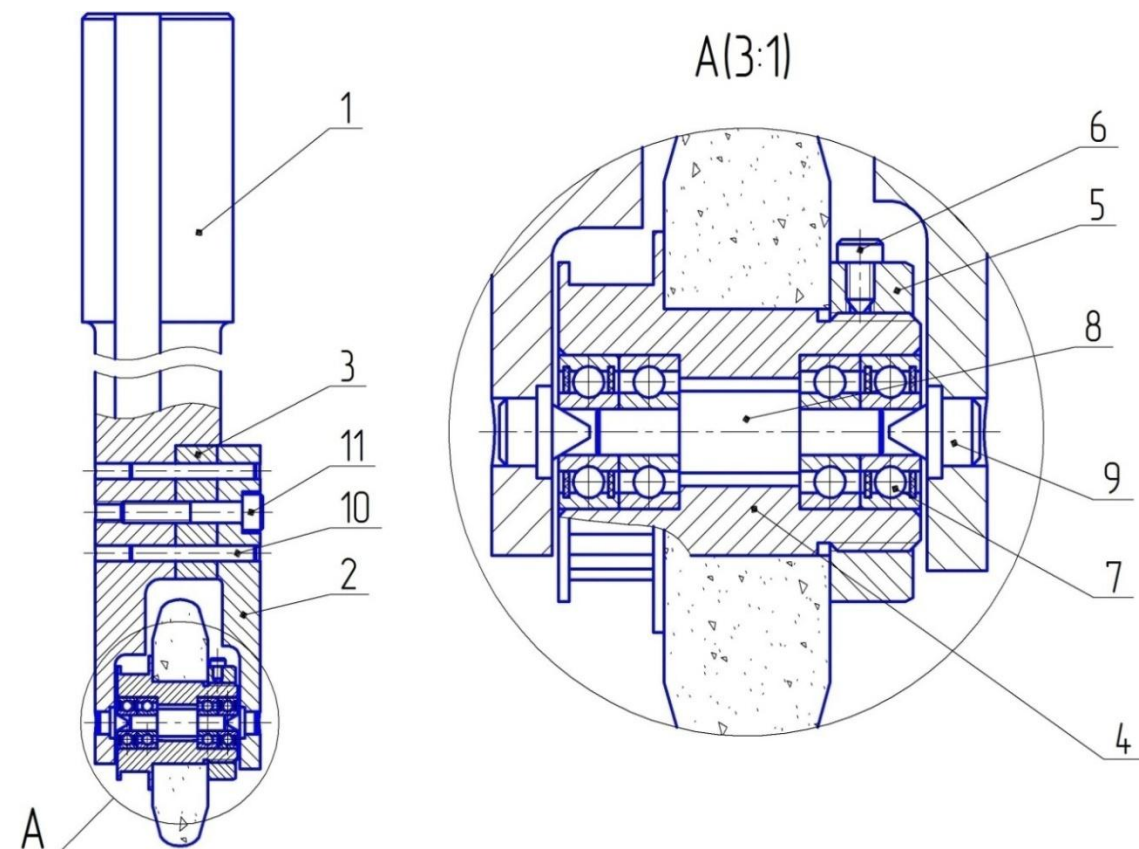
Оправка для встановлення шліфувального круга являє собою окремий вузол, представлений на рис 4.4. Конструкція виносного шпинделя була розроблена під нові типорозміри встановлюваних кругів. Оправка складається з корпусу 1, притискної планки 2, перехідного вкладиша 3. Інструмент базується на вісь 4, яка разом із зубчатим шківом являє собою корпус виносного шпинделя. На валу електродвигуна, в порожнині його корпусу, встановлений зубчатий шків, від якого через зубчатий пас оберти надаються шківу вісі 4. Круг притискається гайкою 5, яка додатково фіксується гвинтом 6 для запобігання послаблення сили затиску.



а)



б)



в)

Рис. 4.4 Консольні оправки із встановленими шліфувальними кругами з профілем на основі ОДЕЕ (а) і УДЕЕ (б), та її конструктивне виконання (в)

1 – корпус оправки; 2 – притискна планка; 3 – перехідний вкладиш; 4 – вісь (корпус виносного шпинделя); 5 – гайка; 6 – фіксуєчий гвинт; 7 – підшипник; 8 – валик опорний; 9 – шип; 10 – штифт; 11-гвинт

В порожнині шківів розміщено дві пари радіально-упорних підшипників 7. Між ними розміщується опорний валик 8, кінці якого частково базуються у внутрішніх обоймах підшипників. Одночасно торці обойм упираються в торці валика. В корпусі і притискній планці містяться отвори, в які запресовані шипи 9, на конічні поверхні яких базуються внутрішні обойми підшипників 7. Притискна планка 2 кріпиться до корпусу за допомогою двох штифтів 10 і гвинта 11. При цьому створюється натяг для точного центрування круга відносно вісі шипів і уникнення зазорів. Залежно від ширини круга, змінний перехідний вкладиш 3 може мати різну товщину.

Структурна схема пристрою для відтворення руху обкату приведена на рис. 4.5. Вона дає більш детальну інформацію про принцип його роботи, в основу якого покладено обкат центроїди оброблюваного колеса навколо нерухомої центроїди інструмента.

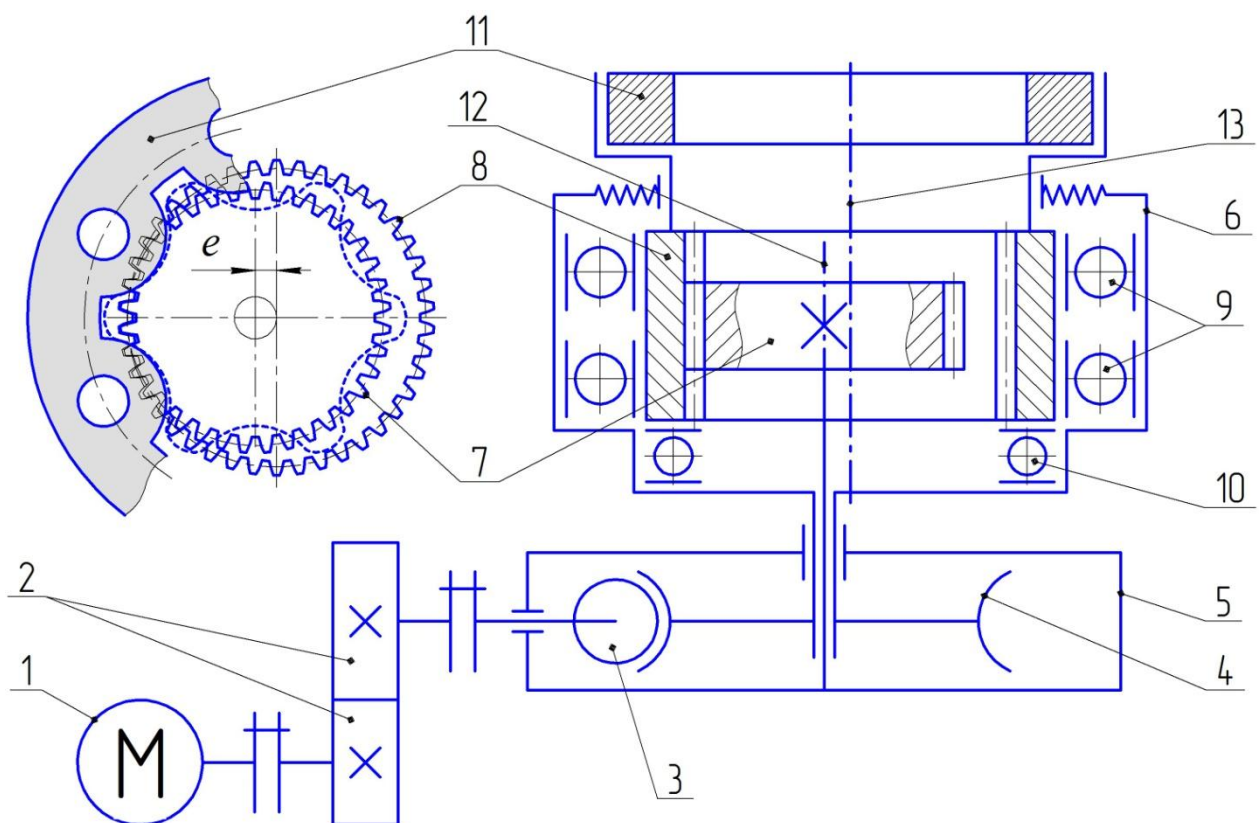


Рис. 4.5 Структурна схема пристрою для відтворення руху обкату

- 1 – мотор-редуктор; 2 – зубчата передача ($z=11/z=35$); 3 – черв'як, 4 – черв'ячне колесо;
 5 – корпус поворотного стола; 6 – еквівалентне колесо, що імітує сателіт ГП; 8 – обойма із внутрішнім зачепленням; 9 – радіальні підшипники; 10 – упорний підшипник;
 11 – оброблюване цівкове колесо; 12 – вісь обертання стола (вісь обкату);
 13 – миттєва вісь обертання цівкового колеса

Від мотор-редуктора 1 (рис 4.5) обертовий рух передається до зубчатої пари, яку утворюють колеса 2 ($z=11$ і $z=35$) і далі на черв'як 3, який приводить в рух черв'ячне колесо 4. Черв'ячна пара знаходиться в корпусі 5 поворотного столу. Обертання черв'ячного колеса приводить до обертання корпусу 6 планетарного редуктора. В середині корпусу 6 розміщена передача внутрішнього зачеплення, яку утворюють колесо 7 і обойма 8 із внутрішнім зубчатим вінцем. Це зачеплення є еквівалентним зачепленню ГП і має теж саме передавальне відношення. Колесо 7 пов'язане із корпусом 6 поворотного столу і повністю нерухоме. Обойма 8 має змогу обертатись за рахунок двох радіальних підшипників 9 і одного упорного 10, які знаходяться в корпусі 6. Обойма 8 жорстко пов'язана із оброблюваним цівковим колесом 11. Відповідно, в процесі роботи, колесо 11 отримує від обойми 8 рух по коловій траєкторії, навколо вісі 12 і обертання навколо ексцентрично розташованої миттєвої вісі 13, яка одночасно є геометричною віссю корпусу 6. Відстань між осями 12 і 13 рівна ексцентриситету ГП.

4.2 Програма і методика експериментального дослідження показників точності та шорсткості профілю цівкового колеса

Метою експериментального дослідження є визначення параметрів точності та шорсткості профілю цівкового колеса, отриманих в результаті здійснення обробки цівкових коліс у виробничих умовах. Отримані дані дають змогу описати процес за допомогою статистичних моделей та порівняти показники обробки різними інструментами між собою. Одночасно експериментальні дослідження дають змогу оцінити метод обробки на предмет доцільності його впровадження у виробництво.

Параметри цівкового колеса, що підлягають контролю, приведені на рис 4.6. Їх вимірювання проводився за допомогою наступних засобів контролю:

- Параметр H вимірювався безпосередньо під час обробки зубовимірювальним мікрометром МЗЦ-25-0,001 (МІКРОТЕХ);

- Точність форми профілю вимірювалась на координатно-вимірювальній машині Contura G2 CARL ZEISS по 10-ти точкам уздовж активної ділянки дуги цівки і враховує параметри r_u , R_{qu} , α . На цьому ж обладнанні, окремо вимірювалась точність розташування профільної поверхні (перпендикулярність відносно торця);

- Вимірювання шорсткості проводилось на профілограф-профілометрі Mahr GD 25.

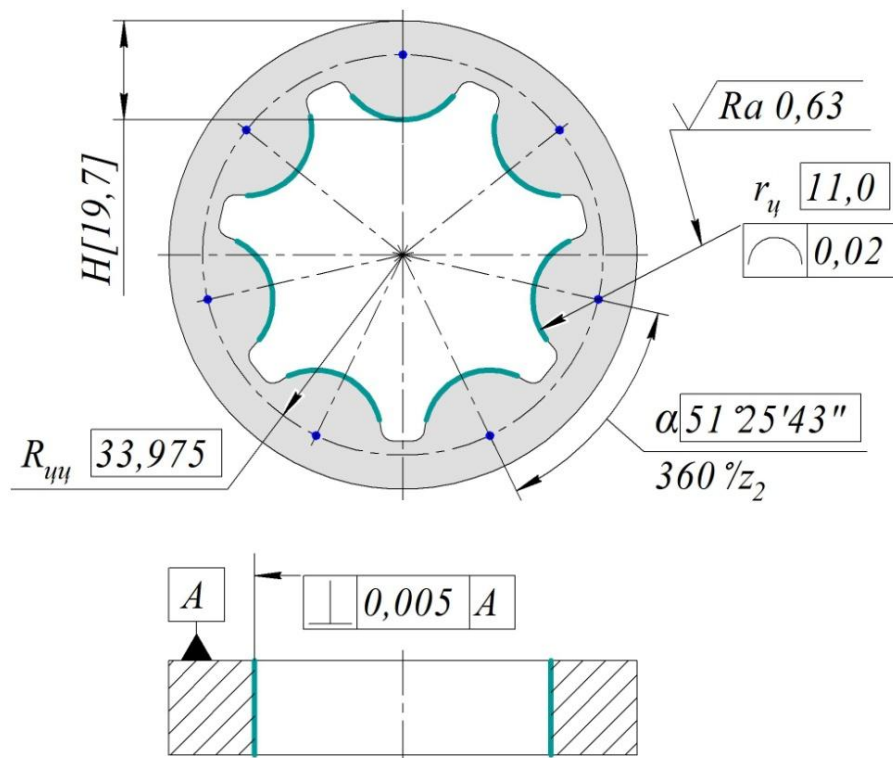


Рис. 4.6 Контрольовані параметри цівкового колеса

Технічні характеристики вимірювального приладу Mahr GD 25 дозволяють вести вимірювання шорсткості лише в одній площині. Це означає, що вимірювання шорсткості циліндричної поверхні цівки уздовж дуги вимагає руйнування деталей. Для забезпечення доступу щупу до поверхні цівки, одночасно уникаючи руйнування, вимірювання здійснювались за спеціальною схемою, яка представлена на рис 4.7. Цівкове колесо закріплюють в лещата у вертикальному положенні і позиціонують таким чином, щоб між напрямком руху щупа і торцем деталі утворився кут $\sim 30^\circ$. Щуп в процесі вимірювання рухається по еліптичній траєкторії, уздовж діагоналі до поверхні цівки.

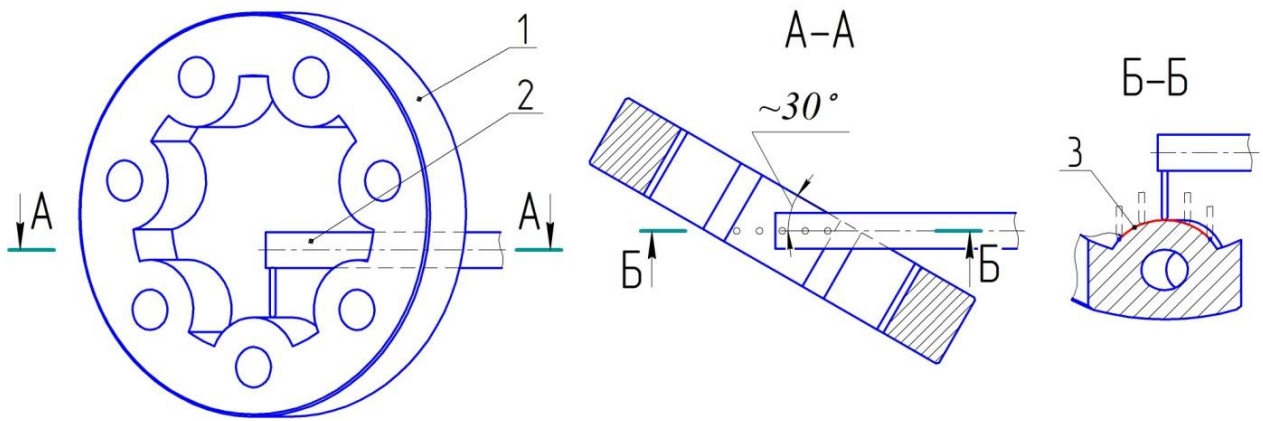


Рис. 4.7 Схема вимірювання шорсткості з поворотом деталі на профілограф-профілометрі Mahr GD 25
1 – цівкове колесо; 2 – щуп; 3 – траєкторія точки контакту

За результатами вимірювань оброблених тестових зразків будуються графіки розподілу контрольованих параметрів. В якості тестових зразків, які підлягали обробці, були виготовлені заготовки цівкових коліс з послідуочим обміром параметрів. Отримана інформація зведена до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Параметри заготовок цівкових коліс

<i>Найменування параметру</i>	<i>Розмірність</i>	<i>Числове значення</i>
Коливання розміру r_y в межах однієї деталі	мм	11,10...11,2
Відхилення форми профілю	мм	~ 0,15
Шорсткість	мкм	3,2...2,5
Припуск на обробку	мм	0,1...0,2
Матеріал заготовки	– // –	сталь ШХ15 ГОСТ 801-78
Твердість	HRC	60...62

В якості заготовок для виготовлення шліфувальних кругів були використані дискові круги з прямим профілем (ПП) з послідуочною правкою алмазним олівцем на профілешліфувальному оптичному верстаті 395МФ10. Робочі характеристики кругів приведені в таблиці 4.2.

Робочі характеристики шліфувальних кругів

<i>Характеристика</i>	<i>Позначення згідно стандарту</i>
Абразивний матеріал	14А Електрокорунд нормальний ГОСТ 2424-83
Зернистість	F120 – F150 ГОСТ Р 52381-2005
Твердість круга	Р (СТ-2) ГОСТ Р 52587-2006
Структура	Щільна (4) ГОСТ 2424-83
Зв'язка	Керамічна (K5)

Експериментальні дослідження параметрів точності та шорсткості профілю цівкового колеса передбачають 2 етапи:

1. Обробки шліфувальними кругами із профілями на основі ОДЕЕ та УДЕЕ, з послідовним дослідженням параметрів профілю в межах деталі.
2. Дослідження параметрів профілю в межах окремих цівок (з метою порівняння теоретично прогнозованої похибки з реальною).

Для проведення експериментальних досліджень на першому етапі був обраний ротатабельний центральний композиційний план другого порядку [38, 53, 106], який включає в себе повний факторний експеримент з 8-ми дослідів та додаткові досліді в зіркових точках (6 дослідів) і в центрі плану (6 дослідів). Загальна кількість дослідів складає 20. Рівні та інтервали варіювання факторів зведені до таблиці 4.3. Матриця ротатабельного плану наведена в таблиці 4.4. Параметри оптимізації – точність форми і шорсткість. Матриця планування експерименту для обробки різними інструментами залишатиметься однаковою. Фактори, вплив яких досліджувався ході проведення експерименту – три основні керовані режими обробки – вхідна частота $n_{вх.}$, швидкість зворотно-поступального руху (осциляції) інструменту $V_{з.п.}$ і частота обертання круга $n_{ш.к.}$

З кожною дисперсією пов'язане число ступенів свободи q_1 і q_2 , за якими обирається значення F_T зі спеціальної таблиці [106]. Перехід від кодованих значень факторів до натуральних здійснюється за формулами:

$$x_1 = \frac{n_{ex} - n_{ex}(0)}{n_{ex}(+1) - n_{ex}(0)}; \quad x_2 = \frac{V_{zn} - V_{zn}(0)}{V_{zn}(+1) - V_{zn}(0)}; \quad x_3 = \frac{n_{ук} - n_{ук}(0)}{n_{ук}(+1) - n_{ук}(0)}. \quad (4.4)$$

За допомогою отриманих регресійних моделей виконано пошук оптимальних співвідношень параметрів процесу обробки, які забезпечують найкращі значення якісних показників.

На другому етапі параметри точності та шорсткості перевірялись в межах окремих цівок на профілограф-профілометрі Mahr GD 25. Оскільки технічні характеристики даного вимірювального приладу дозволяють вести виміри лише в одній площині, чотири дослідні зразки були розрізані на дві частини. Це забезпечило повний доступ вимірювального щупа до оброблених поверхонь. Результатом вимірювання стали профілограми та неповні круглограми (в межах активної ділянки дуги цівки), які відображають тенденцію зміни шорсткості та відхилення від заданого профілю в межах активної дуги.

Наряду з параметрами точності та шорсткості обробки, здійснювалось дослідження періоду стійкості абразивних інструментів, та особливостей їх зносу. Дослідження стійкості здійснювалось за наступним алгоритмом:

1. Після повної обробки однієї заготовки – перевірка профілю на оптичному профіleshліфувальному верстаті 395МФ10 по кальці (для профілю на основі ОДЕЕ – масштаб 25:1, для УДЕЕ – 50:1).

2. Якщо після обробки однієї деталі порушень геометрії не виявлено, продовжити обробку з перевіркою профілю після кожної послідуєчої обробленої заготовки.

3. У випадку, якщо знос помітний після обробки першої заготовки, перевіряти профіль після обробки однієї цівки з послідуєчим повтором процедури контролю та встановленням кількості оброблених цівок до появи порушень геометрії.

4. Локалізація уразливих ділянок профілю.

4.3 Дослідження показників точності та шорсткості профілю цівкового колеса, отриманих в ході реалізації методу шліфування в умовах обкату

Експериментальна обробка цівкових коліс проводилась у виробничих умовах діючого підприємства ТОВ Кіровоградський інструментальний завод «ЛЕЗО» (м. Кропивницький). Фрагменти обробки цівкового колеса в різних фазах обкату представлені на рис. 4.8.

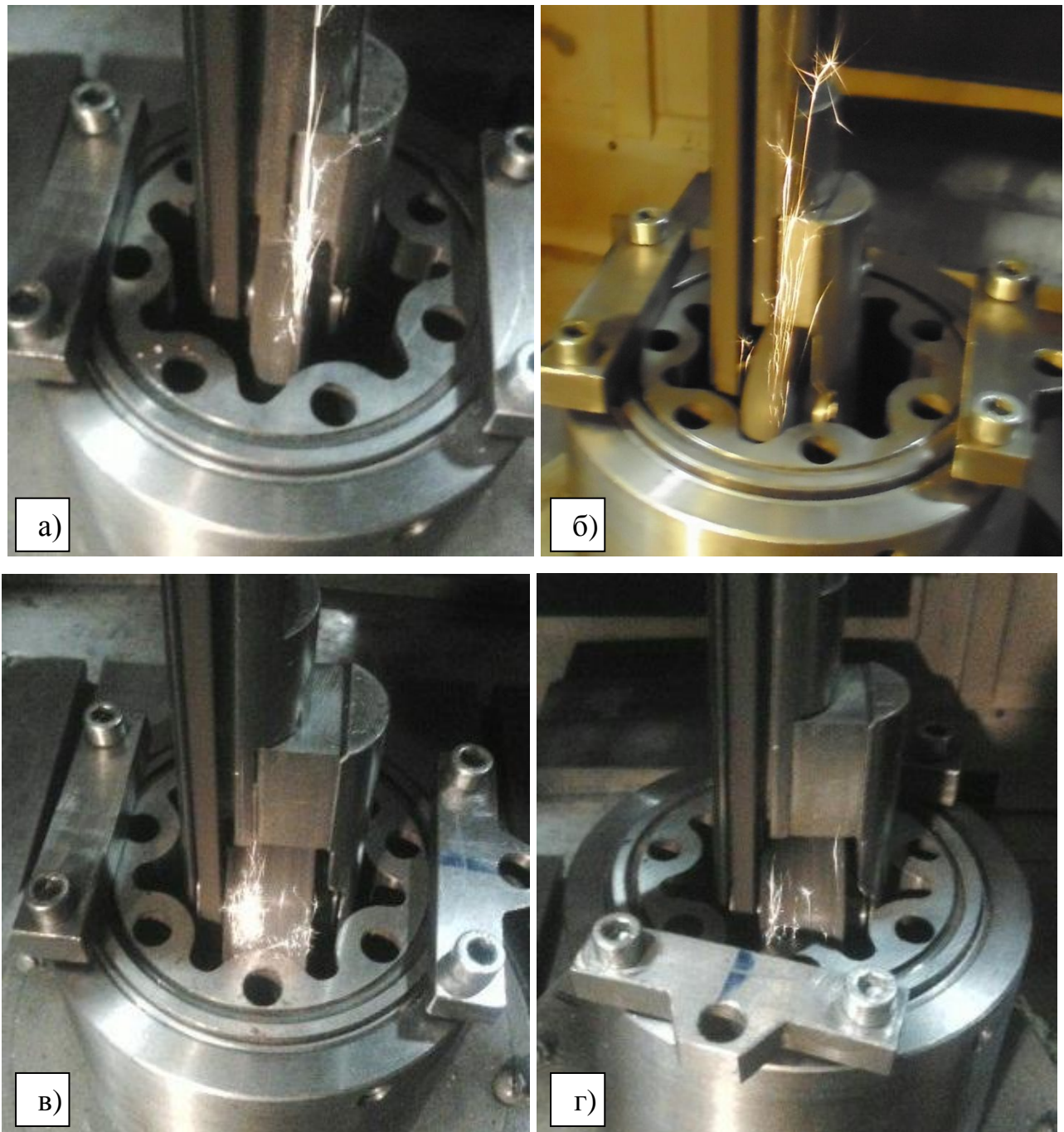


Рис. 4.8 Фрагменти обробки внутрішнього профілю цівкового колеса інструментом з профілем на основі ОДЄЄ (а, б) і УДЄЄ (в, г)

В ході реалізації методу шліфування, було встановлено, що гостра кромка, утворена перетином торцевої і профільної поверхонь, сприяє інтенсивному руйнуванню інструменту. Момент врізання супроводжується ударом профільної поверхні круга об гостру кромку, що неминуче призводить до викришування зерен. Суттєво покращити умови врізання і підвищити стійкість круга вдалося за рахунок введення фаски уздовж шліфованої дуги ціки. Розмір фаски обирався рівним глибині врізання на радіус цівки.

Вимірювання параметрів відхилення від заданого профілю та шорсткості здійснювалось в межах окремих деталей і в межах окремих цівок. Для визначення точності в межах однієї деталі, прямим вимірюванням було визначено радіуси цівок $r_{ц}$, полярні радіуси центрів цівок $R_{ц.ц.}$ (для кожної цівки окремо) і значення кутів α , що визначають взаємне кутове положення цівок (див. рис. 4.6). Вимірювання зазначених параметрів здійснювалось на координатно-вимірювальній машині Contura G2 CARL ZEISS (рис. 4.9, а, б). Точність вимірювання складає $\pm 0,0009$ мкм. За цими параметрами було побудовано фактичний профіль цівкового колеса. Відхилення форми заданого профілю δf є розрахункова величина, яка виражається у вигляді найбільшого лінійного відхилення фактичного профілю від номінального. Її обчислення проводились за допомогою спеціального програмного забезпечення Calypso CARL ZEISS, розробленого для вимірювальної машини. В процесі обробки можуть мати місце випадкові несистематичні похибки, які впливатимуть на величину δf . Програмне забезпечення має змогу виявляти подібні випадкові відхилення і не враховувати їх в подальших розрахунках. Протоколи вимірювань окремо подані в додатку Г.

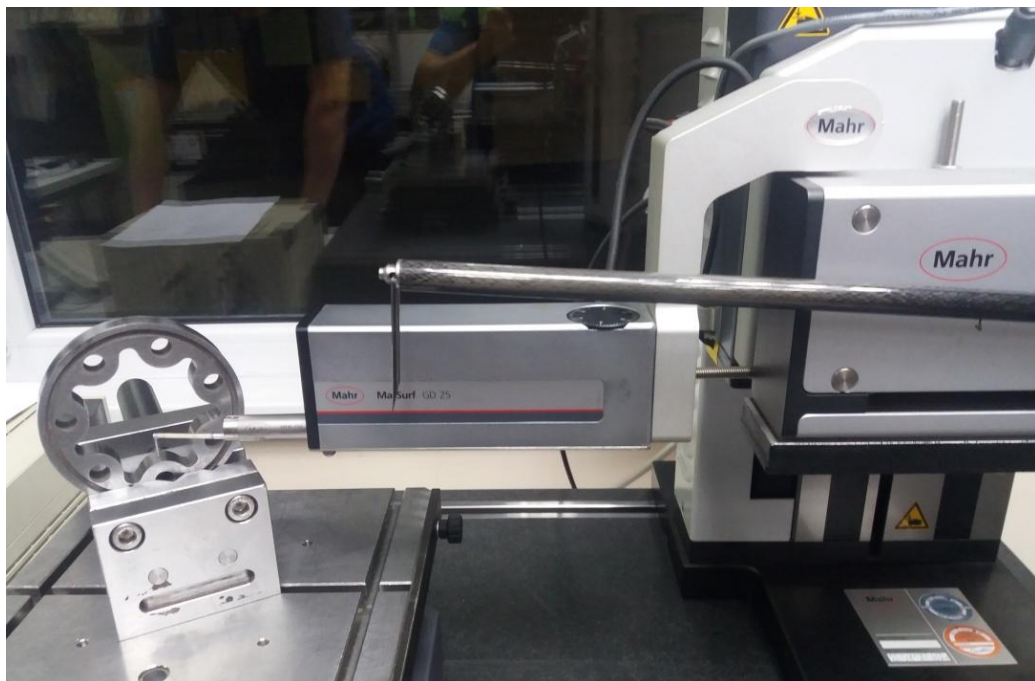
Параметри шорсткості вимірювались на профілограф-профілометрі Mahr GD 25 (рис. 4.9, в) уздовж діагоналі до поверхні цівки, згідно методики, описаної в п 4.2 (див. рис. 4.7). Протоколи вимірювання шорсткості, що містять профілограми, подані в додатку Д.



a)



б)



в)

Рис. 4.9 Вимірювання відхилення від заданого профілю на координатно-вимірювальній машині Contura G2 CARL ZEISS (а, б) і вимірювання шорсткості на профілограф-профілометрі Mahr GD 25 (в)

Після проведення серії дослідів та здійснення процедури обмірів, отримані значення параметрів δf і Ra було зведено до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Данні, отримані в ході проведення експериментів

№ дослідю	Обробка кругом з профілем на основі ОДЕЕ		Обробка кругом з профілем на основі УДЕЕ	
	Y_1 (δf , мкм)	Y_2 (Ra , мкм)	Y_3 (δf , мкм)	Y_4 (Ra , мкм)
1	14,3	1.88	15,2	0,68
2	7,8	1.74	5,7	0,66
3	19,1	1.33	18,4	0,55
4	12,7	1.27	17,8	0,54
5	24,5	2.05	25,2	0,83
6	18,3	2.11	16,6	0,73
7	35,9	1.56	36,2	0,6
8	28,3	1.51	28,9	0,62
9	6,5	1.37	12,1	0,56
10	23,8	1.92	25,4	0,67
11	17,6	1.73	14,7	0,63
12	27,4	1.48	38,3	0,56
13	24,0	1.62	18,5	0,78
14	15,3	1.75	12,9	0,61
15	22,1	1.66	21,3	0,64
16	19,7	1.84	13,8	0,61
17	16,4	1.63	17,2	0,65
18	17,2	1.78	22,6	0,6
19	14,5	1.72	18,1	0,62
20	24,8	1.67	19,4	0,59

За отриманими в ході експериментів значеннями, було побудовано гістограми розсіювання параметрів δf і Ra , які представлені на рис. 4.10.

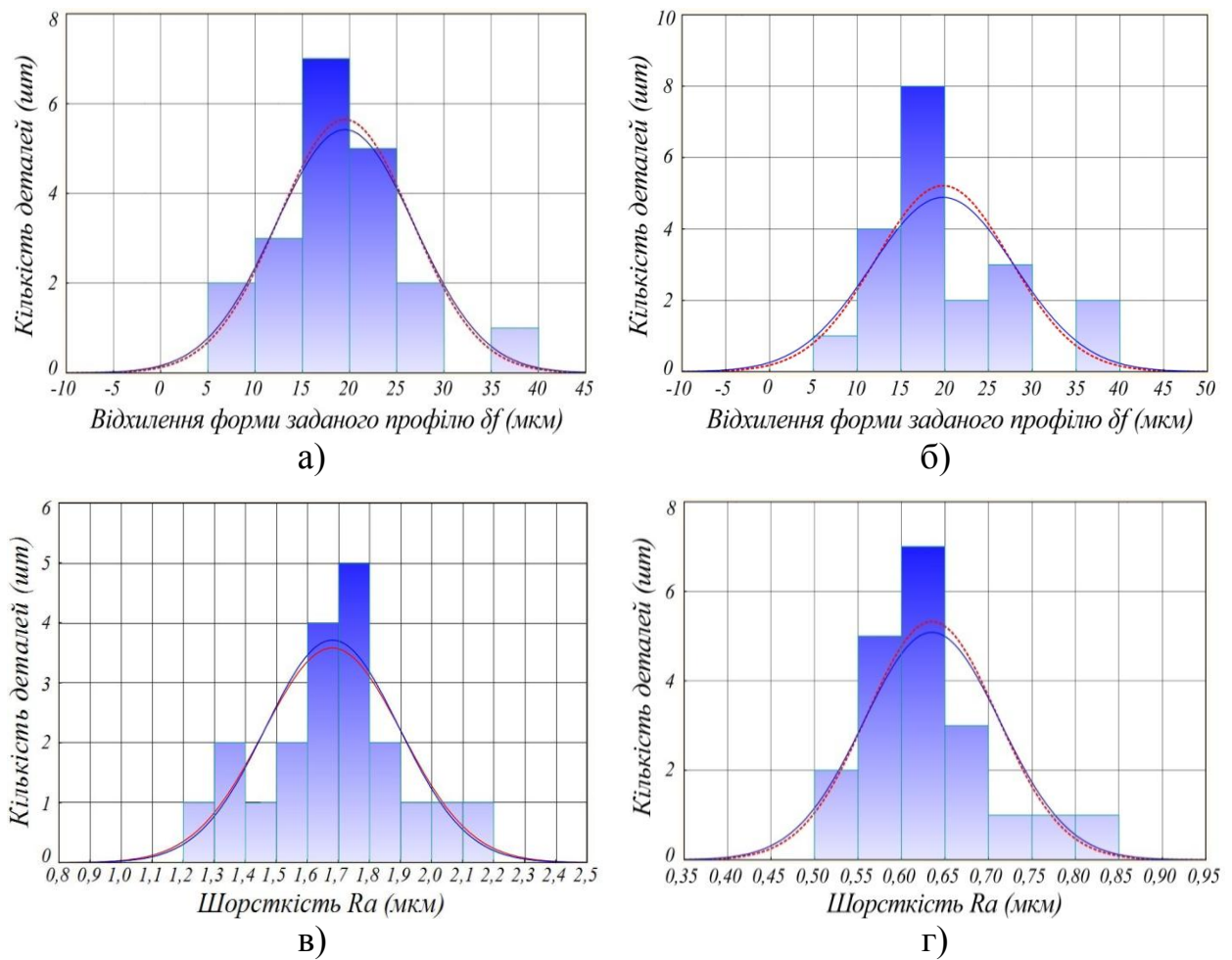


Рис. 4.10 Гістограми розсіювання параметрів відхилення δf (а, б) та шорсткості Ra (в, г), отриманих при шліфуванні кругами з профілем на основі ОДЕЕ (а, в) і УДЕЕ (б, г)

Аналіз гістограм розсіювання показує, що зміна технологічних факторів в заданих межах має суттєвий вплив на величину поля розсіювання показників точності та шорсткості. 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. Поле розсіювання параметру шорсткості для інструмента на основі ОДЕЕ – Ra 1,27...2,11 мкм, для УДЕЕ – Ra 0,54...0,83 мкм. Приведені результати свідчать про перевагу застосування профілю на основі УДЕЕ, який забезпечує в 2,3-2,5 рази кращу шорсткість при співрозмірних полях розсіювання параметру δf , та однакових режимах обробки. На рис. 4.11 представлені фрагменти обробленої поверхні цівки з високою деталізацією.

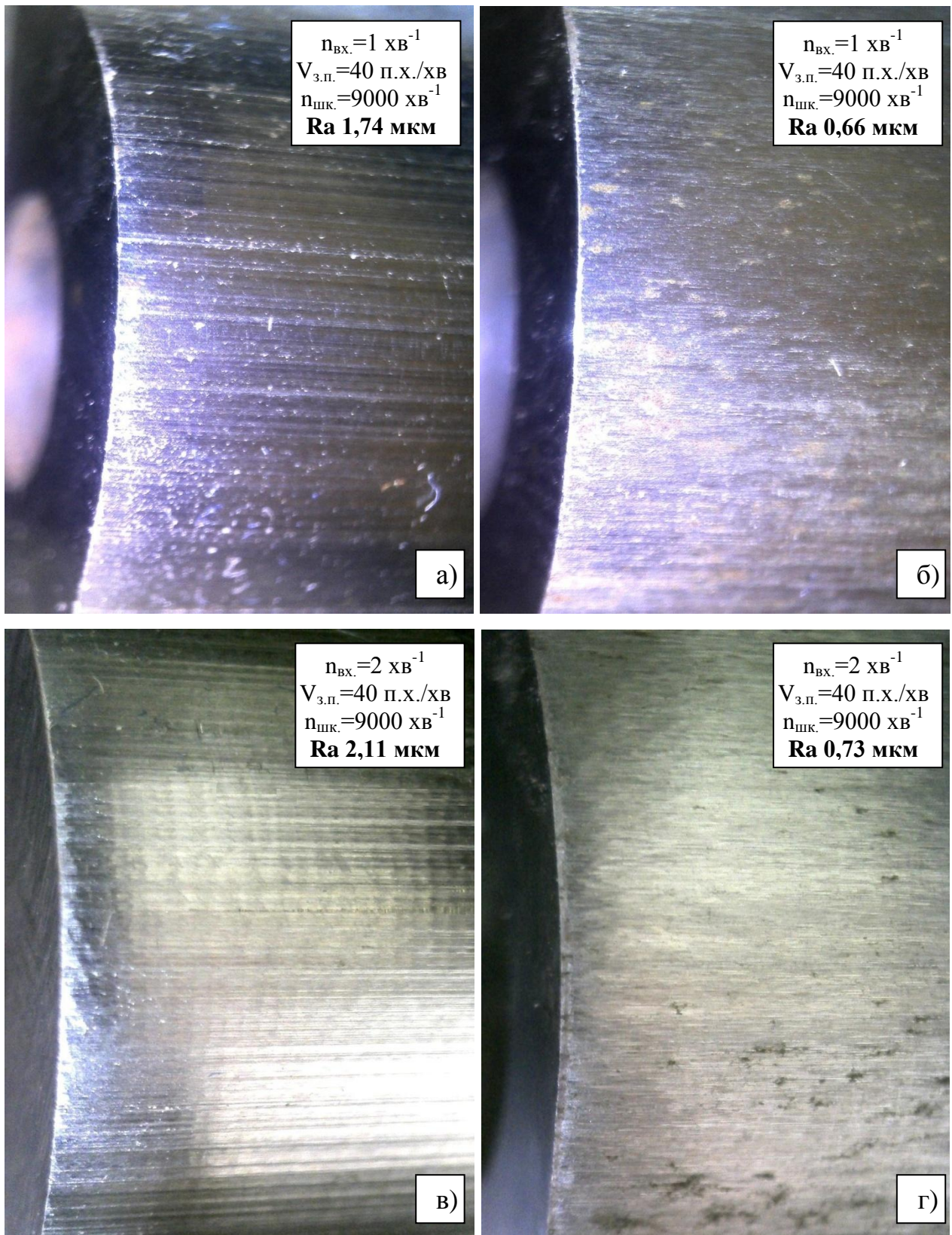


Рис. 4.11 Оброблена поверхня цівки після шліфування кругами з профілем на основі ОДЕЕ (а, б) і УДЕЕ (в, г) з однаковими режимами різання

Мінімальна зафіксована шорсткість 1,27 мкм для профілю на основі ОДЕЕ не задовольняє поставленим вимогам (Ra 0,63). Таким чином, результати

досліджень п. 2.3 знаходять експериментальне підтвердження. На основі даних вимірювання оброблених деталей, були отримані залежності параметрів оптимізації (δf і Ra) від технологічних факторів $n_{ex.}$ (X_1), $V_{з.п.}$ (X_2) і $n_{ш.к.}$ (X_3) у вигляді поліномів другого порядку:

- залежність відхилення заданого профілю при обробці кругом з профілем на основі ОДЄЄ:

$$Y_1 = 19,083 + 6,019 \cdot X_1 + 3,484 \cdot X_2 - 3,026 \cdot X_3 + 1,464 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,113 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,163 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,19 \cdot X_1^2 + 1,412 \cdot X_2^2 + 0,403 \cdot X_3^2; \quad (4.5)$$

- залежність відхилення заданого профілю при обробці кругом з профілем на основі УДЄЄ:

$$Y_2 = 18,748 + 4,684 \cdot X_1 + 5,674 \cdot X_2 - 2,77 \cdot X_3 + 1,101 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,575 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,576 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,661 \cdot X_1^2 + 2,625 \cdot X_2^2 - 1,197 \cdot X_3^2; \quad (4.6)$$

- залежність відхилення параметру шорсткості при обробці кругом з профілем на основі ОДЄЄ:

$$Y_3 = 1,715 + 0,142 \cdot X_1 - 0,185 \cdot X_2 + 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot X_3 - 8,75 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,026 \cdot X_1 \cdot X_3 - 3,75 \cdot 10^{-3} \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,017 \cdot X_1^2 - 0,031 \cdot X_2^2 + 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot X_3^2; \quad (4.7)$$

- залежність відхилення параметру шорсткості при обробці кругом з профілем на основі УДЄЄ:

$$Y_4 = 0,612 - 0,039 \cdot X_1 - 0,052 \cdot X_2 - 0,022 \cdot X_3 - 0,011 \cdot X_1 \cdot X_2 - 6,25 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,016 \cdot X_2 \cdot X_3 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot X_1^2 - 1,07 \cdot 10^{-3} \cdot X_2^2 + 0,024 \cdot X_3^2. \quad (4.8)$$

Ступінь впливу факторів перевірялась за критерієм Стьюдента при 5% рівні статистичної значимості. За результатами перевірки були побудовані діаграми Парето (рис. 4.12), які відображають ступінь впливовості факторів та їх взаємодій на процес шліфування. Діаграми Парето вказують на найбільшу значимість швидкості $V_{з.п.}$ (рис. 4.12 б, в, г) і частоти $n_{ex.}$ (рис. 4.12 а).

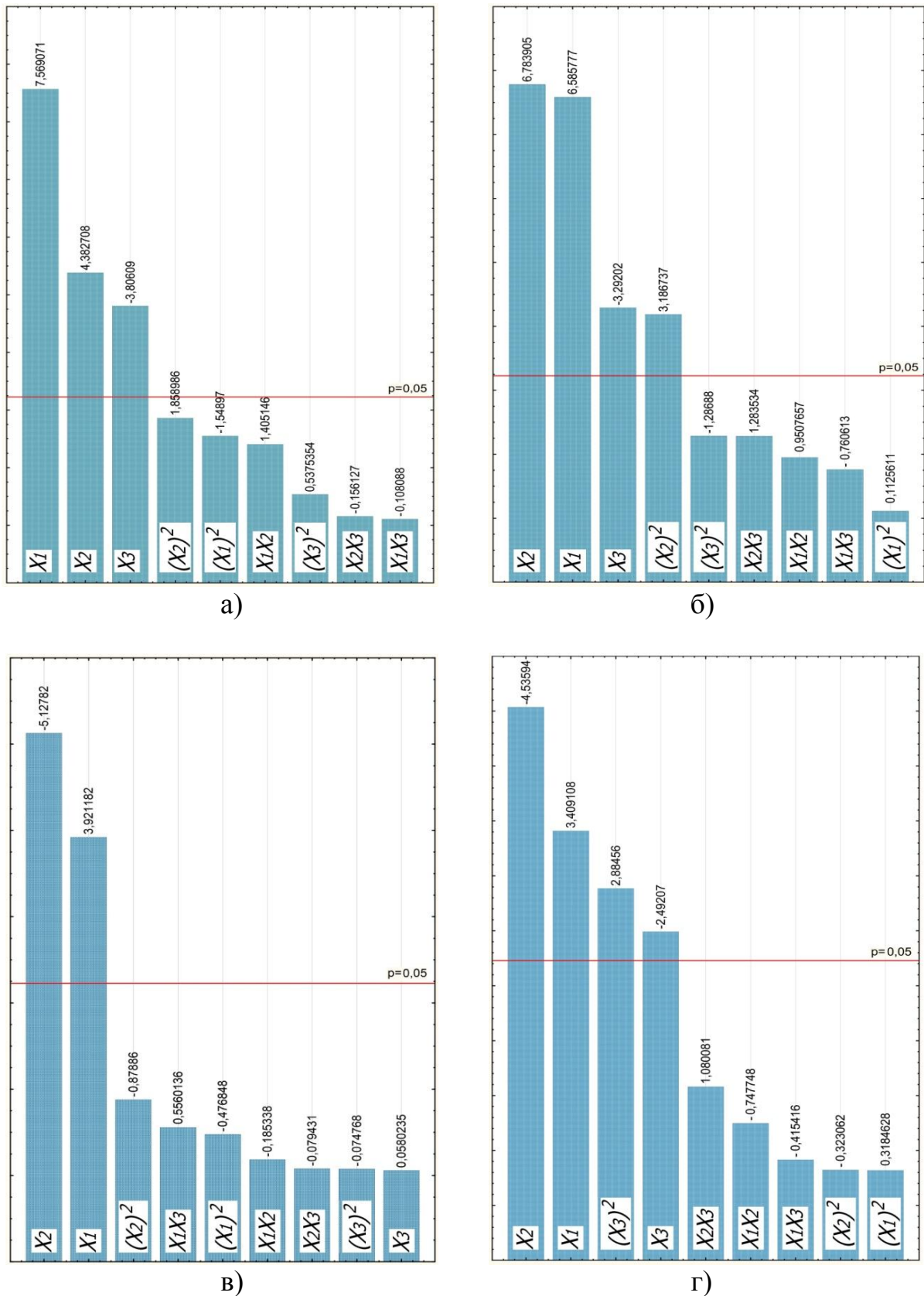


Рис. 4.12 Діаграми Парето впливу факторів та їх комбінацій на відхилення профілю цівкового колеса δf (а, б) і шорсткість поверхні (в, г), отриманих при шліфуванні кругами з профілем на основі ОДЕЕ (а, в) і УДЕЕ (б, г)

Усі без винятку залежності містять не значимі коефіцієнти при квадратичних членах X_i^2 , що вказує на необхідність перерахунку коефіцієнта b_0 за правилом найменших квадратів. Перерахунок здійснювався за формулою (4.2). Після перерахунку і виключення не значимих коефіцієнтів, залежності приймають вигляд:

$$Y_1 = 19,51 + 6,019 \cdot X_1 + 3,484 \cdot X_2 - 3,026 \cdot X_3, \quad (4.9)$$

$$Y_2 = 18,351 + 4,684 \cdot X_1 + 5,674 \cdot X_2 - 2,77 \cdot X_3 + 2,625 \cdot X_2^2, \quad (4.10)$$

$$Y_3 = 1,681 + 0,141 \cdot X_1 - 0,185 \cdot X_2, \quad (4.11)$$

$$Y_4 = 0,616 + 0,039 \cdot X_1 - 0,052 \cdot X_2 - 0,021 \cdot X_3 + 0,023 \cdot X_3^2. \quad (4.12)$$

З метою перевірки адекватності отриманих залежностей, були визначені критерії Фішера F_T і F_P , значення яких зведені до таблиці 4.6. Згідно умови $F_T > F_P$ усі отримані моделі можна вважати адекватними.

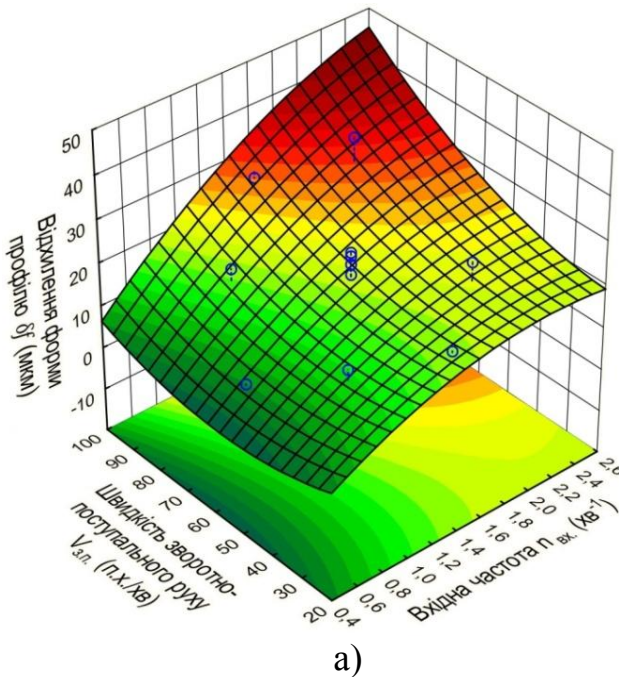
Таблиця 4.6

Критерій Фішера для отриманих залежностей

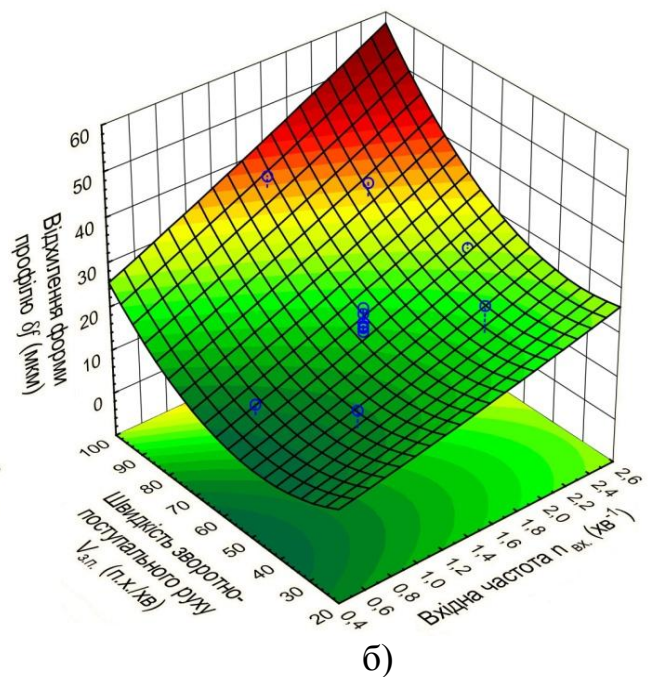
<i>Параметр оптимізації</i>	<i>Число ступенів свободи q_1</i>	<i>Число ступенів свободи q_2</i>	<i>Табличне значення F_T</i>	<i>Розрахункове значення F_P</i>
Y_1	5	11	3,2	1,809
Y_2	10	5	4,74	1,341
Y_3	12	5	4,68	2,192
Y_4	10	5	4,74	3,958

Перехід від кодованих до натуральних значень факторів виконано за формулами (4.4). Для кожної залежності було побудовано поверхні відгуку, які зображено на рис. 4.13. Поверхні відображають тенденцію зміни параметру оптимізації, залежно від зміни двох найбільш впливових факторів в межах варіювання, при обробці інструментами з різними типами геометрії профілю. Поверхні відгуку додатково супроводжуються контурними графіками, які призначені для зручності пошуку локальних екстремумів.

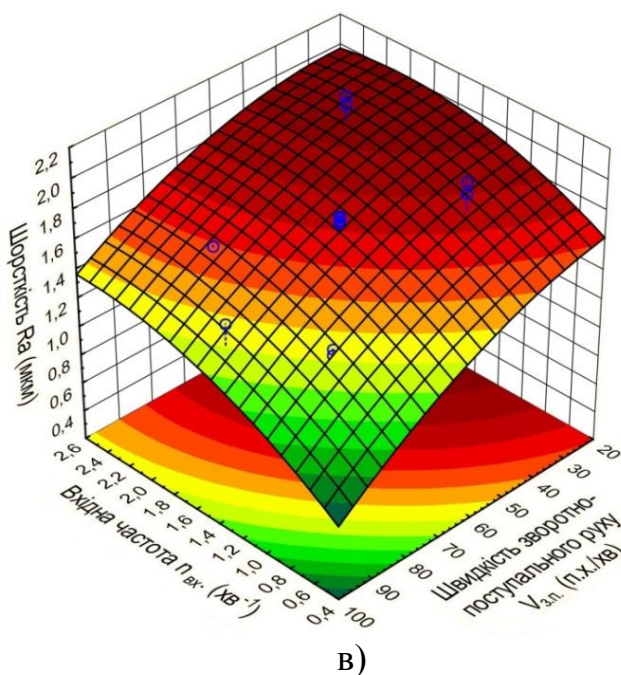
$$\delta f = 15,213 + 12,037 \cdot n_{ex.} + 0,174 \cdot V_{3.n.} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot n_{шк.}$$



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



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



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

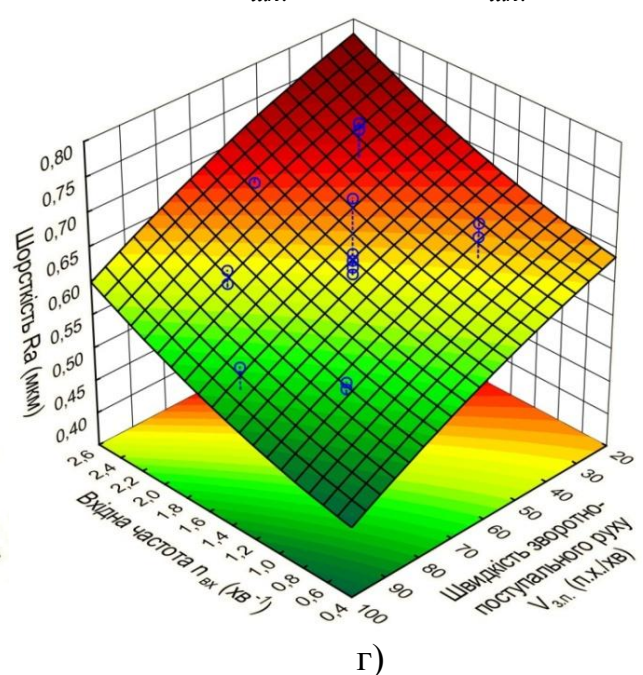


Рис. 4.13 Вплив швидкості зворотно-поступальних рухів круга $V_{3.n.}$ і вхідної частоти $n_{ex.}$ на відхилення форми заданого профілю цівкового колеса δf (а, б) та на шорсткість поверхні Ra (в, г), що забезпечуються обробкою кругами з профілями на основі ОДЕЕ (а, в) і УДЕЕ (б, г).

При одночасній фіксації факторів $V_{з.н.}$ і $n_{ex.}$ на верхніх рівнях (+1), було відмічено наявність надмірних вібрацій, які негативно впливають на процес шліфування. До того ж, підвищення $n_{ex.}$ веде до збільшення швидкості обкату і як наслідок, до збільшення подачі на подвійний хід інструменту. В результаті, одночасне збільшення $V_{з.н.}$ і $n_{ex.}$ призводить до того, що процес шліфування стає надмірно навантаженим. Зростання вібрацій і навантажень супроводжується збільшенням значення відхилення δf . Одночасно збільшення $V_{з.н.}$ позитивно впливає на параметр шорсткості. Аналіз графіків рис. 4.13, дозволяє зробити висновок, що оптимального балансу показників точності і шорсткості слід очікувати при нульовому рівні $V_{з.н.}$ і нижньому рівні (-1) $n_{ex.}$. Найкращі показники параметру оптимізації були отримані при наступних комбінаціях факторів:

- $\delta f = 6,5$ мкм (ОДЕЕ) для $n_{ex.} = 0,66$ хв⁻¹ (-1,682), $V_{з.н.} = 60$ п.х./хв (0), $n_{ш.к.} = 8000$ хв⁻¹ (0);

- $\delta f = 5,7$ мкм (УДЕЕ) для $n_{ex.} = 1$ хв⁻¹ (0), $V_{з.н.} = 40$ п.х./хв (-1), $n_{ш.к.} = 9000$ хв⁻¹ (+1);

- $Ra = 1,27$ мкм (ОДЕЕ) для $n_{ex.} = 1$ хв⁻¹ (0), $V_{з.н.} = 80$ п.х./хв (+1), $n_{ш.к.} = 9000$ хв⁻¹ (+1);

- $Ra = 0,54$ мкм (УДЕЕ) для $n_{ex.} = 1$ хв⁻¹ (0), $V_{з.н.} = 80$ п.х./хв (+1), $n_{ш.к.} = 9000$ хв⁻¹ (+1).

Одночасно найкращого балансу показників δf і Ra , які задовольняють кресленню рис. 4.6, було досягнуто при обробці кругом з профілем на основі УДЕЕ – $\delta f = 12,1$ мкм і $Ra = 0,56$ мкм для комбінації факторів $n_{ex.} = 0,66$ хв⁻¹ (-1,682), $V_{з.н.} = 60$ п.х./хв (0), $n_{ш.к.} = 8000$ хв⁻¹ (0).

Вплив геометрії інструмента ОДЕЕ-УДЕЕ також проявляється збільшенням відхилення розташування поверхні (перпендикулярність відносно

торців). Так для профілю круга на основі ОДЕЕ, поле розсіювання цього параметру лежить в межах 1,5-7,8 мкм, а для УДЕЕ – 1,7-16,3 мкм.

4.4 Результати дослідження показників точності в межах окремих цівок, та стійкості інструментів

Визначення точності в межах окремих цівок проводилось з метою перевірки результатів моделювання п. 3.5, про вплив пружних деформацій оправки з інструментом, під час його обкату уздовж активної ділянки дуги цівки. Дана особливість обумовлена нерівномірною кривизною профілів інструментів, змінною швидкістю точки контакту, а також зміною площ контакту в процесі обкату. Вимірювання форми відхилення профілю здійснювалось на профілограф-профілометрі Mahr GD 25 (рис. 4.14) з руйнуванням (розріз на 2 частини) 4х тестових зразків, вибірково взятих із двох партій деталей (оброблених кругами, що мають різний профіль).

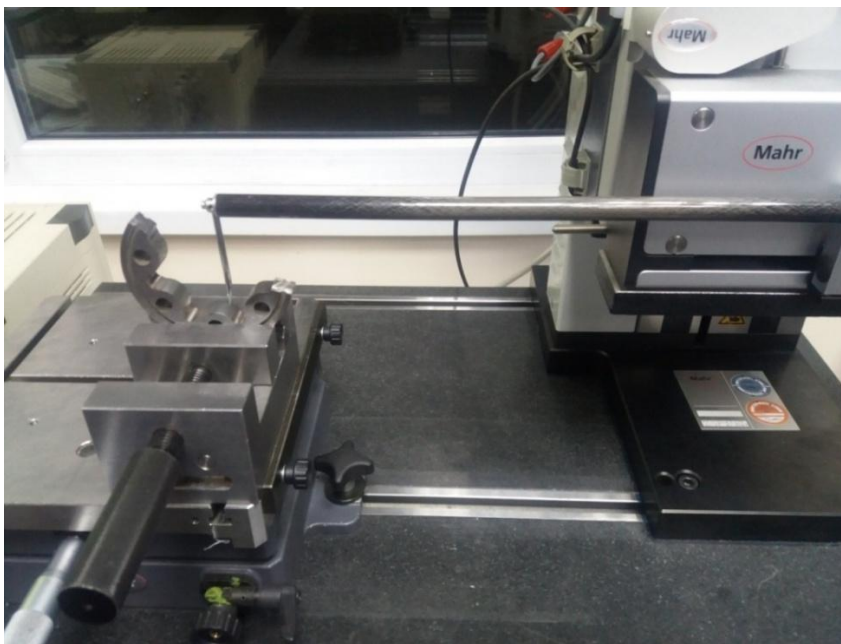


Рис. 4.14 Вимірювання відхилення від заданого профілю на профілограф-профілометрі Mahr GD-25 в межах окремих цівок

Руйнування проводилось з метою забезпечення повноцінного доступу контактному щупу до обробленої поверхні, для вимірювання відхилення форми в межах однієї цівки. В результаті обмірів отримані форми похибок у вигляді неповних круглограм, які представлені в додатку Е.

Результати вимірювання відхилення форми заданого профілю в межах окремих цівок, частково підтверджують результати моделювання в п. 3.5. Оскільки окремий вплив на фактичний профіль відхилення має знос інструменту, говорити про повне підтвердження результатів п. 3.5 неможливо. Для шліфування кругом з профілем на основі ОДЄЄ характерна особливість, коли максимальні відхилення розташовуються поблизу кінцевих точок активного профілю цівки, при цьому зберігається стабільно висока точність центральної ділянки дуги. Застосування профілю на основі УДЄЄ супроводжується наявністю систематичного відхилення в центральній ділянці дуги, що пояснюється високими значеннями площ контакту в центрально-симетричній фазі обкату. Приведені форми відхилень відповідають результатам моделювання на рис. 3.12, а, б. Отримані результати вказують на актуальність лінеаризації $V_2(\varphi)$, для досягнення стабільності процесу та підвищення точності процесу шліфування.

В ході проведення експерименту, кожен шліфувальний круг перевірявся на наявність відхилень геометрії, які неминуче виникають в результаті зносу. Дослідження стійкості проводилось згідно методики п. 4.2. Відпрацьовані шліфувальні круги встановлювались на оптичному профіleshліфувальному верстаті 395МФ10. При багатократному збільшенні здійснювалась перевірка на наявність відхилень. Експериментально встановлено, що стійкість інструменту з профілем на основі ОДЄЄ складає 4 безперервно оброблених цівок, в той же час цей показник для УДЄЄ складає 12 цівок. Низьку стійкість профілю на основі ОДЄЄ можна пояснити тим, що взаємодія опуклих поверхонь породжує контактний тиск між абразивним тілом і поверхнею цівки, який розподіляється по малій площі контакту, спричиняючи руйнування абразивного тіла. Шліфування опуклої поверхні увігнутим профілем має більш позитивний характер – контактний тиск рівномірно розподіляється по більшій площі, завдаючи меншої шкоди інструменту. Найбільш часті типи руйнування інструменту в результаті зносу приведені на рис. 4.15 і 4.16.

Було виявлено систематичну закономірність зносу профілю на основі ОДЄЄ в конкретних місцях, що очевидно пов'язано з наявністю екстремальних значень радіуса кривизни (див. п. 2.1). Саме на ділянках з мінімальною кривизною в 90% випадків було виявлено локальне відхилення профілю, в результаті зношування і викришування абразивних зерен.

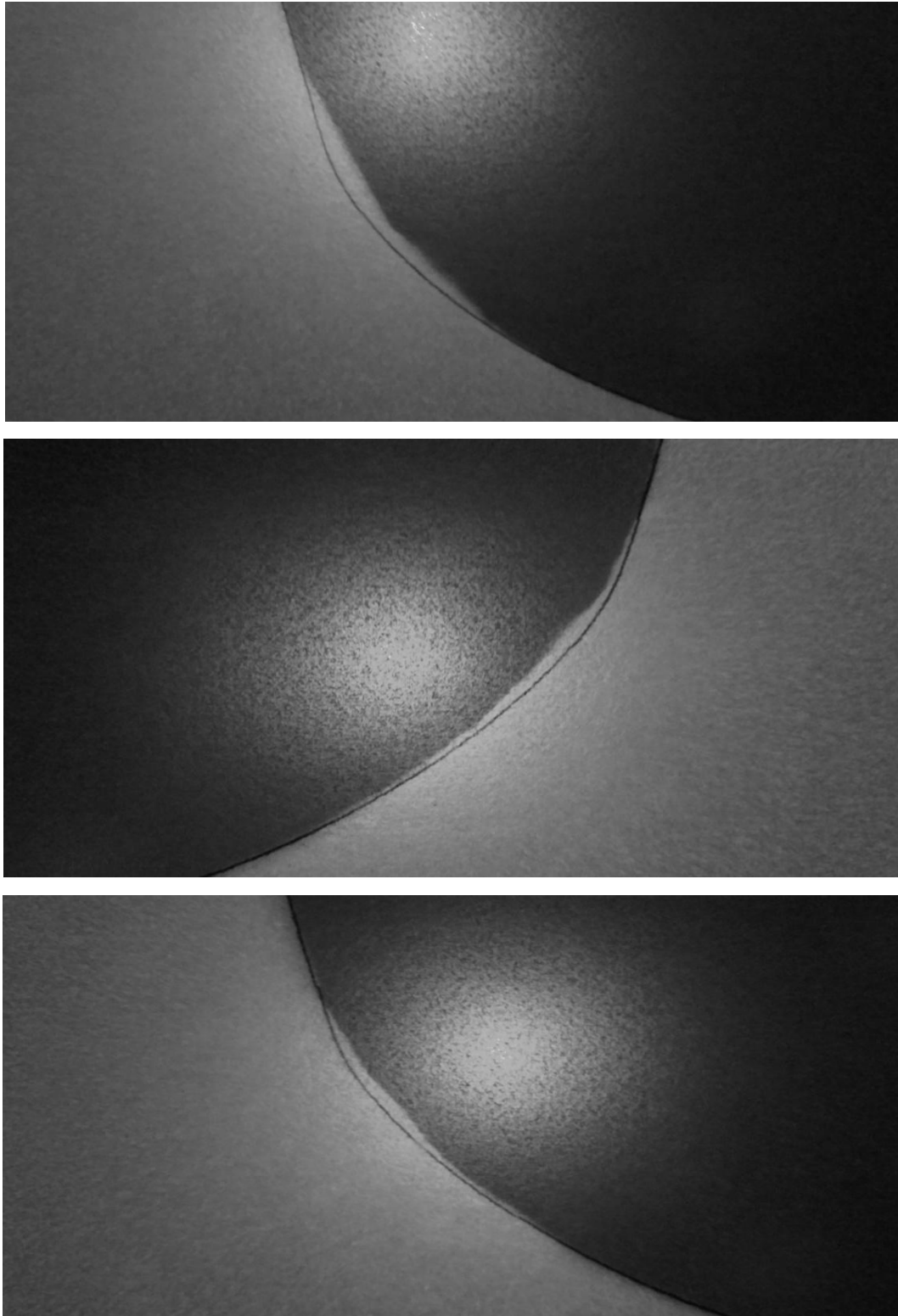


Рис. 4.15 Типові руйнування профілю на основі ОДЄЄ в результаті зносу

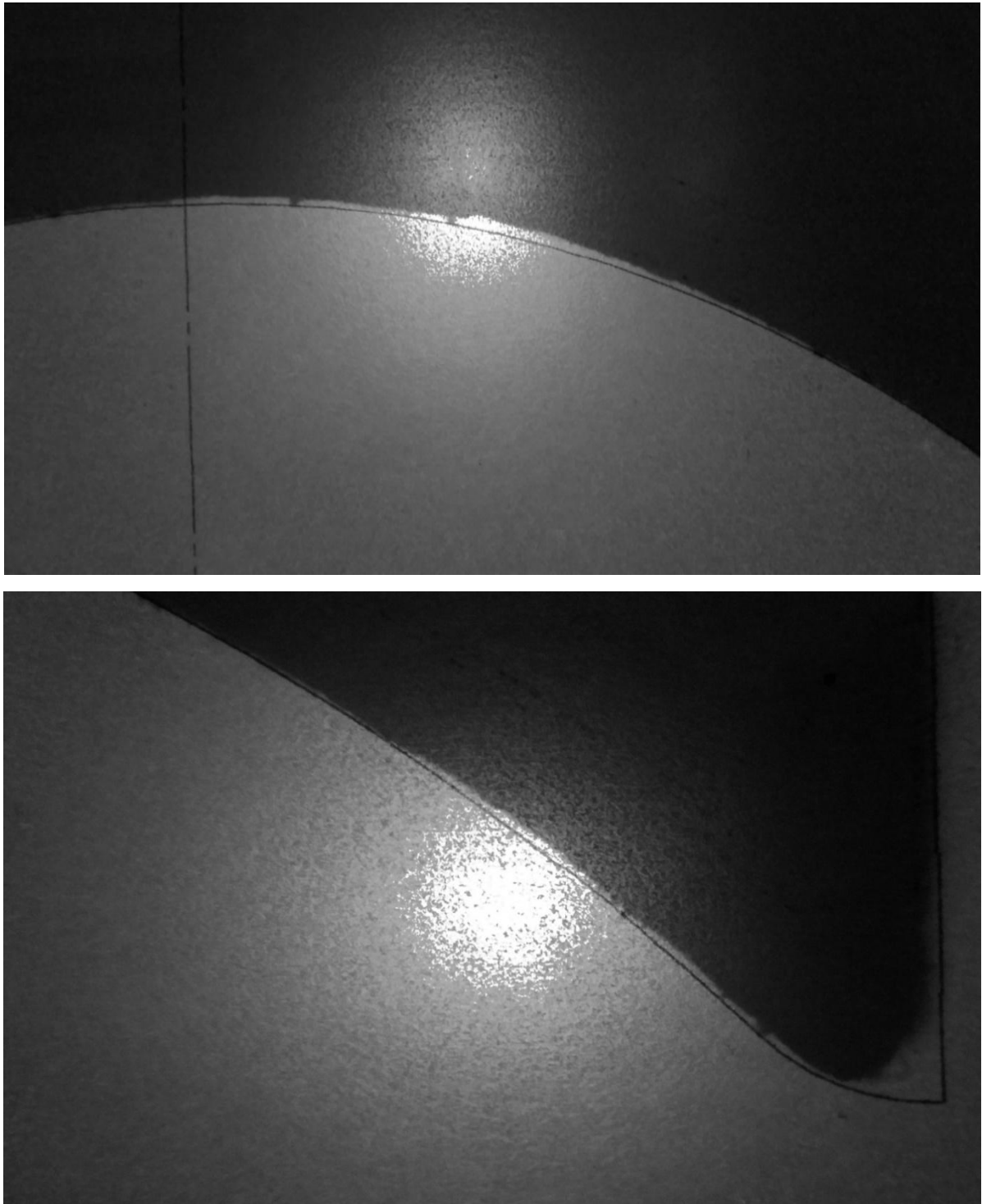


Рис. 4.16 Типові руйнування профілю на основі УДЕЕ в результаті зносу

Систематичний характер зносу профілю УДЕЕ в рамках даного експерименту не підтвердився. Хоча кінцеві опуклі радіусні ділянки мають низьку геометричну стійкість, дані конструктивні елементи є допоміжними. Вимірювання показників точності цівкового колеса свідчить про мінімальний вплив зносу на кінцевих радіусних ділянках профілю на основі УДЕЕ.

4.5 Висновки до розділу

1. Практична реалізація методу шліфування цівкового колеса дозволила встановити, що поле розсіювання параметру відхилення заданого профілю δf при обробці кругом з профілем на основі ОДЄЄ знаходиться в межах 6,5-35,9 мкм, а застосовуючи профіль на основі УДЄЄ – 5,7-38,3 мкм. Шорсткість оброблених поверхонь для ОДЄЄ знаходиться в межах Ra 1,27...2,11 мкм, для УДЄЄ – Ra 0,54...0,83 мкм. Приведені результати свідчать про перевагу застосування профілю на основі УДЄЄ, який забезпечує в 2,3-2,5 рази кращу шорсткість при співрозмірних полях розсіювання параметру δf , та однакових режимах обробки.

2. Частково експериментально підтверджені результати моделювання впливу пружних деформацій елементів оснащення на точність формоутворення профілю окремих цівок. Для круга з профілем на основі ОДЄЄ характерна наявність максимальних відхилень поблизу кінцевих точок. Натомість при застосуванні круга з профілем на основі УДЄЄ, максимальне відхилення розташоване уздовж центральної ділянки активної дуги цівки. Приведені особливості адекватні результатам моделювання в п. 3.5 (рис. 3.12).

3. Експериментальна стійкість інструменту на основі ОДЄЄ склала 4 безперервно оброблених цівки, в той час для УДЄЄ цей показник складає 12 цівок. Застосування кругів з профілем на основі ОДЄЄ доцільно за умов їх якісного виготовлення (наприклад, по технології гальванічного напилення абразиву) і високої стійкості до викришування зерен. Застосування кругів з профілем на основі УДЄЄ на керамічній зв'язці доцільно в одиничному та дрібносерійному виробництві за умови активного контролю профілю та можливості контурної правки круга. Експериментально підтверджено підвищену схильність до руйнування ділянок ОДЄЄ з мінімальною кривизною.

РОЗДІЛ 5

ШЛЯХИ РЕАЛІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ КОЛІС ГЕРОТОРНОЇ ПАРИ В УМОВАХ ОДИНИЧНОГО ТА СЕРІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

5.1 Розробка конструкції безпривідної шліфувальної оправки з виносним шпинделем для вертикальних обробних центрів

Для одиничного та дрібносерійного типу виробництва цівкових коліс, яке передбачає широкий спектр типорозмірів, базовий метод шліфування і його вдосконалений варіант, доцільно адаптувати до широко розповсюдженого універсального обладнання. Представлені в п. 3.1 схеми формоутворення можуть бути ефективно реалізовані на універсальних ОЦ з ЧПК. Таке обладнання має широкі функціональні можливості і є досить розповсюдженим як на великих машинобудівних підприємствах, так і в умовах одиничних і ремонтних цехів. Але для здійснення обробки цівкових коліс в умовах обкату, необхідно здійснити додаткову модернізацію. Прикладом такої модернізації може слугувати спеціальне оснащення для проведення експериментальних досліджень, опис якого приведено в п. 4.1. В звичайних умовах ОЦ не призначені для спеціальних операцій шліфування, а конструкція їх шпиндельного вузла передбачає затиск конічних оправок з кінцевим інструментом. В окремих випадках ряд фірм, які займаються інструментальним забезпеченням, можуть запропонувати кутові головки, які дозволяють розташовувати кінцевий інструмент під різними кутами до вісі шпинделя. При цьому оснащення кріпиться до нерухомих елементів верстату, а обертання інструменту передається від основного шпинделя. В пристрої для профільного шліфування внутрішніх поверхонь (див. рис. 4.2 і 4.3), обертання круга здійснюється від окремого приводу. Суттєвим недоліком пристрою є те, що для живлення приводу обертання необхідний додатковий підвід джерела живлення і частотний перетворювач. В електричних схемах ОЦ не передбачено подібних

засобів. Крім того, системи ЧПК мають підвищену чутливість до сторонніх джерел струму, що створює необхідність ізоляції пристрою від елементів кріплення. З міркувань безпеки та відмови від стороннього джерела живлення, є сенс розробити конструкцію безпривідної оправки, де обертання круга здійснюватиметься від основного шпинделя. Один із можливих конструктивних варіантів безпривідної шліфувальної оправки яка дає змогу здійснювати шліфування цівкового колеса на вертикальних ОЦ, представлено на рис. 5.1.

Будова і принцип дії пристрою наступний. За допомогою адаптера 1, конструкція кріпиться до нерухокої пінолі шпинделя. Конструктивні параметри адаптера залежать від конкретної моделі ОЦ. Адаптер жорстко з'єднаний з редуктором, який складається із корпусу 2, кришки верху 3 і низу 4, ведучого вхідного валу 5 і веденого 6, двох конічних зубчатих коліс 7 і 8, двох пар підшипників 21 і 22. Кінець вхідного валу виконано у вигляді шестикутника, який вводиться в шестикутний отвір конічної оправки 10, яка в свою чергу базується в основному шпинделі. Таким чином обертовий рух передається на вхідний вал і через зачеплення пари зубчатих коліс на ведений вал. На веденому валу розміщений зубчатий шків 14 для подальшої передачі обертів до круга. До торця нижньої кришки 4 приєднана затискна втулка 11, в посадковий отвір якої встановлюється оправка з виносним шпинделем 13 із кругом. Конструкція оправки з виносним шпинделем, що приведена в п. 4.1 (рис. 4.4) є актуальною для даного оснащення. Затиск оправки відбувається за рахунок стяжного кільця 12. Шків веденого валу з'єднаний із шківом інструменту через зубчатий пас 33. Зубці конічних коліс виконані криволінійними, для покращення динамічних характеристик.

Представлене оснащення дозволяє вести обробку широкого спектру коліс із внутрішнім зубчатим зачепленням (евольвентним і неевольвентним), фасонних важкодоступних поверхонь, отворів з гострими кутами (прямокутних, трикутних, квадратних). Для цього необхідно здійснити профілювання круга, для забезпечення необхідної форми.

Як відомо, для здійснення операції шліфування цівкового колеса, круга необхідно надати осцилюючий рух. Це досягається шляхом програмування осциляції каретки шпindelного вузла по вісі *Z*. Але тривала експлуатація верстату в такому режимі може призвести до передчасного зносу і появи люфтів в парі гвинт-гайка кочення, в результаті дії інерційних навантажень. Тому шліфувати подібним методом на обладнанні з кульково-гвинтовими передачами рекомендовано лише в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва. Довготривалу обробку при серійному виробництві можливо здійснювати на верстатах з лінійним або електромеханічним приводом осциляції шпindelного вузла, де відсутні точні механізми передачі руху, які зазнають негативного впливу інерційних навантажень.

5.2 Розробка компоновки зубошліфувального обробного центру для фінішної обробки коліс зовнішнього і внутрішнього зачеплення

Окрім оснащення для розширення технологічних можливостей універсальних ОЦ, перспективним напрямком впровадження пропонованої технології фінішної обробки цівкових коліс може стати розробка принципово нового обладнання для фінішної зубообробки. Ідея полягає в створенні верстатної компоновки, яка здатна забезпечити необхідні технологічні рухи для формоутворення зубчастих коліс зачеплення в умовах обкату. Обмежуватись обробкою лише коліс ГП недоцільно, більш раціональним є забезпечення можливості обробки різних коліс з евольвентними, та відмінним від нього профілями зубців, причому як зовнішніх, так і внутрішніх. В даному підрозділі приводиться спроба синтезу такої компоновки.

Найбільш точний і високопродуктивний метод фінішної обробки зубчастих коліс зовнішнього зачеплення з неперервною генерацією зубчатого вінця – шліфування черв'ячним кругом. Даний метод придатний для обробки широкої гами коліс з евольвентним і відмінним від нього профілем, тому його доцільно прийняти за основу при розробці компоновки.

Шліфування внутрішніх зубців в більшості випадків здійснюють методом копіювання, в умовах одиничного ділення. Цей метод є найпоширеніший і найпростіший з точки зору технічної реалізації. Шліфування внутрішніх зубців в умовах обкату технічно ускладнене, тому цей метод практично не використовується. Оригінальний підхід до вирішення проблеми обробки коліс внутрішнього зачеплення в умовах обкату, приводиться в авторському свідоцтві С. П. Радзевича [10], де пропонується застосування спеціального інструменту – обкатного черв'яка. Цей інструмент являє собою глобоїдний черв'як, профільна поверхня якого в нормальному перерізі описана евольвентою зуба спряженого колеса. Як і у випадку шліфування цівкового колеса, обкатний черв'як встановлюється в спеціальну оправку з виносним шпинделем і вводиться в порожнину колеса, утворюючи з ним зачеплення. Дане технічне рішення також доцільно взяти за основу при створенні верстатної компоновки для здійснення інтегрованої технології зубошліфування. Приймаючи за базові методи обробки черв'ячним кругом і обкатним черв'яком, була розроблена компоновка зубошліфувального обробного центру, яка може слугувати основою для створення діючої моделі. Дана компоновка подана на рис. 5.2. В якості прототипів для розробки, взято два закордонних патенти [67, 70] на зубошліфувальні верстати для обробки зовнішніх і внутрішніх зубчастих вінців. Також взято до уваги результати, подані в роботі І. Є. Грицяя [24], щодо сучасної концепції обладнання та інструментів для високошвидкісної чистової зубообробки.

Розроблена компоновка передбачає вертикальне розташування вісі зубчатого колеса. Обробний центр складається із цільної станини 1, каретки 2, яка забезпечує вертикальне переміщення шпиндельної групи 3, кареток повздовжнього і поперечного переміщення 4 і 5, поворотного столу 6, вертикальної колони 7, пристрою для правки кругів 8, центру фіксації заготовок зубчатих коліс 9. Вертикальне переміщення шпиндельної групи уздовж вісі Z_1 , забезпечується сервоприводом 10.

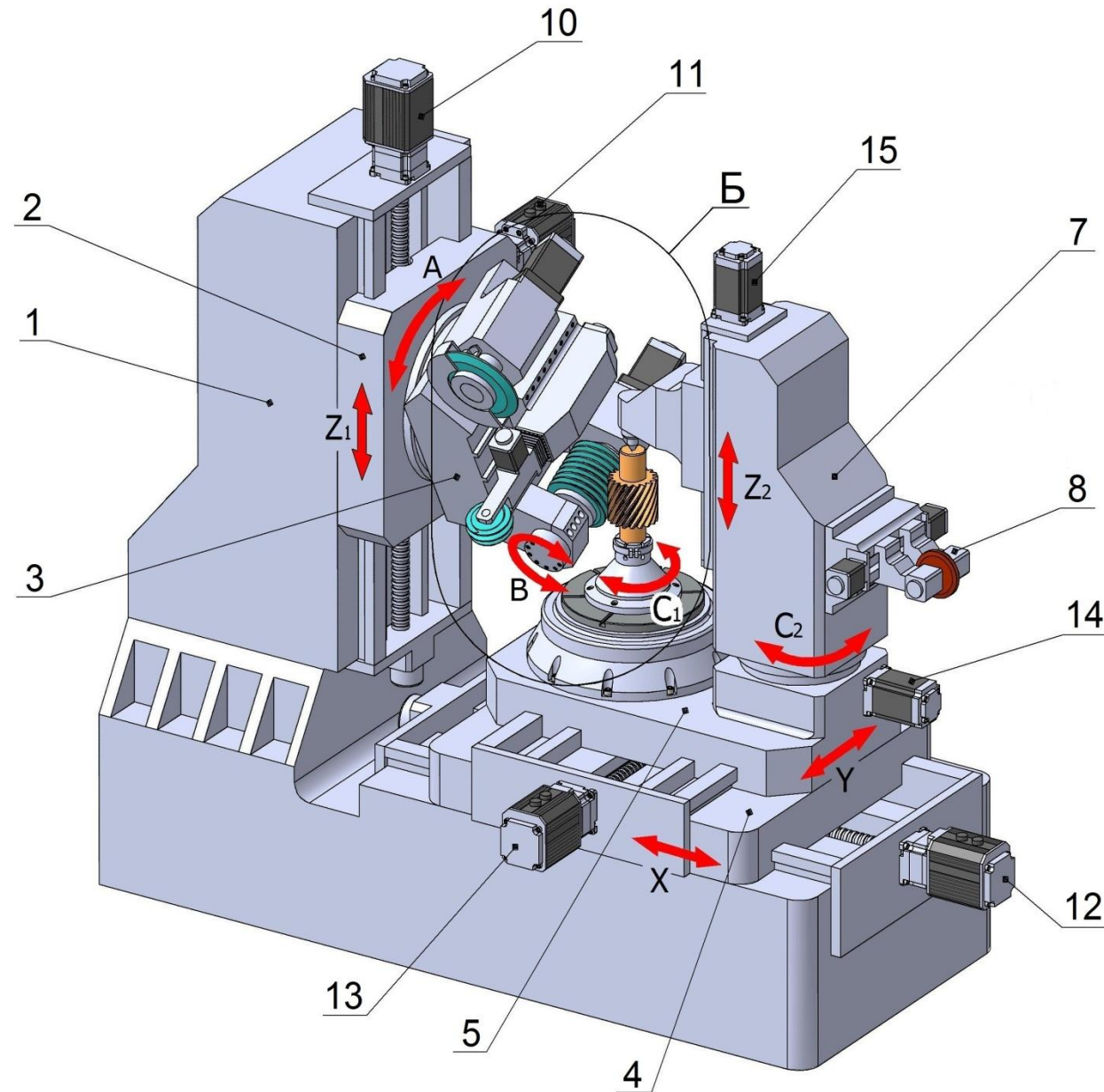
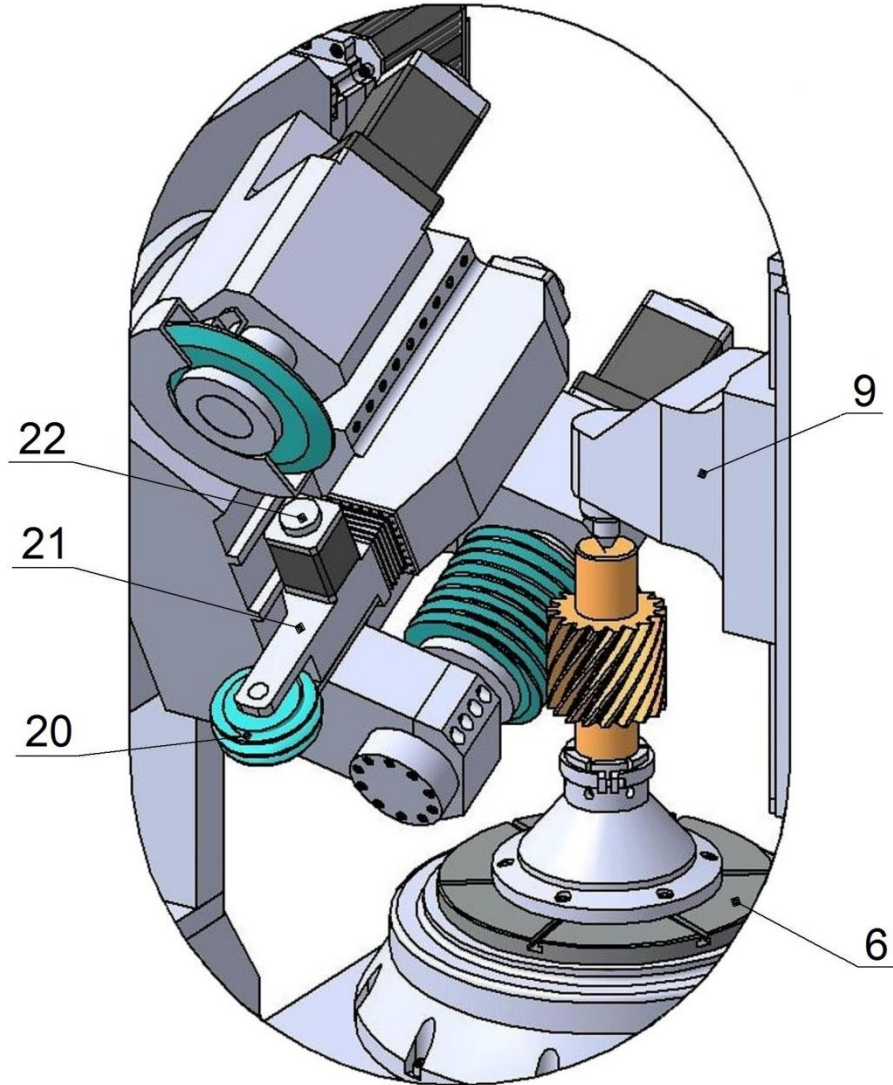


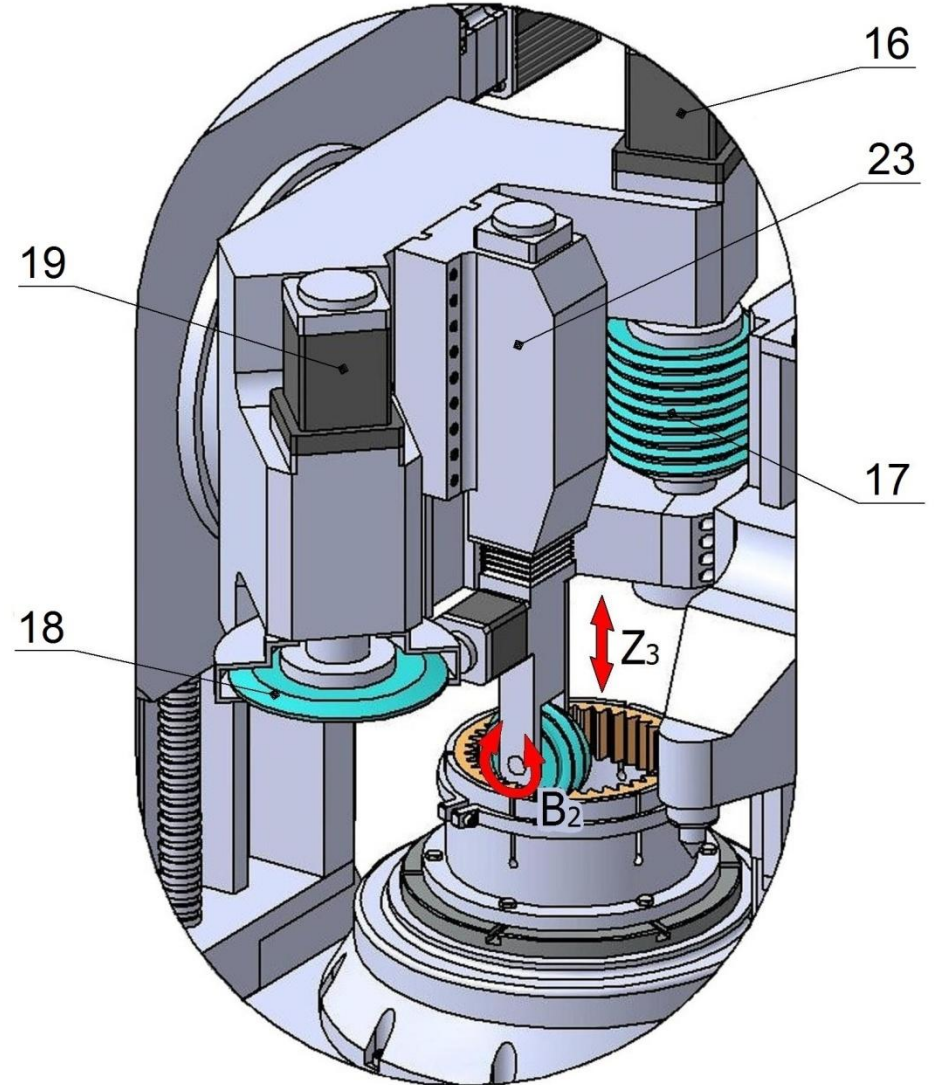
Рис. 5.2 Компонівка
зубошліфувального обробного
центру для фінішної обробки коліс
зовнішнього і внутрішнього
зачеплення в умовах обкату

1 – станина; 2 – шпіндельна каретка;
3 – шпіндельна група; 4, 5 – каретки
повздовжнього і поперечного
переміщень; 6 – поворотний стіл;
7 – допоміжна вертикальна колона; 8 –
пристрій для правки кругів; 9 – центр
фіксації заготовок; 10 – сервопривід
вертикального переміщення шпіндельної
групи; 11 – сервопривід повороту
шпіндельної групи; 12, 13 –
сервоприводи повздовжнього і
поперечного переміщення поворотного
столу; 14 – сервопривід повороту
допоміжної колони; 15 – сервопривід
вертикального переміщення підтискного
центру; 16 – сервопривід обертання
черв'ячного шліфувального круга; 17 –
черв'ячний круг для коліс зовнішнього
зачеплення; 18, 19 – дисковий круг для
обробки в умовах копіювання і його
привід; 20 – черв'ячний круг для обробки
коліс внутрішнього зачеплення в умовах
обкату; 21, 22 – оправка з виносним
шпинделем і її сервопривід; 23 – привід
зворотно-поступальних рухів

Б(2:1)
*Шліфування шестерні
 зовнішнього зачеплення*



Б(2:1)
*Шліфування колеса
 внутрішнього зачеплення*



Поворот шпindelної групи (рух A) для шліфування косозубих коліс або зміни інструментальної позиції, забезпечується сервоприводом 11. Рухи поворотного столу з деталлю у площині XOY , забезпечуються сервоприводами 12 і 13. Вертикальна колона 7 має змогу здійснювати поворот (рух C_2), за допомогою сервоприводу 14. Вертикальна колона 7 має направляючі (вісь Z_2), уздовж яких переміщується центр 9, для фіксації заготовки. Рухи поворотного столу із заготовкою у площині XOY , забезпечуються сервоприводами 12 і 13. Переміщення центру здійснюється від сервоприводу 15. На цій же колоні, з протилежної сторони розміщено пристрій для правки 8. На каретці шпindelної групи 3 розміщено три самостійних шпindelних вузла. На вісь першого шпинделя встановлюється черв'ячний круг 16, для обробки коліс зовнішнього зачеплення. Він отримує обертовий рух від сервопривода 17.

Другий шпindel забезпечує обертання дискового круга 18, він приводиться в дію від привода 19. Основне призначення цього шпинделя – шліфування коліс методом копіювання (коліс з великим модулем, шліфування черв'яків і конічних коліс з прямим зубом). Третій шпindel є виносним, його основне призначення – шліфування внутрішніх зубчатих вінців. Круг 20 для обробки внутрішніх зубців, встановлюється у спеціальну оправку 21 з виносним шпindelом. Його обертання здійснюється від сервопривода 22. Оправка 21 із кругом стикується до спеціальної бабки 23, в корпусі якої розміщено привід лінійної осциляції. В якості такого привода найдоцільніше застосувати лінійний або електромеханічний привід. Основною перевагою таких приводів є відсутність передатних механічних ланок, та можливість керування безпосередньо від системи ЧПК. Амплітуда і швидкість зворотно-поступальних рухів вводяться в систему ЧПК в процесі наладки, враховуючи параметри оброблюваної деталі. Для підвищення ступеню автоматизації, ОЦ має бути оснащений системою контактних щупів (наприклад, RENISHAW) для автоматичного здійснення наладки та підналадки. Поворот допоміжної вертикальної колони дозволяє профілювати і правити круги зі складним профілем, зокрема глободні. Позиціонування заготовки уздовж осей X і Y в

сукупності із програмованим поворотом C_1 , дає змогу надавати колесам варіанти планетарного руху, зокрема необхідні для обробки цівкових коліс. Для здійснення обробки внутрішніх гвинтових зубців, спочатку здійснюється поворот шпindelної групи 3 на необхідний перехресний кут, після чого інструмент вводиться в порожнину колеса і утворює з ним зачеплення. Далі каретка 2 і шпindelна група 3 переміщуються в осьовому напрямку, уздовж вісі Z_1 . Осьове переміщення інструменту супроводжується додатковою ротацією заготовки – якщо величина осьового переміщення відповідає кроку гвинтової лінії, то кут ротації буде рівний 360° .

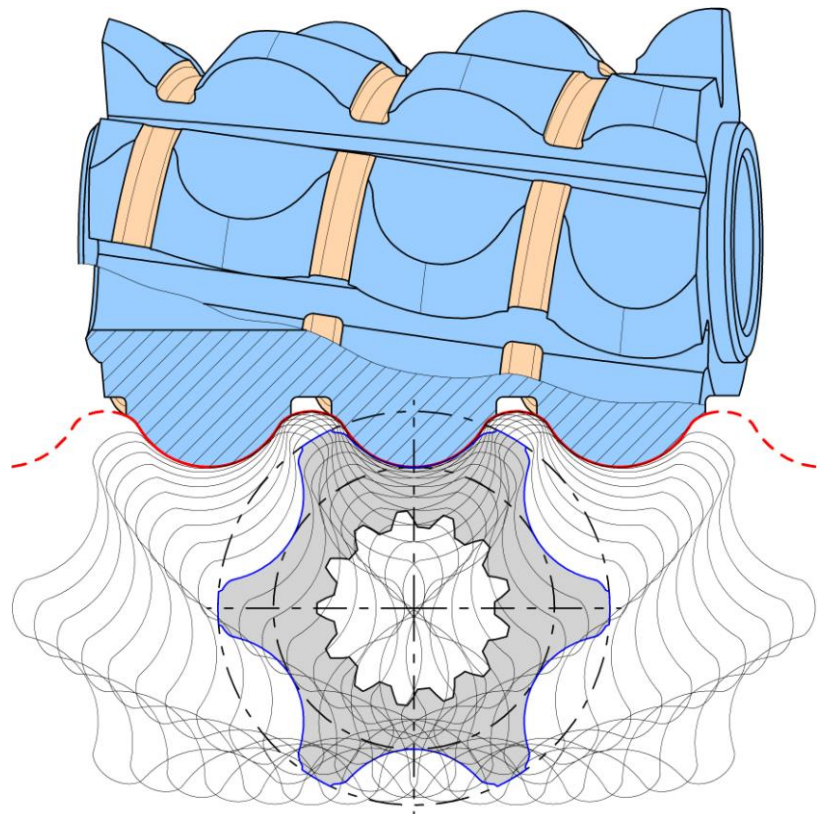
5.3 Синтез профілів черв'ячних інструментів для високоефективної технології обробки сателітів

Для забезпечення високих якісних показників зачеплення ГП, не менш важливим є точне виготовлення сателіту, а саме точне дотримання геометрії його профільної поверхні. З цією метою пропонується застосувати технологію обробки профілю сателіту комплексом черв'ячних інструментів – фрезерування черв'ячною фрезою з послідуєчим шліфуванням черв'ячним кругом.

Для виготовлення циклоїдального профілю сателіту використовується різний за складністю інструмент, зокрема черв'ячні фрези. Методика розрахунку і синтезу вихідного контуру такої фрези найбільш детально представлена в праці Шанікова [113]. Контур фрези формується за відомими принципами побудови контуру інструментальної рейки. Для його синтезу, користуються графоаналітичним методом. Точність побудови контуру фрези в цьому випадку буде залежати від дискретності сімейства положень сателіту, відносно якого будується обвідна. Цей метод є трудомістким та складним, навіть за умови використання сучасних CAD-систем. Слід також додати, що фреза, представлена в роботі [113], працює повною довжиною неперервної різальної кромки. Як відомо, при обробці евольвентних зубців, западина контуру фрези не задіяна в процесі формоутворення профілю зуба. Для

формоутворення профілю сателіту, процес різання повинен здійснюватись уздовж усієї довжини ріжучого контуру безперервно. Різання ділянкою западини, яка має увігнуту форму, призведе до надмірних навантажень і втрати стабільності процесу. Для вирішення даної проблеми, в конструкцію черв'ячної фрези пропонується ввести гвинтову канавку уздовж западини (рис. 5.3), для зняття енергетичного навантаження, яке спрямовується на пластичну деформацію і усадку стружки. Неповністю видалений сегмент припуску при верхівці зуба, буде видалено на послідуєчій операції шліфування.

Рис. 5.3 Схема утворення контуру в нормальному перерізі черв'ячної фрези з гвинтовою канавкою для обробки сателіту



Для синтезу контуру фрези або черв'ячного шліфувального круга, необхідно вирішити задачу знаходження обвідної при заданому законі руху. Подібна задача була вирішена в п. 2.1. На рис. 5.4 представлена розрахункова схема з відповідними позначеннями, для аналітичного опису контуру інструментальної рейки. Маємо дві системи відліку – рухому ($x, \xi; y, \eta$), яка здійснює поступальний і обертальний рухи, та інерціальну (X, Y), яка пов'язана із контуром рейки. В початковому положенні центр центроїди сателіта з радіусом Ra_c (коло вершин сателіту) співпадає з початком відліку O_1 інерціальної системи відліку. Полюс зачеплення деталі з інструментом

Далі знаходимо розв'язок рівняння (5.3) відносно t :

$$t(\varphi) = \arcsin \left(\frac{x(\varphi) \cdot dx/d\varphi + y(\varphi) \cdot dy/d\varphi}{Ra_c \cdot \sqrt{(dx/d\varphi)^2 + (dy/d\varphi)^2}} \right) - \beta(\varphi). \quad (5.4)$$

Функція $\beta(\varphi)$ в формулі (5.4) тотожна функції (2.23), опис якої подано в п.2.1. Остаточний розв'язок (5.4) після підстановки значення $\beta(\varphi)$ і диференціювання приймає вигляд:

$$t(\varphi) = \arcsin \left(\frac{R_1 \cdot R_{у.у.} \cdot \sin \left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2} \right)}{Ra_c \cdot \sqrt{R_{у.у.}^2 + R_2^2 - 2 \cdot R_{у.у.} \cdot R_2 \cdot \cos \left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2} \right)}} \right) - \arctg \left(\frac{R_2 \cdot \sin \left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2} \right)}{R_{у.у.} - R_2 \cdot \cos \left(\frac{z_1 \cdot \varphi}{z_2} \right)} \right) - \frac{\varphi}{z_2}. \quad (5.5)$$

Обвідна сімейства вкорочених епіциклоїд буде задаватись рівняннями (5.1) (5.2), після підстановки $\xi(\varphi)$ і $\eta(\varphi)$ замість $x(\varphi)$ і $y(\varphi)$, а також $t(\varphi)$ замість t . Запишемо остаточні рівняння контуру інструментальної рейки:

$$X_{к.і.р.}(\varphi) = \eta(\varphi) \cdot \cos t(\varphi) - \xi(\varphi) \cdot \sin t(\varphi) + Ra_c \cdot t(\varphi), \quad (5.6)$$

$$Y_{к.і.р.}(\varphi) = \xi(\varphi) \cdot \cos t(\varphi) + \eta(\varphi) \cdot \sin t(\varphi). \quad (5.7)$$

Сімейство кривих та його обвідна представлені у вигляді графіка на рис 5.5.

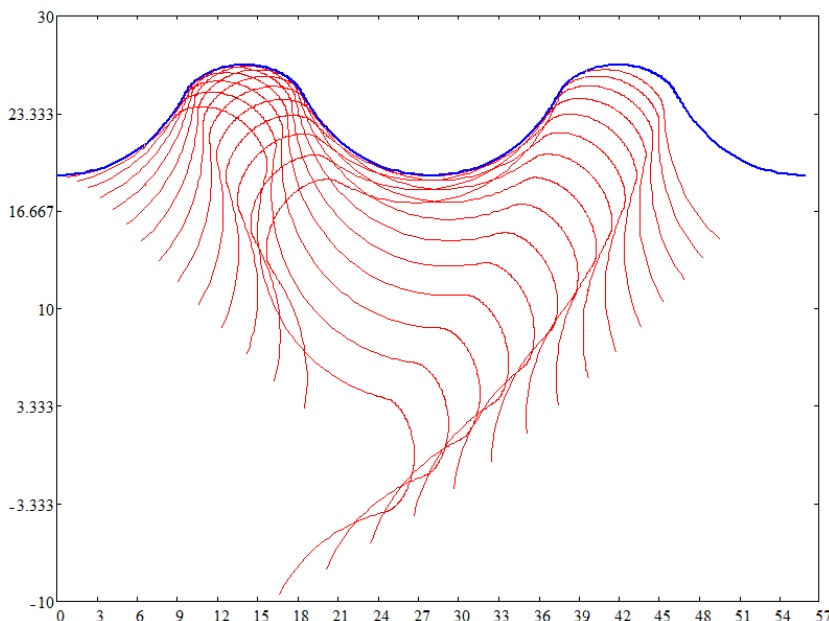


Рис. 5.5 Сімейство
еквідистант до
вкорочених епіциклоїд і
його обвідна, що формує
контур інструментальної
рейки

Для проектування черв'ячного інструменту в CAD-системі, достатньо побудувати ділянку обвідної, обмежену кроком p інструментальної рейки. Зі схеми (рис. 5.5) крок буде визначатись за формулою:

$$p = \frac{2\pi \cdot Ra_c}{z_1}. \quad (5.8)$$

Область визначення аргументу φ для побудови контуру інструментальної рейки, обмеженої кроком p буде лежати в межах:

$$\varphi \in \left[0; \frac{2\pi \cdot z_2}{z_1} \right]. \quad (5.9)$$

Фрезерування профілю сателіту може бути успішно здійснено практично на будь-якому зубофрезерному верстаті, де обробка ведеться в умовах обкату. Аналогічно, технологія шліфування черв'ячним кругом може бути реалізована на відповідному зубошліфувальному верстаті. В цілому представлена методика розрахунку буде корисною інженерам на етапі проектування та підготовки виробництва, коли необхідно виготовити подібний складний інструмент.

5.4 Новий інструмент для високопродуктивної фінішної обробки цівкових коліс

Час затрачений на обробку цівкового колеса в умовах обкату прямопропорційний кількості цівок. З метою підвищення продуктивності шліфування цівкових коліс в умовах обкату з великими кількостями зубців (більше 10), пропонується застосувати новий інструмент – глобоїдний шліфувальний круг зі спеціальним профілем. За прототип взято обкатний глобоїдний черв'як [9] для внутрішніх евольвентних зубців, опис якого подано в п. 5.2. Пропонований інструмент являє собою глобоїдний абразивний черв'як, який утворює зачеплення із цівковим колесом і працює в умовах обкату. В нормальному перерізі інструмент матиме складний профіль – обвідну положень цівкового колеса, при обкаті його центроїди навколо центроїди інструментального колеса.

Синтез математичної моделі інструменту включає в себе наступні етапи:

1. Вибір конструктивних параметрів майбутнього інструменту (максимальний діаметр, ширина).
2. Синтез профілю-обвідної інструментального колеса для побудови виробної поверхні глобоїдного черв'яка.
3. Формоутворення виробної поверхні глобоїдного черв'яка, яка безпосередньо прийматиме участь в процесі обробки кінцевого профілю цівкового колеса.

Вибір конструктивних параметрів і синтез обвідної, починається з побудови зачеплення цівкового колеса з інструментальним. Розрахункова схема із позначенням основних параметрів подана на рис. 5.6.

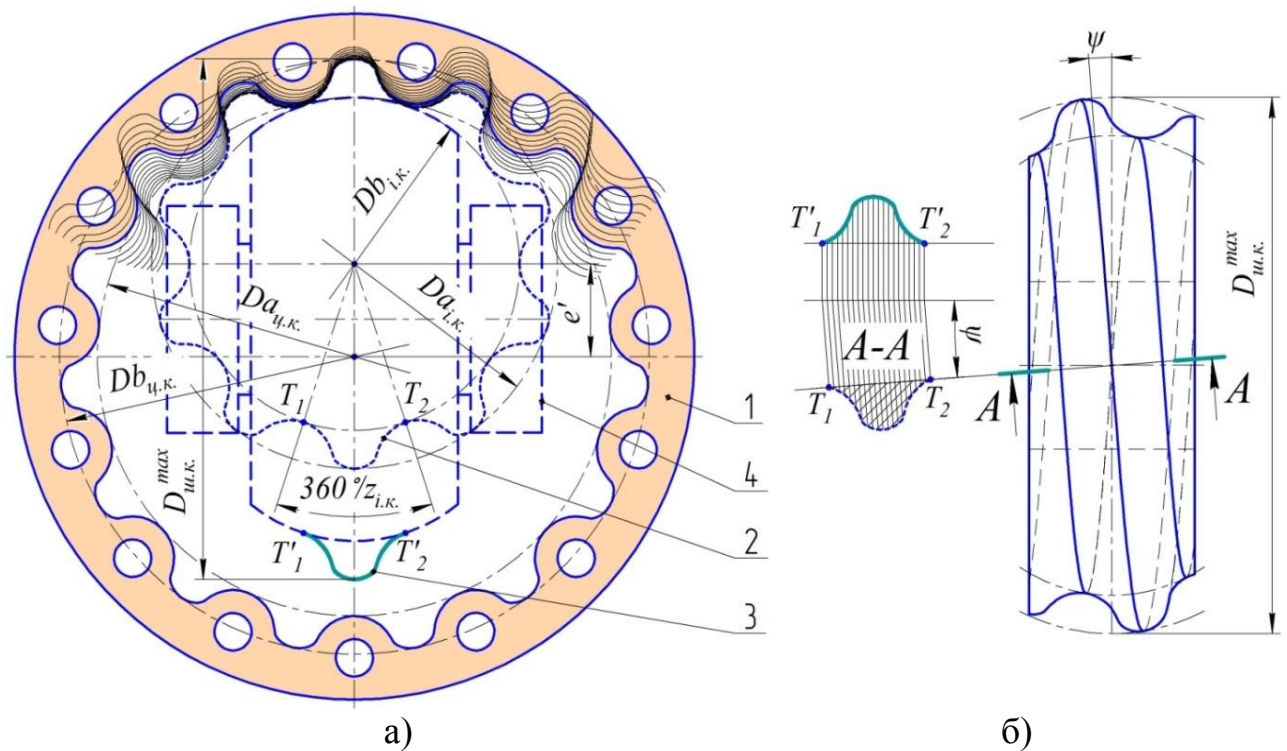


Рис. 5.6 Побудова зачеплення цівкове – інструментальне колесо (а) і синтез ділянки профілю глобоїдного круга в нормальному і осьовому перерізах (б)
 1 – цівкове колесо; 2 – ділянка профілю інструментального колеса T_1 - T_2 – профіль круга в нормальному перерізі; 3 – ділянка T'_1 - T'_2 профілю круга в осьовому перерізі; 4 – контури майбутнього інструменту і оснащення; $D_{ш.к.}^{max}$ – максимальний діаметр круга; $D_{a.c.k.}$, $D_{b.c.k.}$ – діаметри виступів і западин цівкового колеса; $D_{a.i.k.}$, $D_{b.i.k.}$ – діаметри виступів і западин інструментального колеса; e' – ексцентриситет зачеплення цівкового і інструментального коліс; ψ – кут підйому гвинтової лінії черв'яка по діаметру $D_{ш.к.}^{max}$.

Під час вибору конструктивних параметрів майбутнього інструменту, слід дотримуватись вимог, уникаючи інтерференції:

- діаметр круга $D_{ш.к.}^{max}$ необхідно обирати меншим за діаметр виступів цівкового колеса $Da_{ц.к.}$, забезпечуючи гарантовані зазори;
- контури оснащення для кріплення інструменту в поперечному перерізі, мають вміщуватись без інтерференції в межі кола $Da_{ц.к.}$.

Для визначення координат профілю інструментального колеса, користуємось відомою методикою розв'язку задачі про знаходження обвідних. Сімейство профілів цівкового колеса описуватиметься рівняннями:

$$X(\varphi; \tau) = X_{ц.к.}(\varphi) \cdot \cos\left(\tau \cdot \frac{z_2 - z_{i.к.}}{z_2}\right) - Y_{ц.к.}(\varphi) \cdot \sin\left(\tau \cdot \frac{z_2 - z_{i.к.}}{z_2}\right) - e' \cdot \cos \tau, \quad (5.10)$$

$$Y(\varphi; \tau) = Y_{ц.к.}(\varphi) \cdot \cos\left(\tau \cdot \frac{z_2 - z_{i.к.}}{z_2}\right) + X_{ц.к.}(\varphi) \cdot \sin\left(\tau \cdot \frac{z_2 - z_{i.к.}}{z_2}\right) - e' \cdot \sin \tau, \quad (5.11)$$

де $z_{i.к.}$ – число зубців інструментального колеса;

e' – ексцентриситет зачеплення цівкового і інструментального коліс;

τ – параметр сімейства профілів цівкового колеса.

Для зручності позначимо $u = \frac{z_2 - z_{i.к.}}{z_2}$.

Згідно умови (2.8), виконавши частинне диференціювання і спрощення, отримуємо рівняння зв'язку параметрів φ і τ :

$$\begin{aligned} & -e' \cdot \frac{dY_{ц.к.}}{d\varphi} \cdot \sin(\tau \cdot (u-1)) + e' \cdot \frac{dX_{ц.к.}}{d\varphi} \cdot \cos(\tau \cdot (u-1)) - \\ & - u \cdot \left(Y_{ц.к.}(\varphi) \cdot \frac{dY_{ц.к.}}{d\varphi} - X_{ц.к.}(\varphi) \cdot \frac{dX_{ц.к.}}{d\varphi} \right) = 0. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Вводячи додаткову функцію $\gamma(\varphi)$ (по аналогії з $\beta(\varphi)$), розв'язок рівняння (5.12) відносно τ буде мати вигляд:

$$\tau(\varphi) = (u-1) \cdot \left[\gamma(\varphi) + \arcsin \frac{u}{e'} \cdot \frac{-X_{ц.к.}(\varphi) \cdot \frac{dX_{ц.к.}}{d\varphi} - Y_{ц.к.}(\varphi) \cdot \frac{dY_{ц.к.}}{d\varphi}}{\sqrt{\left(\frac{dX_{ц.к.}}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dY_{ц.к.}}{d\varphi}\right)^2}} \right]. \quad (5.13)$$

Для визначення функції $\gamma(\varphi)$, розглянемо залежність $\gamma_1(\varphi)$, яка виражає кутовий коефіцієнт обвідної сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд:

$$\gamma_1(\varphi) = \operatorname{arctg} \left(\frac{dX_{у.к.}/d\varphi}{dY_{у.к.}/d\varphi} \right). \quad (5.14)$$

Графік зміни кутового коефіцієнту подано на рис. 5.7. Аналізуючи цей графік, відмічаємо порушення гладкості і розриви кривої. Встановлено, що вісь симетрії графіку $\gamma_1(\varphi)$ є лінійна функція виду:

$$f(\varphi) = \frac{-\varphi \cdot z_1}{z_2^2}. \quad (5.15)$$

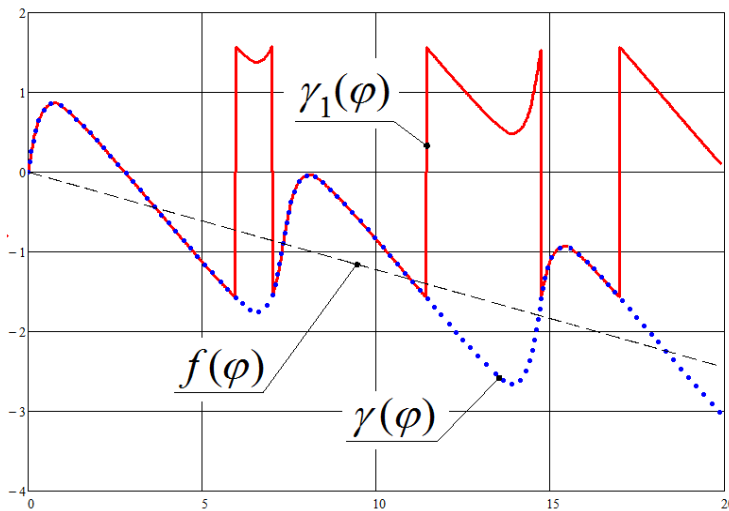


Рис. 5.7 Графіки функцій $\gamma(\varphi)$, $\gamma_1(\varphi)$, $f(\varphi)$

Застосуємо формулу (2.21) для приведення графіка $\gamma_1(\varphi)$ до вигляду $\gamma(\varphi)$:

$$\operatorname{tg} \left(\gamma_1(\varphi) - \frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2} \right) = \frac{\operatorname{tg}(\gamma_1(\varphi)) + \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2} \right)}{1 - \operatorname{tg}(\gamma_1(\varphi)) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2} \right)} = \frac{\frac{dX_{у.к.}/d\varphi}{dY_{у.к.}/d\varphi} + \frac{\sin \left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2} \right)}{\cos \left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2} \right)}}{1 - \frac{dX_{у.к.}/d\varphi}{dY_{у.к.}/d\varphi} \cdot \frac{\sin \left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2} \right)}{\cos \left(\frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2} \right)}}. \quad (5.16)$$

Здійснюючи підстановку і перетворення, отримуємо модифіковану неперервну функцію $\gamma(\varphi)$ без порушень гладкості:

$$\gamma(\varphi) = \operatorname{arctg} \frac{\left[\begin{aligned} & \sin(\mathcal{A}(\varphi)) \cdot \left(\xi(\varphi) \cdot \frac{dt}{d\varphi} - z_1 \cdot \frac{d\eta}{d\varphi} \right) - \cos(\mathcal{A}(\varphi)) \times \\ & \times \left(z_1 \cdot \frac{d\xi}{d\varphi} + \eta(\varphi) \cdot \frac{dt}{d\varphi} \right) + R_1 \cdot \frac{dt}{d\varphi} \cdot \sin \left(t(\varphi) - \frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2} \right) \end{aligned} \right]}{\left[\begin{aligned} & \sin(\mathcal{A}(\varphi)) \cdot \left(z_1 \cdot \frac{d\xi}{d\varphi} + \eta(\varphi) \cdot \frac{dt}{d\varphi} \right) - \cos(\mathcal{A}(\varphi)) \times \\ & \times \left(z_1 \cdot \frac{d\eta}{d\varphi} - \xi(\varphi) \cdot \frac{dt}{d\varphi} \right) + R_1 \cdot \frac{dt}{d\varphi} \cdot \cos \left(t(\varphi) - \frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2} \right) \end{aligned} \right]} - \frac{\varphi \cdot z_1}{z_2^2}, \quad (5.17)$$

$$\text{де } \mathcal{A}(\varphi) = \frac{\varphi \cdot z_1^2 + t(\varphi) \cdot z_2^2}{z_1 \cdot z_2^2}.$$

Координати профілю глобoidного круга в нормальному перерізі ідентичні профілю інструментального колеса і мають вигляд:

$$X_{ш.к.}^H = X_{i.к.}(\varphi) = X_{ц.к.}(\varphi) \cdot \cos(\tau(\varphi) \cdot u) - Y_{ц.к.}(\varphi) \cdot \sin(\tau(\varphi) \cdot u) - e' \cdot \cos(\tau(\varphi)), \quad (5.18)$$

$$Y_{ш.к.}^H = Y_{i.к.}(\varphi) = Y_{ц.к.}(\varphi) \cdot \cos(\tau(\varphi) \cdot u) + X_{ц.к.}(\varphi) \cdot \sin(\tau(\varphi) \cdot u) - e' \cdot \sin(\tau(\varphi)). \quad (5.19)$$

По причині складності і громіздкості обчислень, актуальною є автоматизація поданих розрахунків та створення ПО для побудови профілів-обвідних. Область визначення аргументу φ для побудови ділянки T_1-T_2 :

$$\varphi \in \left[0; 2\pi \cdot \frac{z_2}{z_1} \right]. \quad (5.20)$$

Для здійснення обробки, круг необхідно повернути відносно вісі деталі на величину кута підйому гвинтової лінії ψ , який відповідає максимальному діаметру круга $D_{ш.к.}^{max}$. Тангенс кута підйому ψ на діаметрі $D_{ш.к.}^{max}$ буде визначатись відношенням колового кроку інструментального колеса по діаметру вершин $Da_{i.к.}$ до довжини дуги кола $D_{ш.к.}^{max}$. Формула для визначення ψ матиме вигляд:

$$\psi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\pi \cdot Da_{i.к.} / z_{i.к.}}{\pi \cdot D_{ш.к.}^{max}} \right) = \operatorname{arctg} \left(\frac{Da_{i.к.}}{D_{ш.к.}^{max} \cdot z_{i.к.}} \right). \quad (5.21)$$

Координати профілю інструменту в осьовому перерізі мають враховувати кут підйому ψ , тобто $X_{ш.к.}^O = X_{ш.к.}^H \cdot \cos\psi$, $Y_{ш.к.}^O = Y_{ш.к.}^H$. Осьовий профіль є основою для формоутворення виробної поверхні інструменту. На рис. 5.8

представлено принцип побудови виробної поверхні по перерізам в SOLIDWORKS. Побудована ділянка кривої T_1-T_2 розподіляється по сферичній поверхні із заданою дискретністю (на рис. 5.8 дискретність складає 11 осьових перерізів на один оберт). В процесі формоутворення ділянка T_1-T_2 переміщується по напрямному колу діаметром $Db_{i.к.}$. За один повний оберт значення переміщення повинно відповідати коловому кроку цівкового колеса.

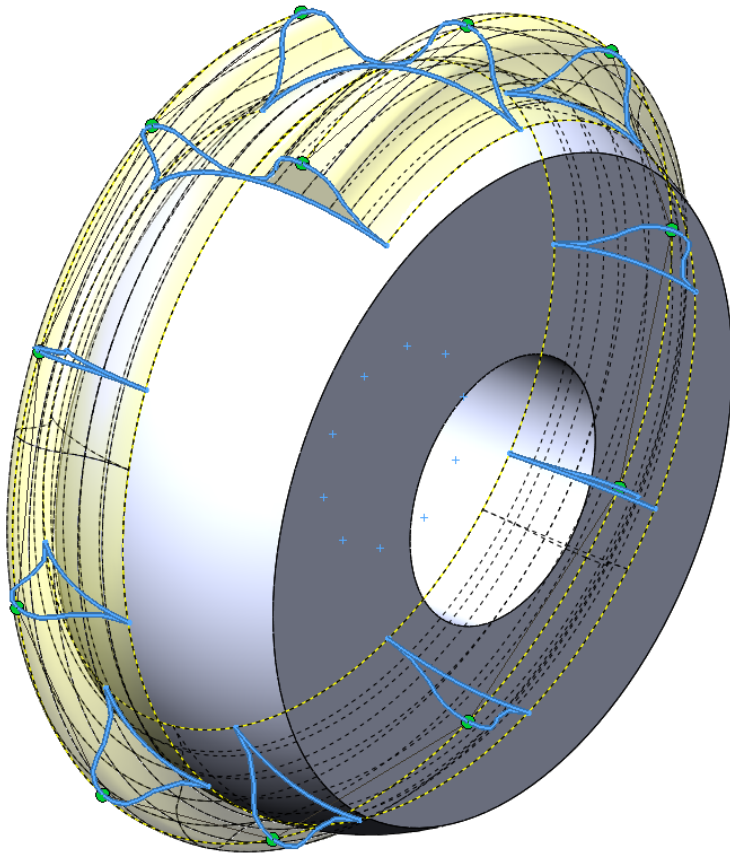


Рис. 5.8 Формоутворення виробної поверхні глобїдного шліфувального круга для високопродуктивної обробки цівкових коліс

Наведений інструмент повинен мати високу точність виготовлення і стійкість, а процедура наладки на верстаті має здійснюватись за допомогою контактних щупів. Технологія черв'ячного шліфування представленим інструментом дозволяє реалізувати обробку як прямозубих цівкових коліс, так і гвинтових, які мають місце в редукторах на основі ексцентриково-циклоїдальних зачеплень [74, 117]. Даний тип зачеплень є спільною розробкою співробітників Томського державного університету і ЗАО «Технологія Маркет» і знаходить застосування в механічних передачах транспортних засобів (залізничний, автомобільний) та редукторах різного призначення. Схема

шліфування глобоїдним кругом внутрішнього профілю цівкового колеса з прямими і гвинтовими зубцями представлена на рис. 5.9. Позиціонування інструменту в цьому випадку здійснюється з урахуванням кута підйому гвинтового зуба колеса.

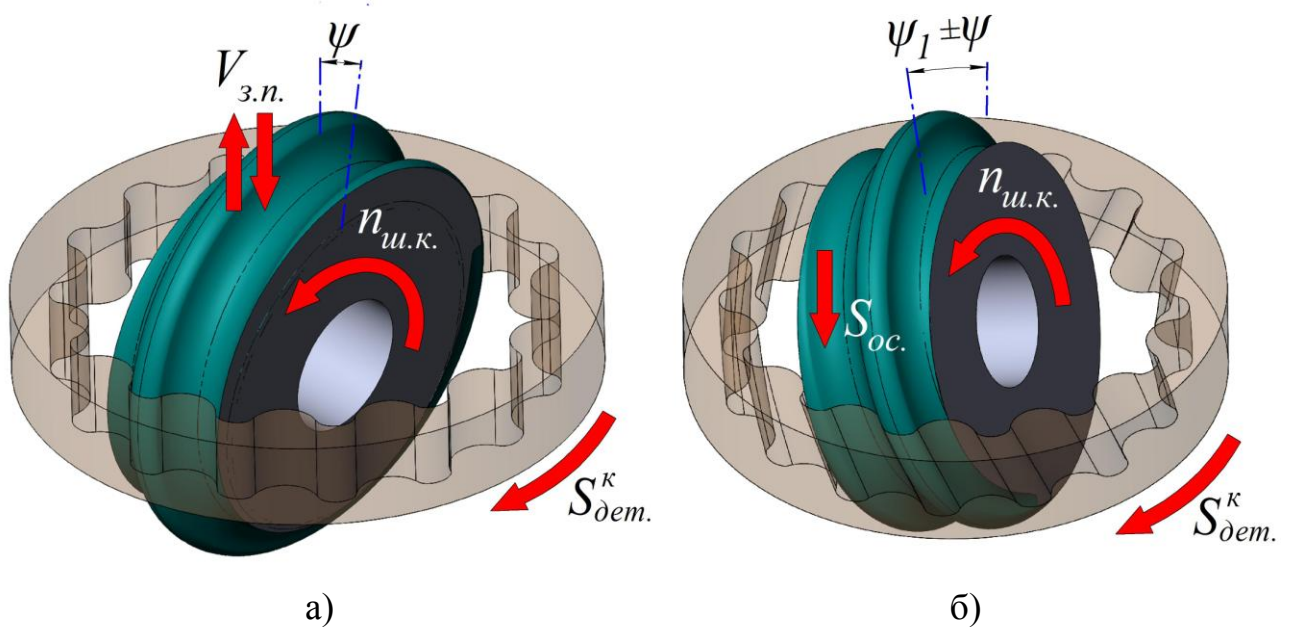


Рис. 5.9 Схеми обробки внутрішнього профілю цівкового колеса з прямими (а) і гвинтовими зубцями (б) глобоїдним черв'ячним кругом

$ЗП$ – зворотно-поступальні рухи інструменту; $n_{ш.к.}$ – частота обертання круга; $S_{ос.}$ – осьова подача інструменту (паралельно вісі колеса); $S_{дет.}^k$ – колова подача цівкового колеса; ψ_1 – кут підйому гвинтової лінії колеса; ψ – кут підйому гвинтової лінії черв'яка

Очевидними перевагами обробки представленим інструментом є висока продуктивність і відсутність планетарного руху, який замінено 2ма більш простими обертовими. В процесі задіяні як опуклі так і увігнуті ділянки профілю інструменту, що забезпечує неперервну обробку виступів і спряжених з ними профілів міжцівкових западин. Реалізація технології можлива за умови, якщо габаритні розміри порожнини колеса не перешкоджають вільному проходженню інструмента і конструктивних елементів оправки. Схеми обробки, представлені на рис. 5.9 можуть бути реалізовані на зубошліфувальному обробному центрі, компоновка якого представлена на рис. 5.2.

5.5 Висновки до розділу

1. Представлено варіант конструкції безпривідної шліфувальної оправки, адаптованої до вертикально-фрезерних обробних центрів. Застосування даного оснащення дозволяє розширити технологічні можливості обладнання і дає можливість вести обробку широкого спектру коліс із внутрішнім зачепленням (евольвентним і неевольвентним), фасонних важкодоступних поверхонь, отворів з гострими кутами (прямокутних, трикутних, квадратних і т.д.).

2. Представлена компоновка багатofункціонального зубошліфувального обробного центру, яка може слугувати основою для розробки діючої моделі. Можливості компоновки дозволяють вести обробку в умовах обкату прямих і гвинтових зубців коліс зовнішнього і внутрішнього зачеплення, з евольвентним і відмінним від нього профілем.

3. Розроблено методику синтезу контуру інструментальної рейки черв'ячних інструментів (черв'ячних фрез і абразивних кругів) для високопродуктивної технології обробки профілю сателіту в умовах обкату.

4. Розроблено оригінальну конструкцію інструменту – глобоїдного гвинтового круга для високопродуктивної фінішної обробки профілю цівкових коліс в умовах обкату, розроблена методика його розрахунку та проектування. Застосування даного інструменту дозволяє вести обробку як прямого так і гвинтового внутрішнього зубчатого вінця.

Усі наведені в даному розділі методики розрахунків, розробки та рекомендації, будуть корисними для впровадження у виробництво інновацій в області технології фінішної обробки як коліс ГП, так і зубчатих коліс в цілому.

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_c 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 УДЄЕ 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_u на коефіцієнт питомого навантаження на профіль, який визначається співвідношенням довжин дуг взаємодіючих профілів. Аналітично визначено значення r'_u і r''_u , 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 $r_u < r'_u$. Застосування УДЕЕ рекомендовано, якщо $r_u \geq r'_u$. 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 послідувачі 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абразивна обробка гіпоциклоїдального профілю конічно-циліндричним кругом в умовах планетарного обкату / О. І. Скібінський, М. М. Підгаєцький, І. І. Павленко, Д. Б. Козинець // Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2008. – Вип. 20. – С. 185-190.
2. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – Москва: Наука, 1988. – 640 с.
3. А.с. 860956 СССР, МКИ В23F 9/04. Приспособление для обработки зубчатых колес, профили которых очерчены огибающими семейства вневцентроидных эпи- и гипоциклоид и их эквидистантами / В. К. Лобастов. – №2834307/25-08; Заявл. 01.11.1979.
4. А.с. 85368 СССР, МКИ В23С 3/16. Приспособление для фрезерования зубцов сателлитов редуктора с внутренним вневцентроидным цевочным зацеплением / М. М. Гуревич, М. И. Ланда. – №398786; Заявл. 10.06.1949.
5. А.с. 88312 СССР, МКИ В23С 3/16. Приспособление к зубодолбежному станку для нарезания циклоидальных зубчатых колес вневцентроидного цевочного зацепления методом обкатки / П. П. Бондаренко. – №388416; Заявл. 22.11.1948.
6. А.с. 68422 СССР, МКИ В23F 5/12. Способ изготовления зубцов циклоидальных зацеплений сателлитов планетарных передач редукторов / В. М. Шанников. – №380 (342903); Заявл. 19.03.1946; Опубл. 31.05.1947.
7. А.с. 96189 СССР, МКИ В23F 5/12. Способ нарезания зубьев эпи- и гипоциклоидальных зацеплений / В. М. Шанников, Р. М. Минин. – №1576/446066; Заявл. 04.11.1952; Опубл. 01.01.1953.
8. А.с. 1337202 СССР, МКИ В23В 5/36. Способ обработки резанием циклоидальных поверхностей / И. Н. Федоренко, С. И. Замков, А. Н. Васильев. – №3958047/31-08; Заявл. 09.09.1985; Опубл. 15.09.1987; бюл. №34.

9. А.с. 880589 СССР, МКИ В21Н 5/02. Червячный обкатник / С. П. Радзевич. – №2836115/25-27; Заявл. 06.11.1979; Опубл. 15.11.1981; бюл. №42.
10. Балденко Д. Ф. Винтовые забойные двигатели. Справочное пособие. / Д. Ф. Балденко, Ф. Д. Балденко, А. Н. Гноевых. – М.: Недра, 1999. – 375 с.
11. Берман Г. Н. Циклоида / Г. Н. Берман. – М.: Наука, 1980. – 112 с.
12. Бермант А. Ф. Тригонометрия. Изд. 3-е, стер. / А. Ф. Бермант, Л. А. Люстерник. – М: Физматгиз, 1960. – 177 с.
13. Боровский Г. В. Профильное шлифование / Г. В. Боровский, В. Л. Белостоцкий. – Ленинград: Машиностроение, 1987. – 160 с.
14. 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.
15. Выгодский М. Я. Аналитическая геометрия / М. Я. Выгодский. – М.: Наука, 1975. – 370 с.
16. Выгодский М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М.: Наука, 1975. – 872 с.
17. Гершиков І. В. Підвищення ефективності обробки зубчастих коліс на операції зубошліфування // І. В. Гершиков, Ф. В. Новіков, В. В. Нежебовський // Физические и компьютерные технологии: труды 19-й междунар. науч.-практ. конф. – Х.: ГП ХМЗ «ФЭД», 2014. – С. 10-16.
18. Гидропривод. Основы и компоненты: Учебный курс по гидравлике. Том 1. – Издание №2 (на русском языке). – Издатель: Бош Рексрот АГ Сервис. Автоматизация. Дидактика. – 2003. – 323 с.
19. Гнатюк А. О. Експериментальні дослідження показників точності при шліфуванні профілю цівкового колеса героторної пари в умовах планетарного обкату / А. О. Гнатюк // Вісник НТУ «ХП»: Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХП», 2017. – № 17 (1239). – С. 18-25.

20. 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. 12-19.

21. Грабченко А. И. 3D процессы алмазно-абразивной обработки: монография / А. И. Грабченко, В. А. Федорович. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2008. – 345 с.

22. Грановский Г. И. Резание металлов. / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высшая школа, 1985. – 304 с.

23. Грицай І. Є. Синусоїдальні зубчасті передачі як альтернатива традиційним передачам та новий метод їх виготовлення / І. Є. Грицай, Я. М. Литвиняк. // *Вісник НТУ «ХПИ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу»*.– Харків: НТУ «ХПИ», 2009.–№19.–С. 43–53.

24. Грицай І. Є. Сучасне обладнання з ЧПК та інструменти для високошвидкісного чистового оброблення зубчастих коліс / І. Є. Грицай // *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник / Національний університет «Львівська політехніка»; відповідальний редактор З. А. Стоцько. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008.– Випуск 42. – С. 152–156.*

25. Гусев В. В. Анализ механизма взаимодействия шлифовального круга и заготовки для различных схем шлифования / В. В. Гусев // *Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. трудов. – Краматорск: Изд-во ДГМА, 2008. – Вып. 23. – С. 54–61.*

26. До питання 3D-моделювання шорсткого шару поверхні після шліфування кругами із НТМ [Текст] / В. І. Лавріненко, О. О. Пасічний, Г. А. Петасюк, В. В. Смоквина // *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. — 2010. — № 4. — С. 77-85.*

27. Забойные винтовые двигатели для бурения скважин / М. Т. Гусман, Д. Ф. Балденко, А. М. Кочнев, А. М. Никомаров. – М.: Недра, 1981. – 232 с.

28. Задание, математическое описание и методика исследования поверхностей зубчатых венцов исходных формообразующих зубчатых звеньев / А. В.Кривошея, Ю. М. Данильченко, С. И. Пастернак, В. Е. Мельник. // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.-техн. сборник НТУ «ХПИ». – 2008. – №75. – С. 177–195.

29. Залгаллер В. А. Теория огибающих / В. А. Залгаллер. – М.: Наука, 1975. – 106 с.

30. Калафатова Л. П. Исследование точности формообразования изделий из ситаллов при шлифовании // Л. П. Калафатова, Д. В. Поколенко, Л. Н. Феник // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДНТУ, 2007. – С. 96–108.

31. Калашников А. С. Влияние операции зубошлифования на эксплуатационные параметры цилиндрических зубчатых передач / А. С. Калашников, П. А. Калашников // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – №6. – С. 20–23.

32. Кальченко В. В. Тривимірне моделювання зняття припуску і формоутворення при шліфуванні торців зі схрещеними осями кругів та деталей / В. В. Кальченко. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні: Науковий журнал. Запорізький НТУ. – 2001. – С. 96–100.

33. Кальченко В. В. 3D моделирование профилирования круга, съема припуска и формообразования при шлифовании наружных торовых поверхностей со скрещивающимися осями инструмента и детали / В. В. Кальченко. // Збірник наукових праць НТУ «ХПИ». Тематичний випуск «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПИ», 2017. – №9, т.11 – С. 3 – 10.

34. Кащук В. А. Справочник шлифовщика / В. А. Кащук, А. Б. Верещагин. – Москва: Машиностроение, 1988. – 480 с.

35. Кирютин А. С. Профилирование специального зуборезного инструмента методом трехмерного моделирования / А. С. Кирютин. // Известия

Тулского государственного университета. Технические науки. – Тула: ТГУ, 2016. – №8. – С. 47–51.

36. Кожевников С. Н. Механизмы. Справочное пособие / С. Н. Кожевников, Я. И. Есипенко, Я. М. Раскин. – Москва: Машиностроение, 1976. – 784 с.

37. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – Москва: «Машиностроение», 1974. – 280 с.

38. Красовский Г. И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. Ф. Филаретов. – Минск: БГУ, 1982. – 302 с.

39. Кремень З. И. Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин. – Санкт-Петербург: Политехника, 2015. – 424 с.

40. Кривий П. Д. Геометричні та математичні моделі формування шорсткості циліндричних поверхонь при точінні та розточуванні / П. Д. Кривий, В. В. Крупа. // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – №2 (53). – С. 44–55.

41. Косилова А. Г. Справочник технолога-машиностроителя. В двух томах. / А. Г. Косилова, Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 656 с.

42. Лашнев С. И. Формообразование зубчатых деталей реечными и червячными инструментами / С. И. Лашнев. – Москва: Машиностроение, 1971. – 216 с.

43. Леонов, С. Л. Методологические основы прогнозирования геометрических параметров качества поверхности детали [Текст] / Леонов С.Л., Гончаров В.Д. // Вісник НТУ «ХП»: Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Сучасні технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХП», 2010. – № 4. – С. 247-256.

44. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. Издание 2 / Ф. Л. Литвин. – Москва: «Наука», 1968. – 584 с.

45. Маркушевич А. И. Замечательные кривые / А. И. Маркушевич. – М: Гос. издательство технико-теоретической литературы, 1952. – 34 с.
46. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
47. Матюха П. Г. Длина дуги контакта единичного зерна с заготовкой при плоском шлифовании с осевыми колебаниями круга / П. Г. Матюха, В. В. Габитов, В. В. Полтавец // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДНТУ, 2007. – С. 21–30.
48. Мацкевич А. В. Повышение эффективности червячного зубофрезерования роторов промышленных перфораторов: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / Мацкевич А. В. – Тула, 2012. – 16 с.
49. Металлорежущие станки. Под редакцией Тепинкичиева В. К. / [Н. С. Колев, Л. В. Красниченко, Н. С. Никулин и др.]. – М: Машиностроение, 1973. – 472 с.
50. Минингс Р. Л. Справочник инженера-механика / Р. Л. Минингс. – Москва: Техносфера, 2008. – 632 с.
51. Моделирование динамики формообразования криволинейного профиля при шлифовании / В. Н. Ананченко, А. И. Ананченко, И. К. Цыбрий, В. В. Головкин // Вестник ДГТУ. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2007.– Т. 7. – №1. – С. 54–69.
52. Нежебовський В. В. Технологічне забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів на операціях зубошліфування: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «технологія машинобудування» / Нежебовський В. В. – Одеса, 2011. – 23 с.
53. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – Москва: Наука, 1971. – 207 с.

54. Николаенко А. А. Методика расчета сил резания при шлифовании / А. А. Николаенко // Прогрессивные технологии в машиностроении. Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – С. 174–178.

55. Носенко В. А. Площадь и толщина сечения срезаемого слоя на операции плоского глубинного шлифования / В. А. Носенко, В. К. Жуков, А. В. Авилов // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – №1. – С. 22–27.

56. Носенко В. А. Шлифование стали ШХ15 кругами различной структуры / В. А. Носенко, А. Н. Довгаль, Д. В. Цибермановский, Р. А. Белухин // Известия ВолгГТУ. – 2008. – Т. 9. – №4. – С. 26–29.

57. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищих навч. закладів] / [М. П. Мазур, В. Л. Внуков, В. О. Доброскок та ін.]. – Львів: Новий Світ-2000, 2010. – 422 с.

58. Овумян Г. Г. Справочник зубореза / Г. Г. Овумян, Я. И. Адам. – Москва: Машиностроение, 1983. – 223 с.

59. Пат. 4346534 США, МПК В24В 33/02; В24В 5/16. Apparatus for honing cycloidal surfaces / Albin S. Czubak, Holland Mich; заявник і патентотримач Excell-O Corporation. Заявка № 159,020; Заявл. 13.06.1980; Опубл. 31.08.1982.

60. Пат. 3817000 США, МПК В24d 17/00. Apparatus for producing the ring member of a gerotor gear set / Holm S.; заявник і патентотримувач Danfoss A/S. Заявка № 264,032; Заявл. 19.06.1972; Опубл. 18.06.1974.

61. Пат. 2209201 США, МПК F01С 1/08, F16Н 1/32, F01С 1/10. Change speed gear / M. F. Hill.; заявник і патентотримувач M. F. Hill. Заявка № 161,513; Заявл. 28.08.1937; Опубл. 23.07.1940.

62. Пат. 1682564 США, МПК F04С 18/10. Compressor / M. F. Hill.; заявник і патентотримувач M. F. Hill. Заявка № 619,292; Заявл. 15.02.1923; Опубл. 28.08.1928.

63. Пат. 2547392 США, МПК F01С 1/00, F01С 1/10. Continuous contact internal rotor for engines / A. F. Hill, M. F. Hill.; заявник і патентотримувач A. F. Hill, M. F. Hill. Заявка № 659,098; Заявл. 02.04.1946; Опубл. 03.04.1951.

64. Пат. 2091317 США, МПК F16H 55/08. Gear tooth curve / M. F. Hill.; заявник і патентоотримувач М. Ф. Hill. Заявка № 748,244; Заявл. 13.10.1934; Опубл. 31.08.1937.

65. Пат. 3774346 США, МПК В24В 33/02, В24В 19/09. Honing apparatus / Hoglund N.; заявник і патентоотримувач Tri Ordinate Corp. Заявка № 220,772; Заявл. 26.01.1972; Опубл. 27.11.1973.

66. Пат. 7431635 США, МПК В24В 1/00. Internal gear grinding method / Xingen Dong, Barun Acharya.; заявник і патентоотримувач Parker-Hannifin Corp. Заявка № 11/412,760; Заявл. 27.04.2006; Опубл. 07.10.2008.

67. Пат. 20130072096 США, МПК В23F 23/00, В23F 21/02. Internal gear grinding machine / Christian Hoerner.; заявник і патентоотримувач Liebherr-Verzahntechnik Gmbh. Заявка № 13/615,282; Заявл. 13.08.2012; Опубл. 21.03.2013.

68. Пат. 6425807, США, МПК В24В 41/06, В24В 19/08, В24В 19/02. Method and apparatus for grinding rotors for hydraulic motors and apparatus therefor / Hollis Newcomb White.; заявник і патентоотримувач White Hydraulics. Заявка № 09/301,798; Заявл. 29.04.1999; Опубл. 30.07.2002.

69. Пат. 4058938 США, МПК В23F 15/08, В23F 23/12, В23F 21/02, F01С 1/10, В23F 5/02. Method and apparatus for grinding the tooth flanks of internally-toothed gear wheels / Hermann Harle, Siegfried Eisenmann.; заявник і патентоотримувач Furstlich Hohenzollernsche Huttenverwaltung Laucherthal. Заявка № 392,501; Заявл. 29.08.1973; Опубл. 22.11.1977.

70. Пат. 8527085 США, МПК G06F 19/00. Method for operating a gear grinding machine / Thomas Breith, Manfred Zankl.; заявник і патентоотримувач Liebherr Verzahntechnik Gmbh. Заявка № 12/378,912; Заявл. 20.02.2009; Опубл. 03.08.2013.

71. Пат. 1648730 США, МПК F04С 18/10, F04С 18/08. Rotary pumping machine / E. Hill.; заявник і патентоотримувач Hill Compressor & Pump Company. Заявка № 155,670; Заявл. 18.12.1926; Опубл. 08.11.1927.

72. Пат. 2151483 США, МПК В23Q 27/00, В23F 15/08, В23F 15/01. Rotor generating method and machine / Arthur A. Nichols, Waltham Mass.; заявник і патентотримувач Arthur A. Nichols. Заявка № 25,081; Заявл. 05.06.1935; Опубл. 21.03.1939.

73. Пат. 2031888 США, МПК В23F 15/00, В23F 15/08, F01C 1/08, F01C 1/00. Tooth curve for rotors and gears / M. F. Hill.; заявник і патентотримувач Hill Engineering Company. Заявка № 301,880; Заявл. 27.01.1931; Опубл. 25.02.1936.

74. Пат. 015293 Евразийское патентное ведомство, МПК F16H 55/08, F16H 1/32. Зубчатое зацепление колес (варианты) и планетарный зубчатый механизм на его основе (варианты). / Становский В. В., Казакиявичус С. М., Ремнева Т. А., Кузнецов В. М.; заявитель и патентовладелец ЗАО «Технология-маркет». Заявка № 200901568; заявл. 09.06.2008; опубл. 30.06.2011.

75. 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.

76. Пат. 46410 Україна, МПК В23F 9/00. Інструмент для обробки зубчастих коліс, профілі яких окреслені огиначаючими сімейства еквідистант позацентроїдних епіциклоїд. / Скібінський О. І., Підгаєцький М.М.; заявник і патентотримач Кіровоградський державний технічний університет. Заявка № 2001074835; заявл. 10.07.2001; опубл. 16.08.2004. Бюл. № 8.

77. Пат. 46348А Україна, МПК В23F 5/00. Поворотний стіл зі змінним ексцентриситетом. / Мажара В. А., Підгаєцький М.М., Скібінський О. І.; заявник і патентотримач Кіровоградський державний технічний університет. Заявка № 2001064472; заявл. 26.06.2001; опубл. 15.05.2002. Бюл. № 5.

78. 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.

79. Петраков Ю. В. Моделирование отклонения формы поверхностей при круглом шлифовании / Ю. В. Петраков. // Збірник наукових праць «Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві». Технології матеріали, транспорт і логістика. – 2013. – №1(2). – С. 63–71.

80. Петраков Ю. В. Моделювання утворення хвилястості і ограновування поверхні при плоскому шліфуванні / Ю. В. Петраков, Н. А. Кравець // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк: 2011. – Вип. 31. – С. 245-251.

81. Петраков, Ю. В. Загальні принципи управління шліфуванням [Текст] / Ю. В. Петраков // Вісник НТУУ «КПІ», Машинобудування. – Київ: НТУУ «КПІ», 2005. – № 46. – С. 55–60.

82. Підгаєцький М. Аналіз методів формоутворення поверхонь деталей позацентроїдного циклоїдального внутрішнього зачеплення / М. Підгаєцький, О. Скібінський. // Збірник наукових праць КДТУ. Галузеве машинобудування. – Кіровоград: КДТУ, 2000. – №6. – С. 31–33.

83. Підгаєцький М. М. Аналіз процесу формоутворення робочого профілю цівкового колеса позацентроїдної епіциклоїдальної передачі інструментом з опукло-увігнутою формою різальної кромки / М. М. Підгаєцький, О. І. Скібінський. // Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – №16. – С. 1–7.

84. Підгаєцький М. М. Дослідження кривих, які визначають профіль інструмента для обробки цівкового колеса позацентроїдної епіциклоїдальної цівкової передачі / М. М. Підгаєцький, О. І. Скібінський. // Збірник наукових праць КДТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград: КДТУ, 2003. – Вип. 13. – С. 294-300.

85. Підгаєцький, М. М. Синтез внутрішньої цевочної передачі / М. М. Підгаєцький, О. І. Скібінський // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. – Кіровоград : КДТУ, 1999. – Вип. 27. – С. 3-6.

86. Підгаєцький М. М. Удосконалення рівнянь кінематичного ланцюга планетарного стола / М. М. Підгаєцький, О. І. Скібінський., О. О. Котляр. // Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград, КНТУ 2011. – №24. – ч. 2 – С. 1–7.

87. Планетарные передачи. Справочник / [В. Н. Кудрявцев, Ю. Н. Кирдяшев, Е. Г. Гинзбург и др.]. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 536 с.

88. Производство зубчатых колес: Справочник / [С. Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган и др.]. – М: Машиностроение, 1990. – 464 с.

89. Радзевич С. П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. Монография / С. П. Радзевич. – Киев: «Растан», 2001. – 590 с.

90. Родин П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием / П. Р. Родин. – Киев: «Виша школа», 1977. – 192 с.

91. Романов В. Ф. Расчеты зуборезных инструментов / В. Ф. Романов. – Москва: Машиностроение, 1969. – 251 с.

92. Рязанцев В. М. Теоретические основы проектирования роторно-вращательных насосов с циклоидальными зацеплениями: автореф. дис. на соискание уч. степени докт. техн. наук: спец. 05.02.02 «машиноведение, системы приводов и деталей машин» / Рязанцев В. М. – Тула, 2009. – 40 с.

93. Савелов А. А. Плоские кривые / А. А. Савелов. – М.: Физматгиз, 1960. – 293 с.

94. Сіра Н. М. Підвищення ефективності шліфування циліндричних, ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання зі схрещеними осями круга та деталі: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Сіра Н. М. – Чернігів, 2017. – 176 с.

95. 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.

96. 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.

97. Скібінський, О. І. Визначення умов існування спряженої огиноючої 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.

98. 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.

99. 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.

100. 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.

101. Скібінський О. І. Результати експериментальних досліджень формоутворення робочого профілю цівкового колеса позацентроїдної епіциклоїдальної передачі однозубим інструментом випуклої форми /

О. І. Скібінський. // Збірник наукових праць КДТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград, КДТУ, 2004. – №14. – С. 84–88.

102. Скібінський О. І. Спосіб обробки робочих профілів деталей позацентроїдних епіциклоїдальних передач внутрішнього зачеплення / О. І. Скібінський. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – №2. – С. 71–74.

103. Скібінський О. І. Спосіб шліфування робочого профілю цівкового колеса епіциклоїдальної передачі в умовах обкату / О. І. Скібінський, М. М. Підгаєцький, А. І. Четвертак. // Збірник наукових праць КНТУ. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград: КНТУ, 2006. – №36. – С. 191–194.

104. Скібінський О. І. Удосконалення процесу формоутворення робочих поверхонь цівкових коліс позацентроїдних епіциклоїдальних передач внутрішнього зачеплення: дис. канд. техн. наук: 05.03.01 / Скібінський О. І. – Кіровоград, 2004. – 198 с.

105. Смирнов-Аляев Г. А. Механические основы пластической обработки металов / Г. А. Смирнов-Аляев– М.: Машиностроение, 1968. – 271 с.

106. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 184 с.

107. Степанов М. С. Математическое моделирование силы резания при шлифовании в различных условиях / М. С. Степанов, С. М. Шевченко // Вісник НТУ «ХП»: Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Математичне моделювання в техніці і технологіях». – Харків: НТУ «ХП», 2012. – № 2.– С. 212-218.

108. Финишная обработка цилиндрических зубчатых колес алмазными эластичными червячными хонами [Электронный ресурс] / [А. В. Кривошея, В. Е. Мельник, В. В. Возный та ін.] // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления

и применения. – 2016. – Вып. 19 – С. 137–156. Режим доступа до ресурсу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pimi_2016_19_70

109. Фролова К. В. Механика промышленных роботов. Кн. 3: Основы конструирования / К. В. Фролова, Е. И. Воробьева. – М.: Высшая школа, 1989. – 380 с.

110. Цвис Ю. В. Профилирование режущего обкатного инструмента / Ю. В. Цвис. – Москва: Машгиз, 1961. – 155 с.

111. Цепков А. В. Профилирование инструментов для изготовления внецентроидного циклоидального зацепления / А. В. Цепков, А. М. Кочнев. // Станки и инструмент. – 1972. – №2. – С. 35–37.

112. Шавва М. А. Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании [Электронный ресурс] / М. А. Шавва, С. В. Грубый // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – № 11. – С. 137–156. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: http://technomag.bmstu.ru/en/file/746736.html?__s=1.

113. Шанников В. М. Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением / В. М. Шанников. – Л.: Машгиз, 1948. – 172 с.

114. Шахбазов Я. О. Обробка деталей шліфуванням за параметром шорсткості обробленої поверхні / Я. О. Шахбазов, В. С. Ничкало // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник / Державний університет «Львівська політехніка». – Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2000. – Випуск 35. – С. 55–58. – Бібліографія: 4 назви.

115. Шевцов Е. Н. К определению геометрических параметров зацепления планетарно-роторного гидромотора [Текст] / Е. Н. Шевцов, Р. А. Барбарук // Аграрний вісник Причорномор'я: Збірник наукових праць. – Одеса, 2008. – Вип.45: Технічні науки. – С.111-118.

116. Щербаков Н. Р. Геометрическое моделирование поверхности детали передаточного механизма как огибающей / Н. Р. Щербаков, Н. В. Захаркин. //

Вестник Томского государственного университета. Рубрика «Математика и механика». – Томск: ТГУ, 2012. – №4(20). – С. 50–55.

117. Шербаков Н. Р. Математическое и компьютерное моделирование динамического состояния систем передачи движения: автореф. дис. на соискание уч. степени докт. физ.-мат. наук: спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / Шербаков Н. Р. – Томск, 2009. – 30 с.

118. Широков А. В. Экспериментальное исследование образования единичных рисок-царапин при абразивной обработке / А.В. Широков, Р.М. Мансуров // Труды 3-ей Всеросс. конф. молодых учёных и специалистов. «Будущее машиностроения России 2010» – Москва 23–25 сентября 2010 г. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – Т. 2.

119. Шнейдер В. Е. Краткий курс высшей математики. Учеб. пособие для ВТУЗов. / В. Е. Шнейдер, А. И. Слущкий, А. С. Шумов. – М.: «Высшая школа», 1972. – 640 с.

120. Якимов О. О. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару зуб'їв високоточних зубчастих коліс при шліфуванні: дис. докт. техн. наук: 05.02.08 / Якимов О. О. – Технологія машинобудування, 2014. – 472 с.

121. Янке Е. Специальные функции / Е. Янке, Ф. Едме, Ф. Леш – Москва: Наука, 1964. – 344 с.

122. Comparative analysis of analytical and numerical calculations of contact stresses at rotational elements of gerotor pumps / Lozica Ivanović, Boris Rakić, Blaža Stojanović, Miloš Matejić. // Applied Engineering Letters. – 2016. – Vol. 1, №1. – P. 1–7.

123. Gear technology. Grinding the art of versatility [Электронный ресурс] // Journal of gear manufacturing. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.geartechnology.com/issues/1013x/gt1013.pdf>.

124. Industrial challenges in grinding [Электронный ресурс] / J.Oliveira, E. Silva, C. Guo, F. Hashimoto // CIRP Annals - Manufacturing Technology. –

2009.– Режим доступа до ресурсу: <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ernesto/F2013/FWLM/OtherSuppMtls/Papers/Other/Oliveira2009-GrindingChallenges.PDF>.

125. Investigations of the cutting forces in creep-feed surface grinding process / [M. Gostimirovic, D. Rodic, P. Kovac P and others.]. // Journal of Production Engineerin. – 2015. – Vol. 18, No.2. – P. 21–24.

126. Nizankowski C. The influence of the structure of the abrasive materials made of sintered corundum on the grindability of the grinding wheels with ceramic glass-crystalline binders / Czeslaw Nizankowski // Komisja Budowy Maszyn Pan. Oddzial w Poznaniu. Archiwum technologii maszyn i automatyzacji. – Poznań, 2013.– Vol. 31. – nr 4 – P. 39–48.

127. Noncircular gear. Design and generation / F.Litvin, A. Fuentes-Aznar, I. Gonzalez-Perez, K. Hayasaka. – Cambridge university press, 2009. – p. 204.

128. Patel J. Design, development and experimental investigation of epitrochoid internal lobe pump / Jayesh Patel. // International Journal of Technical Innovation In Morden Engineering & Science. – 2015. – Vol. 1, Issue 2. – P. 72–78.

129. Prakash H. Design and analysis of gerotors of main gear box lubricating oil pump / H. Prakash, S. Manjula. // International Journal of Engineering and Technical Research. – 2014. – Vol. 2, Issue 5. – P. 79–81.

130. Radzevich S. P. Gear cutting tools. Fundamentals of design and computation / Radzevich. – Printed in the United States of America: Taylor & Francis Group, 2010. – p. 788.

131. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / [А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др.]. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.

132. Yii-Wen Hwang. Determination of surface singularities of a cycloidal gear drive with inner meshing [Электронный ресурс] / Yii-Wen Hwang, Chiu-Fan Hsieh // Mathematical and Computer Modelling. – 2006. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717706002123>.

ДОДАТОК А

Патент України на винахід № 110823





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **110823** (13) **C2**
(51) МПК**B24B 5/36** (2006.01)**B21K 1/30** (2006.01)**B23P 15/14** (2006.01)**B24B 19/08** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(21) Номер заявки:	а 2013 13050	(73) Власник(и):	КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25030 (UA)
(22) Дата подання заявки:	11.11.2013	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:	US 7431635 B2, 07.10.2008 US 4058938 A, 22.12.1977 US 1817405 A, 04.08.1931 US 3782040 A, 01.01.1974 US 1798059 A, 24.03.1931 US 4052928 A, 11.10.1977 US 3774346 A, 27.11.1973 RU 2189895 C2, 27.09.2002 SU 971628 A, 07.11.1982 SU 585050 A, 22.12.1977
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід:	25.02.2016		
(41) Публікація відомостей про заявку:	12.05.2015, Бюл.№ 9		
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	25.02.2016, Бюл.№ 4		
(72) Винахідник(и):	Скібінський Олександр Іванович (UA), Гнатюк Андрій Олександрович (UA), Підгасцький Михайло Матвійович (UA)		

(54) СПОСІБ ШЛІФУВАННЯ ВНУТРІШНЬОГО ПРОФІЛЮ ЗОВНІШНЬОГО КОЛЕСА ГЕРОТОРНОЇ ПЕРЕДАЧІ В УМОВАХ ПЛАНЕТАРНОГО ОБКАТУ**(57) Реферат:**

Винахід належить до галузі машинобудування і може бути використаний у виробництві коліс героторних передач з внутрішнім зачепленням, а саме абразивній обробці внутрішнього профілю зовнішнього колеса, окресленого огиноючою сімейства еквідистант вкорочених епіциклоїд або цівками постійного радіуса. Спосіб шліфування внутрішнього профілю зовнішнього колеса героторної передачі в умовах планетарного обкату, який складається з позиціонування колеса на поворотному столі, надання складних рухів із заданою між ними швидкістю на поворотному столі, обертання шліфувального круга і його осьовий та радіальний рух подачі, при цьому шліфувальний круг входить всередину оброблюваного колеса для утворення профілю зуба, збереження радіуса профілю шліфувального круга, адекватно радіусу зубця внутрішнього колеса, а також збереження однієї лінії контакту між шліфувальним кругом та внутрішньою периферійною поверхнею оброблюваного колеса, при цьому здійснюючи одночасно кутові та орбітальні рухи в однаковому кутовому напрямку. Процес обробки розділяється на чорнове та чистове шліфування, причому для чорнового шліфування застосовується шліфувальний круг, профіль якого відповідає випуклій частині еквідистанти вкороченої епіциклоїди, а увігнута частина профілю за межами точок контакту інструмента з оброблюваним колесом виконана у вигляді прямих ліній, що співпадають з напрямком дотичних в цих точках. В той же час профіль інструмента для чистового шліфування являє собою увігнуту ділянку еквідистанти до вкороченої епіциклоїди, а випуклі ділянки за межами точок контакту, замінюються прямими лініями, паралельними осі абсцис. Винахід дозволяє підвищити точність і шорсткість коліс героторних передач внутрішнього зачеплення, профілі яких окреслені огиноючими сімейств еквідистант вкорочених епіциклоїд або цівками постійного радіуса.

UA 110823 C2

UA 110823 C2

Винахід належить до галузі машинобудування і може бути використаний у виробництві коліс героторних передач з внутрішнім зачепленням, а саме абразивній обробці внутрішнього профілю зовнішнього колеса, окресленого огинаючою сімейства еквідистант вкорочених епіциклоїд або цівками постійного радіуса.

5 Прототипом є спосіб шліфування внутрішнього зачеплення [US7431635]. Спосіб послідовного утворення на внутрішній периферійній поверхні колеса, зубців циклоїдального профілю, який складається з позиціонування колеса на поворотному столі, надання складних рухів із заданою між ними швидкістю на поворотному столі, обертання шліфувального круга і його осьовий та радіальний рух подачі, при цьому шліфувальний круг входить всередину оброблюваного колеса для утворення профілю зуба, збереження радіуса профілю шліфувального круга, адекватно радіусу зубця внутрішнього колеса, а також збереження однієї лінії контакту між шліфувальним кругом та внутрішньою периферійною поверхнею оброблюваного колеса, при цьому здійснюючи одночасно кутові та орбітальні рухи в однаковому кутовому напрямку.

15 Головним недоліком способу є нерівномірний розподіл шорсткості виступів та западин оброблюваного профілю, що пояснюється більш щільним контактом інструмента з деталлю при обробці западини і малоконтактністю при обробці виступу.

В основу винаходу поставлена задача підвищення точності і шорсткості коліс героторних передач внутрішнього зачеплення, профілі яких окреслені огинаючими сімейств еквідистант вкорочених епіциклоїд або цівками постійного радіуса.

20 Поставлена задача вирішується тим, що процес обробки розділяється на чорнове та чистове шліфування, причому для чорнового шліфування застосовується шліфувальний круг, профіль якого відповідає випуклій частині еквідистанти вкороченої епіциклоїди, а увігнута частина профілю за межами точок контакту інструмента з оброблюваним колесом виконана у вигляді прямих ліній, що співпадають з напрямком дотичних в цих точках, в той же час профіль інструмента для чистового шліфування являє собою увігнуту ділянку еквідистанти до вкороченої епіциклоїди, а випуклі ділянки за межами точок контакту, замінюються прямими лініями, паралельними осі абсцис.

30 Суть винаходу пояснюють креслення, де на фіг. 1 показано профілювання інструмента для чорнового шліфування, на фіг. 2 - профілювання інструмента для чистового шліфування, на фіг. 3 - формоутворення інструментом з випуклим профілем, на фіг. 4 - формоутворення інструментом з увігнутим профілем, фіг. 5 - конструктивна реалізація способу шліфування.

35 На фіг. 1 зображено профілювання робочої частини шліфувального круга в зачепленні інструмент - оброблюване колесо 1, де профіль інструмента 2 окреслений еквідистантою 3 до вихідної вкороченої епіциклоїди 4. Параметричні рівняння еквідистанти вкороченої епіциклоїди, що описує профіль інструмента мають вигляд:

$$X(\varphi) = R_{\text{цц}} \cos(\varphi/z) + e \cdot \cos \varphi - \frac{R_{\text{ц}} \cdot (R_{\text{цц}} \cdot \cos(\varphi/z) + e \cdot z \cdot \cos \varphi)}{\sqrt{(e \cdot z)^2 + R_{\text{цц}}^2 + 2 \cdot e \cdot z \cdot R_{\text{цц}} \cdot \cos(\varphi \cdot (z-1)/z)}},$$

$$40 \quad Y(\varphi) = R_{\text{цц}} \sin(\varphi/z) + e \cdot \sin \varphi - \frac{R_{\text{ц}} \cdot (R_{\text{цц}} \cdot \sin(\varphi/z) + e \cdot z \cdot \sin \varphi)}{\sqrt{(e \cdot z)^2 + R_{\text{цц}}^2 + 2 \cdot e \cdot z \cdot R_{\text{цц}} \cdot \cos(\varphi \cdot (z-1)/z)}},$$

де z - число зубців оброблюваного цівкового колеса; e - ексцентриситет передачі; $R_{\text{цц}}$ - радіус центрів зубців оброблюваного колеса; $R_{\text{ц}}$ - радіус зубця (цівки) оброблюваного колеса (задається кінцеве значення, що відповідає готовій деталі); φ - кутовий параметр для побудови кривої.

45 Оброблюване колесо з інструментом контактує в двох точках K_1 і K_2 . Ділянка профілю круга між двома точками контакту є достатньою для формоутворення профілю цівкового колеса в процесі обкату. Координати точок дотику можуть бути знайдені з параметричних рівнянь. Для точки дотику $K_1 \varphi = -180^\circ$ або $-\pi$ в радіанах, відповідно для $K_2 - \varphi = \pi$. Для побудови профілю інструмента $\varphi \in (-\pi, \pi)$. Подальша частина профілю за межами точок K_1 і K_2 виконана у вигляді прямих ліній, що співпадають з напрямком дотичної в точках контакту. Кут між дотичною до профілю в точці K_1 і додатним напрямком осі OX визначається за формулою:

UA 110823 C2

$$\beta = -\frac{180}{\pi} \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{R_{\text{цц}} \cdot \cos \frac{\pi}{z} - e \cdot z}{R_{\text{цц}} \cdot \sin \frac{\pi}{z}} \right).$$

На фіг. 2 показано застосування як профілю інструмента увігнутої ділянки вкороченої епіциклоїди. В основу побудови покладена аналогічна вкорочена епіциклоїда, але зміщена по фазі на кут $\frac{\pi}{z-1}$. Параметричні рівняння еквідистанти такої епіциклоїди мають вигляд:

$$5 \quad X(\varphi) = e \cdot \cos \varphi - R_{\text{цц}} \cos(\varphi/z) + \frac{R_{\text{ц}} \cdot (R_{\text{цц}} \cdot \cos(\varphi/z) - e \cdot z \cdot \cos \varphi)}{\sqrt{(e \cdot z)^2 + R_{\text{цц}}^2 - 2 \cdot e \cdot z \cdot R_{\text{цц}} \cdot \cos(\varphi \cdot (z-1)/z)}},$$

$$Y(\varphi) = e \cdot \sin \varphi - R_{\text{цц}} \sin(\varphi/z) + \frac{R_{\text{ц}} \cdot (R_{\text{цц}} \cdot \sin(\varphi/z) - e \cdot z \cdot \sin \varphi)}{\sqrt{(e \cdot z)^2 + R_{\text{цц}}^2 - 2 \cdot e \cdot z \cdot R_{\text{цц}} \cdot \cos(\varphi \cdot (z-1)/z)}}.$$

Тут значення кутового параметра для точки K_1 буде відповідати $\varphi = \frac{-\pi}{z-1}$ і $\varphi = \frac{\pi}{z-1}$ для K_2 відповідно.

10 На фіг. 3 показана схема формоутворення шліфувальним кругом з випуклим профілем. При формоутворенні западини інструмент повністю прилягає до ділянки западини, завдяки чому забезпечується висока якість шліфованої поверхні цієї ділянки. При проходженні вздовж виступу оброблюваного профілю, площа прилягання інструмента з деталлю різко зменшується. При цьому матеріал знімається невеликими сегментами, площа перерізу яких постійно змінюється в залежності від положення точки контакту.

15 На фіг. 4 показана схема формоутворення шліфувальним кругом з увігнутим профілем. Така геометрія не дозволяє отримати западину, і може бути використана виключно при шліфуванні виступу. У випадку, коли профіль оброблюваного колеса окреслений цівками постійного радіуса і формою міжцвикої западини можна знехтувати, більш сприятливим буде шліфування інструментом з увігнутим профілем. Це пояснюється більш щільним приляганням профілів інструмента та деталі, кривизна обох профілів має однаковий знак і близька за значенням, зрізи мають більш рівномірний характер, та охоплюють велику частину профілю, в результаті чого можна досягти високих показників якості оброблюваної поверхні виступу. У випадку, коли профіль оброблюваного колеса окреслений огинаючою сімейства еквідистант вкорочених епіциклоїд і знехтувати формою міжзубової западини неможливо, шліфування кругом з увігнутим профілем є недостатнім для формоутворення повноцінного профілю за одну установку, в той же час шліфування кругом з випуклим профілем забезпечує формоутворення повного профілю за одну установку, але має місце нерівномірний розподіл шорсткості.

20 Для повноцінної обробки профілю, окресленого огинаючою сімейства еквідистант вкорочених епіциклоїд необхідно розділити процес обробки на чорнове і чистове шліфування, причому обидві стадії можуть бути реалізовані на одному верстаті з використанням привідної шліфувальної головки. Чорнове шліфування слід здійснювати шліфувальним кругом з випуклим профілем, а чистове - кругом з увігнутим профілем.

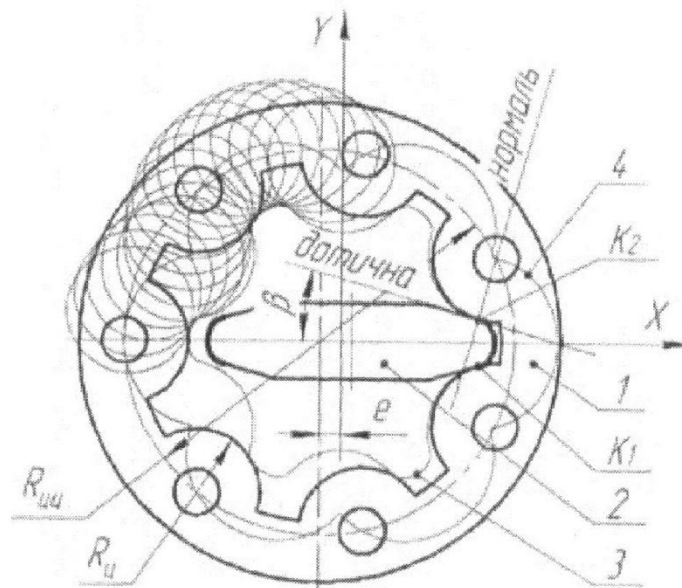
25 На фіг. 5 зображена конструктивна реалізація способу шліфування внутрішнього циклоїдального профілю героторної передачі в умовах обкату. Запропонований спосіб шліфування може бути реалізований на внутрішньо-шліфувальних, профільно-шліфувальних або координатно-шліфувальних верстатах, до шліфувальної бабки яких приєднується спеціальне пристосування з привідним механізмом. Верстат оснащується планетарним пристроєм, завдяки чому оброблювана деталь поз. 1 здійснює рух обкату, адекватний рухові при роботі циклоїдальної передачі при умові, що внутрішній ротор нерухомий. Шліфувальний круг 2 жорстко з'єднаний із зубчатим шківом 3 на одній осі, яка в свою чергу кріпиться в корпусі шліфувальної головки 4. Обертання шліфувального круга здійснюється від окремого приводу, через ремінну зубчасту передачу 5. Зворотно-поступальний рух ω шліфувальної головки задається кінематикою верстата. В результаті узгоджених рухів виконавчих органів верстата, відбувається формоутворення кінцевого профілю оброблюваного колеса. Знімання припуску відбувається вздовж формоутворюючої лінії, яка кінематично породжується у вигляді синусоїди - графіку коливань інструмента, відображеного на поверхні оброблюваного профілю. Можливо застосовувати шліфувальні круги, що потребують і такі, що не потребують періодичної правки.

45 Перевагою заявленого методу є стабілізація шорсткості на ділянках виступів і западин, та рівномірного її розподілу вздовж усієї внутрішньої циклоїдальної поверхні.

UA 110823 C2

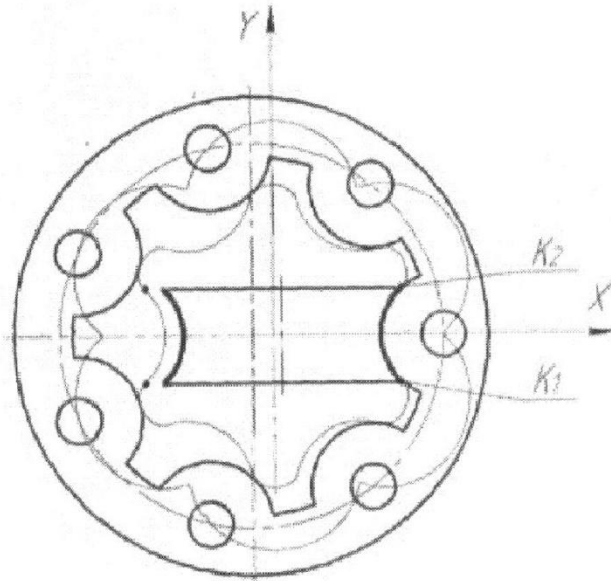
ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

- 5 Спосіб шліфування внутрішнього профілю зовнішнього колеса героторної передачі в умовах планетарного обкату, який складається з позиціонування колеса на поворотному столі, надання складних рухів із заданою між ними швидкістю на поворотному столі, обертання шліфувального круга і його осьовий та радіальний рух подачі, при цьому шліфувальний круг входить всередину оброблюваного колеса для утворення профілю зуба, збереження радіуса профілю шліфувального круга, адекватно радіусу зубця внутрішнього колеса, а також збереження одної
- 10 лінії контакту між шліфувальним кругом та внутрішньою периферійною поверхнею оброблюваного колеса, при цьому здійснюючи одночасно кутові та орбітальні рухи в однаковому кутовому напрямку, який **відрізняється** тим, що процес обробки розділяється на чорнове та чистове шліфування, причому для чорнового шліфування застосовується шліфувальний круг, профіль якого відповідає випуклій частині еквідистанти вкороченої
- 15 епіциклоїди, а увігнута частина профілю за межами точок контакту інструмента з оброблюваним колесом виконана у вигляді прямих ліній, що співпадають з напрямком дотичних в цих точках, в той же час профіль інструмента для чистового шліфування являє собою увігнуту ділянку еквідистанти до вкороченої епіциклоїди, а випуклі ділянки за межами точок контакту, замінюються прямими лініями, паралельними осі абсцис.

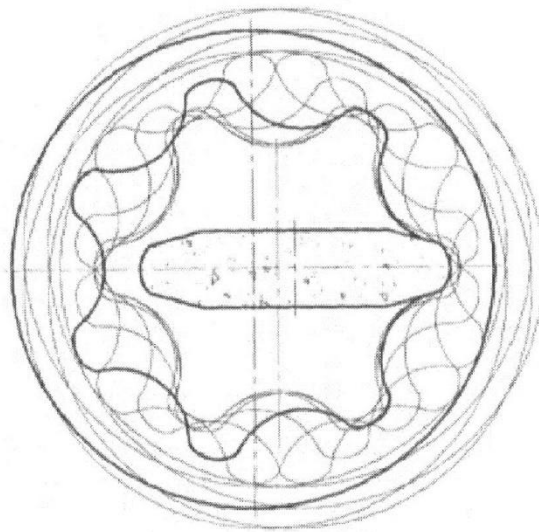


Фиг. 1

UA 110823 C2

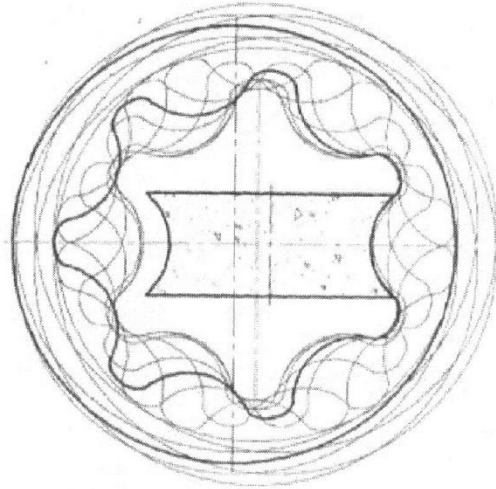


Фиг. 2

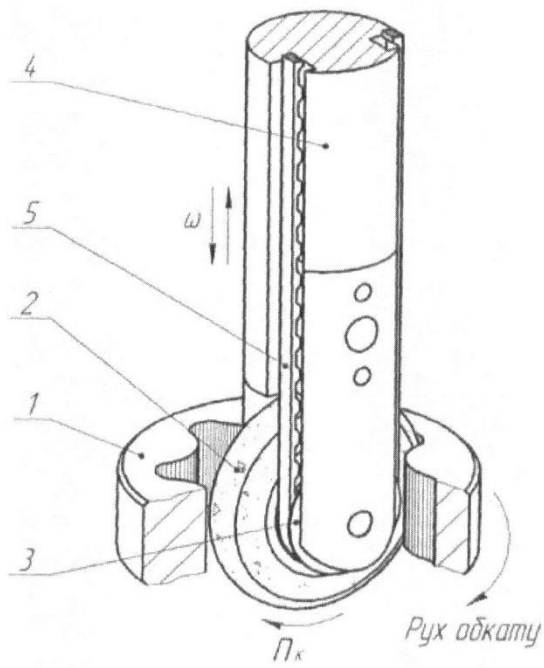


Фиг. 3

UA 110823 C2



Фиг. 4



Фиг. 5

Комп'ютерна верстка Л. Литвиненко

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут інтелектуальної власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

ДОДАТОК Б

Патент України на винахід № 113461





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **113461** (13) **C2**

(51) МПК (2016.01)

B23F 5/12 (2006.01)**B23F 5/20** (2006.01)**B23F 15/08** (2006.01)**B23Q 27/00****B24B 1/00**

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

<p>(21) Номер заявки: а 2015 06198</p> <p>(22) Дата подання заявки: 23.06.2015</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 25.01.2017</p> <p>(41) Публікація відомостей про заяву: 25.02.2016, Бюл.№ 4</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.01.2017, Бюл.№ 2</p>	<p>(72) Винахідник(и): Скібінський Олександр Іванович (UA), Гнатюк Андрій Олександрович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25030 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: US 1798059 A, 24.03.1931 UA а201313050, 12.05.2015 US 4052928 A, 11.10.1977 US 4169691 A, 02.10.1979 DE 2810515 A1, 09.11.1978 US 2724217 A, 22.11.1955 US 4058938 A, 22.11.1977 DE 2017558 A1, 04.11.1971 US 2861502 A, 25.11.1958</p>
--	--

(54) ВЕРСТАТ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОЛІС ГЕРОТОРНИХ ПЕРЕДАЧ**(57) Реферат:**

Верстат для виготовлення коліс героторних передач складається із базового верстата, наприклад фрезерного або довбального, механізму генерації циклоїдальних кривих, а також має ріжучий інструмент - фрезу або різець з розмірами і формою, які відповідають щонайменше одному зубу одного з коліс героторної передачі. Для розширення технологічних можливостей верстата та мінімізації можливих похибок при виготовленні за його допомогою коліс, механізм генерації циклоїдальних кривих втілено в систему базового верстата і він включає в себе планетарний механізм для позиціонування інструмента, два окремих програмно керованих сервоприводи, які через прецизійні черв'ячні передачі забезпечують обертання ріжучого інструмента і оброблюваного колеса навколо ексцентрично розташованих осей з фіксованими кутами повороту, які синхронізовані пристроєм ЧПУ.

UA 113461 C2

UA 113461 C2

Винахід належить до галузі машинобудування і може бути використаний для виготовлення коліс героторних передач із взаємовідтворюваними профілями, які окреслені огинаючими сімейств еквідистант до вкорочених епіциклоїд і гіпоциклоїд або цівками постійного радіуса в умовах обкату.

5 Найближчим аналогом є верстат [US 1798059] для виготовлення коліс героторних передач, який складається із базового верстата, наприклад фрезерного або довбального, механізму генерації циклоїдальних кривих, а також має ріжучий інструмент - фрезу або різець з розмірами і формою, які відповідають щонайменше одному зубу одного з коліс героторної передачі.

10 Головним недоліком наведеного верстата є конструктивна та кінематична складність механізму генерації циклоїдальних кривих, що може стати причиною виникнення похибок при генерації кривих, які описують профілі коліс героторних передач, а також складність переналадки при зміні числа зубів оброблюваних коліс.

15 В основу винаходу поставлена задача удосконалення верстата для виготовлення коліс героторних передач шляхом розширення його технологічних можливостей, та мінімізації можливих похибок при виготовленні коліс.

20 Поставлена задача вирішується тим, що механізм генерації циклоїдальних кривих втілено в систему базового верстата і він включає в себе планетарний механізм для позиціонування інструмента, два окремих програмно керованих сервоприводи, які через прецизійні черв'ячні передачі забезпечують обертання ріжучого інструмента і оброблюваного колеса навколо ексцентрично розташованих осей з фіксованими кутами повороту, які синхронізовані пристроєм ЧПУ згідно зі співвідношенням:

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{Z_2}{Z_1},$$

де φ_1 - кут повороту центрної інструмента,

φ_2 - кут повороту оброблюваного колеса,

25 Z_1 - кількість зубів спряженого колеса, яке замінено інструментом,

Z_2 - кількість зубів оброблюваного колеса.

Суть винаходу пояснюється кресленнями, де на фіг. 1 зображено верстат для обробки колеса героторної передачі, кінематична схема; на фіг. 2 зображено окремо механізм генерації циклоїдальних кривих в ізометрії з фіг. 1; на фіг. 3 зображено взаємне положення інструмента

30 (різця) і оброблюваного колеса при ($\varphi_1=0^\circ$; на фіг. 4 - взаємне положення при $\varphi_1=50^\circ$; на фіг. 5

- взаємне положення при $\varphi_1=100^\circ$; на фіг. 6 - взаємне положення при $\varphi_1=150^\circ$.

35 Верстат для виготовлення коліс героторних передач складається із базового верстата 1, наприклад фрезерного або довбального, механізму генерації циклоїдальних кривих, який включає в себе планетарний механізм 3 для позиціонування інструмента 2, два окремих програмно керованих сервоприводи 4 і 5, які через прецизійні черв'ячні передачі 6 і 7, пов'язані з ріжучим інструментом 2 і оброблюваним колесом 8 (див. фіг. 1 і 2). Сервоприводи 4 і 5 мають електричний зв'язок із пристроєм ЧПУ 9.

Пристрій ЧПУ 9 синхронізує роботу сервоприводів 4 і 5 таким чином, що кутове переміщення φ_1 інструмента 2 і φ_2 оброблюваного колеса 8, пов'язані з числом зубів оброблюваного колеса

40 Z_2 і з числом зубів Z_1 спряженого колеса 10, яке замінено інструментом (див. фіг 3, 4, 5, 6) наступним співвідношенням:

$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{Z_2}{Z_1}.$$

Верстат працює наступним чином.

45 В пристрій ЧПУ 9 верстата вводяться вхідні параметри - число зубів Z_2 оброблюваного колеса 8 і швидкість обертання інструмента 2. Далі оброблюване колесо 8 (див. фіг. 1, 2) встановлюють на верстат і за допомогою планетарного механізму 3, вводять в зачеплення з інструментом 2, витримуючи розмір e_1 . Після утворення верстатного зачеплення, запускаються сервоприводи 4 і 5. Обертаний рух передається через прецизійні черв'ячні передачі 6 і 7 до інструмента 2 і колеса 8. Осі обертання залишаються нерухомі з фіксованою

UA 113461 C2

відстанню e' -ексцентриситетом верстатного зачеплення, який чисельно рівний ексцентриситету героторної передачі (див. фіг. 3, 4, 5, 6). Пристрій ЧПУ 9 синхронізує кути

повороту φ_1 і φ_2 . В результаті синхронізації, відбувається процес формування профілю колеса 8. Зона контакту в процесі взаємного обкату переміщується одночасно вздовж профілю інструмента і оброблюваного колеса, обробка продовжується доки не буде пройдена вся довжина профілю колеса.

У випадку, коли профіль колеса окреслений огинаючою сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд або цівками постійного радіуса, застосовується інструмент у вигляді різця для довбання, якому надається зворотно-поступальний рух $V_{зп}$. Якщо профіль колеса окреслений еквідистантою до вкороченої гіпоциклоїди, то інструмент матиме круглий переріз і являтиме собою наприклад фрезу, якій надається обертання навколо власної осі та рух подачі.

Перевагою заявлюваного верстата є можливість гнучкої переналадки при частій зміні параметрів оброблюваних коліс, простота компоновки, можливість реалізації на його базі таких методів зубообробки як зубодовбання, зубофрезерування, зубошліфування, можливість обробки інших коліс з невольвентним взаємовідтворюваним профілем зуба.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

Верстат для виготовлення коліс героторних передач, який складається із базового верстата, наприклад фрезерного або довбального, механізму генерації циклоїдальних кривих, а також має ріжучий інструмент - фрезу або різець з розмірами і формою, які відповідають щонайменше одному зубу одного з коліс героторної передачі, який **відрізняється** тим, що механізм генерації циклоїдальних кривих втілено в систему базового верстата і він включає в себе планетарний механізм для позиціонування інструмента, два окремих програмно керованих сервоприводи, які через прецизійні черв'ячні передачі забезпечують обертання ріжучого інструмента і оброблюваного колеса навколо ексцентрично розташованих осей з фіксованими кутами повороту, які синхронізовані пристроєм ЧПУ згідно зі співвідношенням:

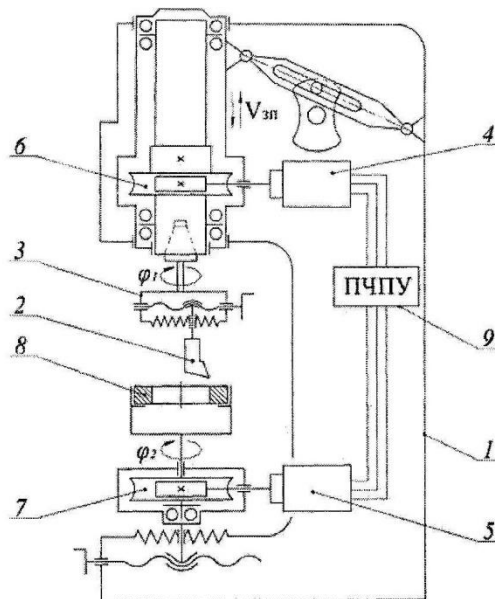
$$\frac{\varphi_1}{\varphi_2} = \frac{z_2}{z_1},$$

де φ_1 - кут повороту центроїди інструмента,

φ_2 - кут повороту центроїди оброблюваного колеса,

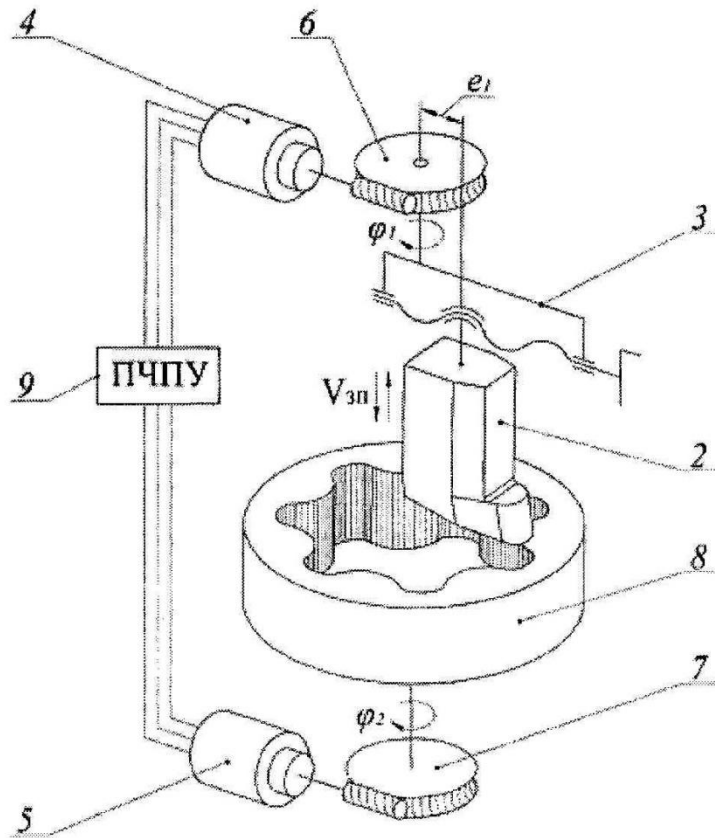
z_1 - кількість зубів спряженого колеса, яке замінено інструментом,

z_2 - кількість зубів оброблюваного колеса.

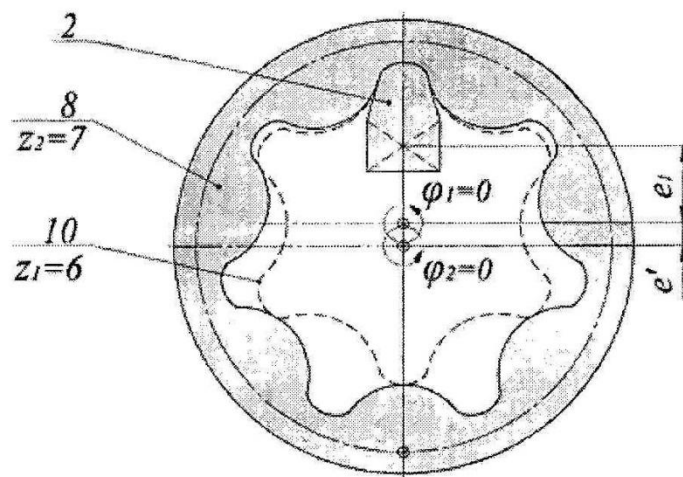


Фиг. 1

UA 113461 C2

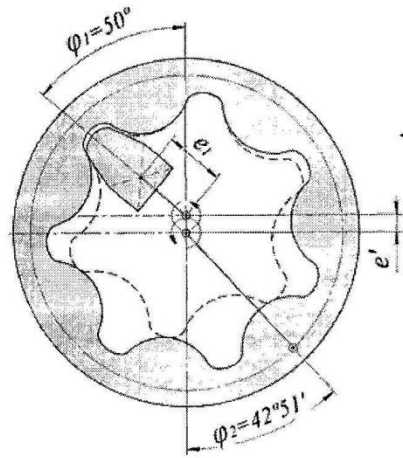


Фиг. 2

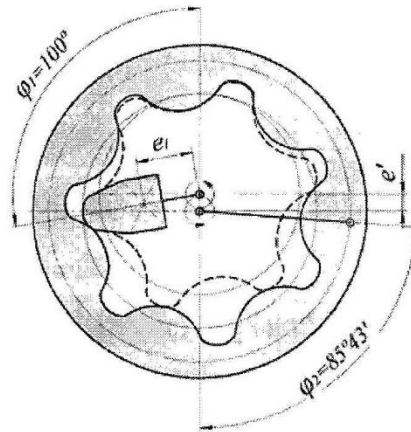


Фиг. 3

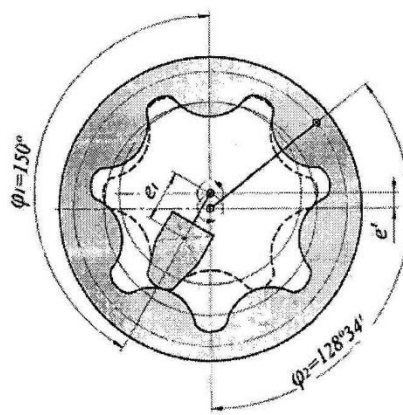
UA 113461 C2



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

Комп'ютерна верстка Г. Паяльніков

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Василя Липківського, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601

ДОДАТОК В

Акт впровадження окремих результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор ТОВ «КІЗ «Лезо»
 Мусієнко В.С.



АКТ

впровадження окремих результатів дисертаційної роботи
 «Удосконалення процесу фінішної обробки профілю цівкового колеса
 героторної пари» здобувача наукового ступеня кандидата наук Гнатюка А.О.

З метою оцінки результатів роботи здобувача і подальшого впровадження їх у виробництво на ТОВ «КІЗ «Лезо», було створено комісію у складі:

Голова комісії – директор з виробництва	Гавришко В.В.
Члени комісії: начальник технологічного бюро	Бабайко К.С.
інженер-технолог	Катков Є.П.
доцент кафедри ТМ ЦНТУ	Скібінський О.І.

Комісія встановила, що здобувачем виконані наступні роботи:

- Розроблений метод шліфування профілю цівкового колеса героторної пари в умовах обкату [Пат. України 110823С2], розроблена інженерна методика побудови профілів шліфувальних кругів на основі опуклої і увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди;
- Розроблено та виготовлено інструмент і оснастку для здійснення методу шліфування в умовах обкату на обробному центрі Millstar BMV850;
- В рамках експерименту оброблено дві партії заготовок (по 20 шт.) цівкових коліс шліфувальними кругами, профілі яких окреслені опуклою та увігнутою ділянкою еквідистанти до епіциклоїди;
- Здійснено обміри параметрів оброблених цівкових коліс - відхилення від заданого профілю і шорсткість, вимірювання яких здійснювалось в лабораторії СГМет на базі ПрАТ «Гідросила АПМ»;
- Розроблено проект безпривідної шліфувальної оправки з виносним шпинделем, адаптованої до вертикальних трьохкоординатних обробних центрів, та проект зубшліфувального обробного центру для фінішної обробки зубчатих коліс зовнішнього і внутрішнього зачеплення в умовах неперервної генерації зубчатих вінців.

Розглянувши результати дисертаційної роботи, комісія встановила:

- Розроблений метод фінішної обробки придатний для шліфування цівкових коліс з твердістю 58...65 HRC, в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва;
- Застосування шліфувальних кругів із опуклою формою профілю на керамічній зв'язці є неефективним, в силу низької стійкості (експериментальна стійкість – 4 цівки), натомість, більш ефективним є застосування інструментів з увігнутою формою профілю (експериментальна стійкість складає 12 цівок);
- Метод дає можливість здійснення обробки профілів сателіта і цівкового колеса на одному верстаті з незначною переналадкою;
- Одиничне і дрібносерійне виробництво коліс героторної пари можливо здійснювати на вертикально-фрезерних трьохкоординатних обробних центрах, шляхом оснащення керованою віссю С (поворотним столом), та програмування осциляції шпиндельної бабки по вісі Z;
- Довготривалу обробку в умовах серійного виробництва доцільно здійснювати на верстатах зі спеціальним приводом осциляції інструменту (наприклад лінійним), де відсутні точні механізми передачі руху, які зазнають негативного впливу інерційних навантажень.

Розроблена здобувачем оснастка (привідна шліфувальна оправка з виносним шпинделем), що адаптована до обробного центру Millstar BMV850, використовується в умовах виробничого цеху ТОВ «КІЗ «Лезо»

Голова комісії

Директор з виробництва

Гавришко В.В.

Члени комісії:

Начальник технологічного бюро

Бабайко К.С.

Інженер-технолог

Катков С.П.

Доцент кафедри ТМ ЦНТУ

Скібінський О.І.

ДОДАТОК Г


Результати обмірів параметрів цівкових коліс на координатно-вимірювальній машині Contura G2 (CARL ZEISS)



Messprotokoll ZEISS Calypso



Имя плана ЛЕЗО	Дата 25 Juli 2016	
Номер чертежа * drawingno *	Время 8:32:40	Заказ
Оператор Master	КИМ C32Bit	Возраст. номер детали 1


Name	ID	Aktual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<-- -->
 Общий результат							
Все характеристики:	32						
...в Допуске:		30					
...Вне допуска:		2					
...На границе предупреждения:		0					
...Не вычислять:		0					
Всего коорд. сист.:	0						
...Не вычислять:		0					
Всего текст. элем.:	0						

































■ Диаметр_Окружность4	D	67.9655	67.9500			0.0155	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(1)	33.9906	33.9750			0.0156	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(2)	33.9910	33.9750			0.0160	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(3)	33.9775	33.9750			0.0025	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(4)	33.9597	33.9750			-0.0153	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(5)	33.9617	33.9750			-0.0133	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(6)	33.9951	33.9750			0.0201	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(7)	34.0038	33.9750			0.0288	
■ Полярный угол_Окружн	A (1)	0° 0' 1"	0° 0' 0"			0° 0' 1"	
■ Полярный угол_Окружн	A (2)	51°26'31"	51°25'43"			0° 0'48"	
■ Полярный угол_Окружн	A (3)	102°52'34"	102°51'26"			0° 1' 8"	
■ Полярный угол_Окружн	A (4)	154°23'58"	154°17' 9"			0° 6'49"	
■ Полярный угол_Окружн	A (5)	205°44'23"	205°42'52"			0° 1'31"	
■ Полярный угол_Окружн	A (6)	257°10' 7"	257° 8'35"			0° 1'32"	
■ Полярный угол_Окружн	A (7)	308°34'25"	308°34'18"			0° 0' 7"	
■ Радиус1(1)	R	11.0105	11.0000			0.0105	
■ Радиус1(2)	R	11.0186	11.0000			0.0186	
■ Радиус1(3)	R	11.0124	11.0000			0.0124	
■ Радиус1(4)	R	11.0077	11.0000			0.0077	
■ Радиус1(5)	R	11.0048	11.0000			0.0048	
■ Радиус1(6)	R	11.0053	11.0000			0.0053	
■ Радиус1(7)	R	11.0105	11.0000			0.0105	
■ Круглость1(1)	Некр	0.0116	0.0000	0.0200		0.0116	---
■ Круглость1(2)	Некр	0.0130	0.0000	0.0200		0.0130	---
■ Круглость1(3)	Некр	0.0109	0.0000	0.0200		0.0109	---
■ Круглость1(4)	Некр	0.0096	0.0000	0.0200		0.0096	--
■ Круглость1(5)	Некр	0.0112	0.0000	0.0200		0.0112	---
■ Круглость1(6)	Некр	0.0138	0.0000	0.0200		0.0138	---
■ Круглость1(7)	Некр	0.0113	0.0000	0.0200		0.0113	---
■ Перпендикулярность1	Перп	0.0078	0.0000	0.0050		0.0078	0.0028
■ Перпендикулярность2	Перп	0.0003	0.0000	0.0050		0.0003	-
■ Перпендикулярность3	Перп	0.0081	0.0000	0.0050		0.0081	0.0031

Messprotokoll ZEISS Calypso



Имя плана ЛЕЗО	Дата 25 Juli 2016	
Номер чертежа * drawingno *	Время 8:48:28	Заказ
Оператор Master	КИМ C32Bit	Возраст. номер детали 2


Name	ID	Aktual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<-- -->
 Общий результат							
Все характеристики:	32						
...в Допуске:		31					
...Вне допуска:		1					
...На границе предупреждения:		0					
...Не вычислять:		0					
Всего коорд. сист.:	1						
...Не вычислять:		0					
Всего текст. элем.:	0						

 Диаметр_Окружность4	D	67.9685	67.9500			0.0185	
 Полярный радиус_Окружн	R 3(1)	33.9854	33.9750			0.0104	
 Полярный радиус_Окружн	R 3(2)	33.9962	33.9750			0.0212	
 Полярный радиус_Окружн	R 3(3)	33.9763	33.9750			0.0013	
 Полярный радиус_Окружн	R 3(4)	33.9810	33.9750			0.0060	
 Полярный радиус_Окружн	R 3(5)	33.9871	33.9750			0.0121	
 Полярный радиус_Окружн	R 3(6)	33.9947	33.9750			0.0197	
 Полярный радиус_Окружн	R 3(7)	33.9690	33.9750			-0.0060	
 Полярный угол_Окружн	A(1)	-0° 0' 0"	0° 0' 0"			-0° 0' 0"	
 Полярный угол_Окружн	A(2)	51°26'10"	51°25'43"			0° 0'27"	
 Полярный угол_Окружн	A(3)	102°53' 0"	102°51'26"			0° 1'34"	
 Полярный угол_Окружн	A(4)	154°18' 9"	154°17' 9"			0° 1' 0"	
 Полярный угол_Окружн	A(5)	205°44' 9"	205°42'52"			0° 1'17"	
 Полярный угол_Окружн	A(6)	257° 9'51"	257° 8'35"			0° 1'16"	
 Полярный угол_Окружн	A(7)	308°36' 2"	308°34'18"			0° 1'44"	
 Радиус1(1)	R	11.0033	11.0000			0.0033	
 Радиус1(2)	R	11.0092	11.0000			0.0092	
 Радиус1(3)	R	11.0185	11.0000			0.0185	
 Радиус1(4)	R	11.0167	11.0000			0.0167	
 Радиус1(5)	R	11.0098	11.0000			0.0098	
 Радиус1(6)	R	11.0154	11.0000			0.0154	
 Радиус1(7)	R	11.0096	11.0000			0.0096	
 Круглость1(1)	Некр	0.0161	0.0000	0.0200		0.0161	---
 Круглость1(2)	Некр	0.0149	0.0000	0.0200		0.0149	---
 Круглость1(3)	Некр	0.0176	0.0000	0.0200		0.0176	---
 Круглость1(4)	Некр	0.0137	0.0000	0.0200		0.0137	---
 Круглость1(5)	Некр	0.0120	0.0000	0.0200		0.0120	---
 Круглость1(6)	Некр	0.0164	0.0000	0.0200		0.0164	---
 Круглость1(7)	Некр	0.0150	0.0000	0.0200		0.0150	---
 Перпендикулярность1	Перп	0.0014	0.0000	0.0050		0.0014	---
 Перпендикулярность2	Перп	0.0026	0.0000	0.0050		0.0026	---
 Перпендикулярность3	Перп	0.0084	0.0000	0.0050		0.0084	0.0034

Messprotokoll ZEISS Calypso



Имя плана ЛЕЗО	Дата 25 Juli 2016	
Номер чертежа * drawingno *	Время 9:07:05	Заказ
Оператор Master	КИМ C32Bit	Возраст. номер детали 3


Name	ID	Aktual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<-- -->
 Общй результат							
Все характеристики:	32						
...в Допуске:		29					
...Вне допуска:		3					
...На границе предупреждения:		0					
...Не вычислять:		0					
Всего коорд. сист.:	1						
...Не вычислять:		0					
Всего текст. элем.:	0						

Диаметр_Окружность4	D	67.9712	67.9500			0.0212	
Полярный радиус_Окружн	R 3(1)	34.0027	33.9750			0.0277	
Полярный радиус_Окружн	R 3(2)	33.9834	33.9750			0.0084	
Полярный радиус_Окружн	R 3(3)	33.9916	33.9750			0.0166	
Полярный радиус_Окружн	R 3(4)	33.9872	33.9750			0.0122	
Полярный радиус_Окружн	R 3(5)	33.9705	33.9750			-0.0045	
Полярный радиус_Окружн	R 3(6)	33.9645	33.9750			-0.0105	
Полярный радиус_Окружн	R 3(7)	33.9991	33.9750			0.0241	
Полярный угол_Окружн	A (1)	-0° 0' 2"	0° 0' 0"			-0° 0' 2"	
Полярный угол_Окружн	A (2)	51°26' 7"	51°25'43"			0° 0'24"	
Полярный угол_Окружн	A (3)	102°50'26"	102°51'26"			-0° 1' 0"	
Полярный угол_Окружн	A (4)	154°16'24"	154°17' 9"			-0° 0'45"	
Полярный угол_Окружн	A (5)	205°42'11"	205°42'52"			-0° 0'41"	
Полярный угол_Окружн	A (6)	257° 8'14"	257° 8'35"			-0° 0'21"	
Полярный угол_Окружн	A (7)	308°34'21"	308°34'18"			0° 0' 3"	
Радиус1(1)	R	11.0095	11.0000			0.0095	
Радиус1(2)	R	11.0104	11.0000			0.0104	
Радиус1(3)	R	11.0106	11.0000			0.0106	
Радиус1(4)	R	11.0106	11.0000			0.0106	
Радиус1(5)	R	11.0171	11.0000			0.0171	
Радиус1(6)	R	11.0068	11.0000			0.0068	
Радиус1(7)	R	11.0133	11.0000			0.0133	
Круглость1(1)	Некр	0.0126	0.0000	0.0200		0.0126	---
Круглость1(2)	Некр	0.0145	0.0000	0.0200		0.0145	---
Круглость1(3)	Некр	0.0163	0.0000	0.0200		0.0163	---
Круглость1(4)	Некр	0.0254	0.0054	0.0200		0.0254	0.0054
Круглость1(5)	Некр	0.0184	0.0000	0.0200		0.0184	---
Круглость1(6)	Некр	0.0106	0.0000	0.0200		0.0106	---
Круглость1(7)	Некр	0.0172	0.0000	0.0200		0.0172	---
Перпендикулярность1	Перп	0.0057	0.0000	0.0050		0.0057	0.0007
Перпендикулярность2	Перп	0.0082	0.0000	0.0050		0.0082	0.0032
Перпендикулярность3	Перп	0.0046	0.0000	0.0050		0.0046	---

Messprotokoll ZEISS Calypso



Имя плана ЛЕЗО	Дата 25 Juli 2016	
Номер чертежа * drawingno *	Время 9:01:12	Заказ
Оператор Master	КИМ C32Bit	Возраст. номер детали 4


Name	ID	Aktual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<-- -->
 Общй результат							
Все характеристики:	32						
...в Допуске:		31					
...Вне допуска:		1					
...На границе предупреждения:		0					
...Не вычислять:		0					
Всего коорд. сист.:	1						
...Не вычислять:		0					
Всего текст. элем.:	0						

■ Диаметр_Окружность4	D	67.9794	67.9500			0.0294	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(1)	33.9831	33.9750			0.0081	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(2)	33.9958	33.9750			0.0208	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(3)	33.9945	33.9750			0.0195	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(4)	33.9895	33.9750			0.0145	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(5)	33.9742	33.9750			-0.0008	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(6)	34.0003	33.9750			0.0253	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(7)	33.9906	33.9750			0.0156	
■ Полярный угол_Окружн	A (1)	-0° 0' 3"	0° 0' 0"			-0° 0' 3"	
■ Полярный угол_Окружн	A (2)	51°25'47"	51°25'43"			0° 0' 4"	
■ Полярный угол_Окружн	A (3)	102°50'54"	102°51'26"			-0° 0'32"	
■ Полярный угол_Окружн	A (4)	154°17' 5"	154°17' 9"			-0° 0' 4"	
■ Полярный угол_Окружн	A (5)	205°43'40"	205°42'52"			0° 0'48"	
■ Полярный угол_Окружн	A (6)	257°10'56"	257° 8'35"			0° 2'21"	
■ Полярный угол_Окружн	A (7)	308°34'41"	308°34'18"			0° 0'23"	
■ Радиус1(1)	R	11.0122	11.0000			0.0122	
■ Радиус1(2)	R	11.0180	11.0000			0.0180	
■ Радиус1(3)	R	11.0163	11.0000			0.0163	
■ Радиус1(4)	R	11.0109	11.0000			0.0109	
■ Радиус1(5)	R	11.0066	11.0000			0.0066	
■ Радиус1(6)	R	11.0081	11.0000			0.0081	
■ Радиус1(7)	R	11.0147	11.0000			0.0147	
■ Круглость1(1)	Некр	0.0124	0.0000	0.0200		0.0124	---
■ Круглость1(2)	Некр	0.0138	0.0000	0.0200		0.0138	---
■ Круглость1(3)	Некр	0.0128	0.0000	0.0200		0.0128	---
■ Круглость1(4)	Некр	0.0139	0.0000	0.0200		0.0139	---
■ Круглость1(5)	Некр	0.0145	0.0000	0.0200		0.0145	---
■ Круглость1(6)	Некр	0.0186	0.0000	0.0200		0.0186	---
■ Круглость1(7)	Некр	0.0132	0.0000	0.0200		0.0132	---
■ Перпендикулярность1	Перп	0.0025	0.0000	0.0050		0.0025	---
■ Перпендикулярность2	Перп	0.0047	0.0000	0.0050		0.0047	---
■ Перпендикулярность3	Перп	0.0077	0.0000	0.0050		0.0077	0.0027

Messprotokoll ZEISS Calypso



Имя плана ЛЕЗО	Дата 25 Juli 2016	
Номер чертежа * drawingno *	Время 9:17:44	Заказ
Оператор Master	КИМ C32Bit	Возраст. номер детали 5


Name	ID	Aktual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<-- -->
 Общий результат							
Все характеристики:	32						
...в Допуске:		32					
...Вне допуска:		0					
...На границе предупреждения:		0					
...Не вычислять:		0					
Всего коорд. сист.:	1						
...Не вычислять:		0					
Всего текст. элем.:	0						

Диаметр_Окружность4	D	67.9734	67.9500			0.0234	
Полярный радиус_Окружн	R 3(1)	34.0250	33.9750			0.0500	
Полярный радиус_Окружн	R 3(2)	33.9947	33.9750			0.0197	
Полярный радиус_Окружн	R 3(3)	33.9612	33.9750			-0.0138	
Полярный радиус_Окружн	R 3(4)	33.9433	33.9750			-0.0317	
Полярный радиус_Окружн	R 3(5)	33.9771	33.9750			0.0021	
Полярный радиус_Окружн	R 3(6)	33.9928	33.9750			0.0178	
Полярный радиус_Окружн	R 3(7)	34.0127	33.9750			0.0377	
Полярный угол_Окружн	A (1)	0° 0' 1"	0° 0' 0"			0° 0' 1"	
Полярный угол_Окружн	A (2)	51°23'56"	51°25'43"			-0° 1'47"	
Полярный угол_Окружн	A (3)	102°50' 6"	102°51'26"			-0° 1'20"	
Полярный угол_Окружн	A (4)	154°18'41"	154°17' 9"			0° 1'32"	
Полярный угол_Окружн	A (5)	205°46'31"	205°42'52"			0° 3'39"	
Полярный угол_Окружн	A (6)	257°13'14"	257° 8'35"			0° 4'39"	
Полярный угол_Окружн	A (7)	308°37'15"	308°34'18"			0° 2'57"	
Радиус1(1)	R	11.0123	11.0000			0.0123	
Радиус1(2)	R	11.0117	11.0000			0.0117	
Радиус1(3)	R	11.0088	11.0000			0.0088	
Радиус1(4)	R	10.9806	11.0000			0.9806	
Радиус1(5)	R	11.0091	11.0000			0.0091	
Радиус1(6)	R	11.0163	11.0000			0.0163	
Радиус1(7)	R	11.0162	11.0000			0.0162	
Круглость1(1)	Некр	0.0143	0.0000	0.0200		0.0143	---
Круглость1(2)	Некр	0.0166	0.0000	0.0200		0.0166	---
Круглость1(3)	Некр	0.0160	0.0000	0.0200		0.0160	---
Круглость1(4)	Некр	0.0122	0.0000	0.0200		0.0122	---
Круглость1(5)	Некр	0.0131	0.0000	0.0200		0.0131	---
Круглость1(6)	Некр	0.0104	0.0000	0.0200		0.0104	---
Круглость1(7)	Некр	0.0125	0.0000	0.0200		0.0125	---
Перпендикулярность1	Перп	0.0024	0.0000	0.0050		0.0024	---
Перпендикулярность2	Перп	0.0035	0.0000	0.0050		0.0035	---
Перпендикулярность3	Перп	0.0018	0.0000	0.0050		0.0018	---

Messprotokoll ZEISS Calypso




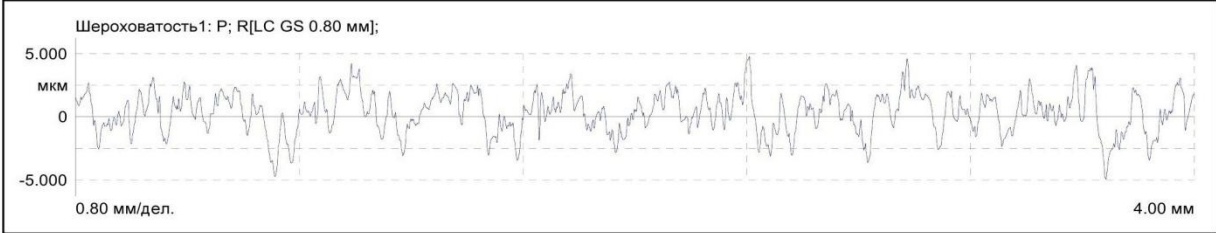
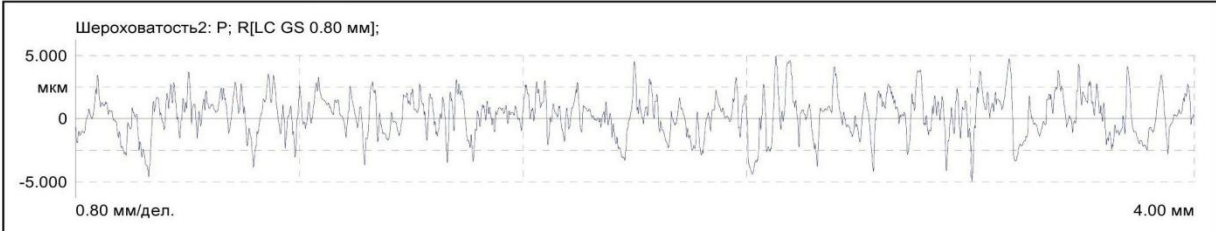
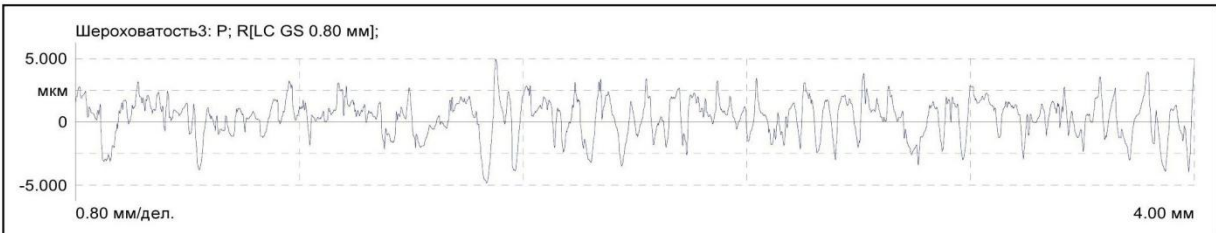
Имя плана ЛЕЗО	Дата 25 Juli 2016	
Номер чертежа * drawingno *	Время 9:22:26	Заказ
Оператор Master	КИМ C32Bit	Возраст. номер детали 6



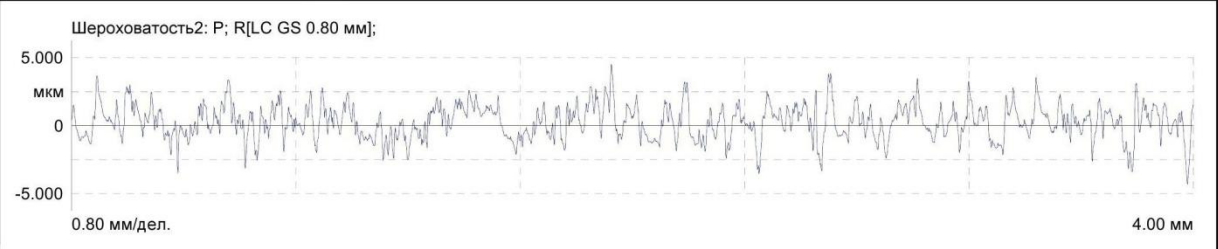
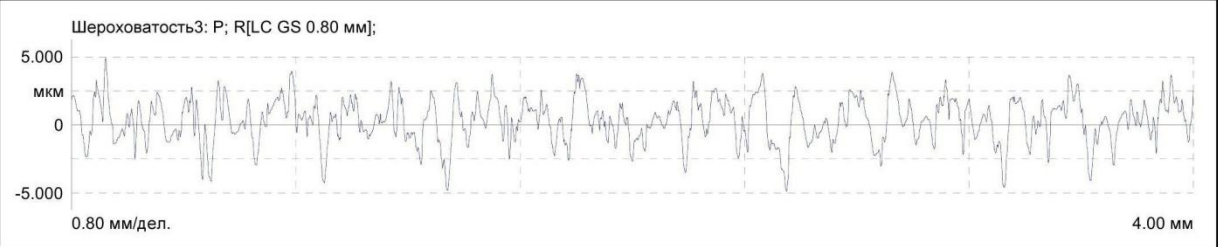
Name	ID	Aktual	Nominal	pos Tol	neg Tol	Diff	<-- -->
 Общй результат							
Все характеристики:	32						
...в Допуске:		30					
...Вне допуска:		2					
...На границе предупреждения:		0					
...Не вычислять:		0					
Всего коорд. сист.:	1						
...Не вычислять:		0					
Всего текст. элем.:	0						


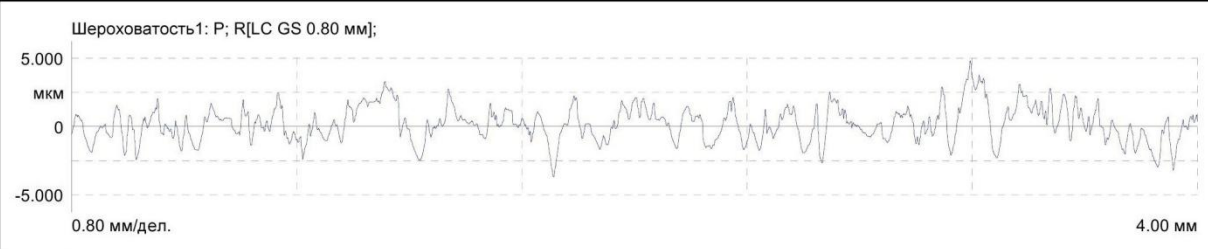
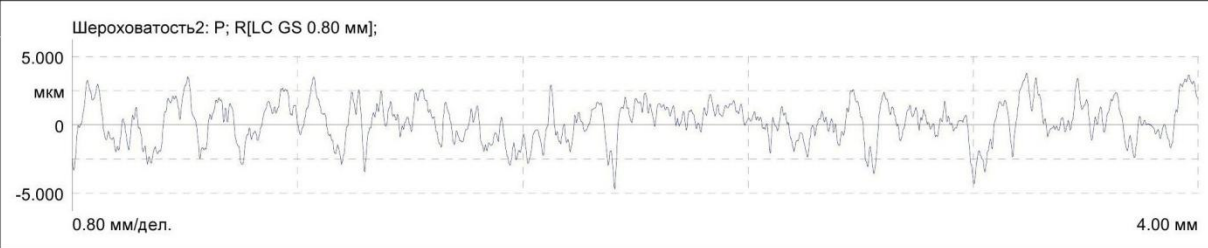

■ Диаметр_Окружность4	D	67.9642	67.9500			0.0142	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(1)	33.9805	33.9750			0.0055	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(2)	33.9862	33.9750			0.0112	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(3)	33.9813	33.9750			0.0063	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(4)	33.9797	33.9750			0.0047	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(5)	33.9894	33.9750			0.0144	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(6)	33.9812	33.9750			0.0062	
■ Полярный радиус_Окружн	R 3(7)	33.9764	33.9750			0.0014	
■ Полярный угол_Окружн	A(1)	-0° 0' 6"	0° 0' 0"			-0° 0' 6"	
■ Полярный угол_Окружн	A(2)	51°25'46"	51°25'43"			0° 0' 3"	
■ Полярный угол_Окружн	A(3)	102°52'11"	102°51'26"			0° 0'45"	
■ Полярный угол_Окружн	A(4)	154°18'53"	154°17' 9"			0° 1'44"	
■ Полярный угол_Окружн	A(5)	205°45'12"	205°42'52"			0° 2'20"	
■ Полярный угол_Окружн	A(6)	257°10'45"	257° 8'35"			0° 2'10"	
■ Полярный угол_Окружн	A(7)	308°33'58"	308°34'18"			-0° 0'20"	
■ Радиус1(1)	R	11.0164	11.0000			0.1164	
■ Радиус1(2)	R	11.0106	11.0000			0.1306	
■ Радиус1(3)	R	11.0258	11.0000			0.1258	
■ Радиус1(4)	R	11.0155	11.0000			0.1155	
■ Радиус1(5)	R	11.0037	11.0000			0.1300	
■ Радиус1(6)	R	11.0039	11.0000			0.0939	
■ Радиус1(7)	R	11.0194	11.0000			0.1194	
■ Круглость1(1)	Некр	0.0088	0.0000	0.0200		0.0088	--
■ Круглость1(2)	Некр	0.0099	0.0000	0.0200		0.0099	--
■ Круглость1(3)	Некр	0.0098	0.0000	0.0200		0.0098	--
■ Круглость1(4)	Некр	0.0111	0.0000	0.0200		0.0111	--
■ Круглость1(5)	Некр	0.0143	0.0000	0.0200		0.0143	--
■ Круглость1(6)	Некр	0.0091	0.0000	0.0200		0.0091	--
■ Круглость1(7)	Некр	0.0101	0.0000	0.0200		0.0101	--
■ Перпендикулярность1	Перп	0.0038	0.0000	0.0000		0.0038	--
■ Перпендикулярность2	Перп	0.0058	0.0000	0.0050		0.0058	0.0008
■ Перпендикулярность3	Перп	0.0070	0.0000	0.0050		0.0070	0.0020


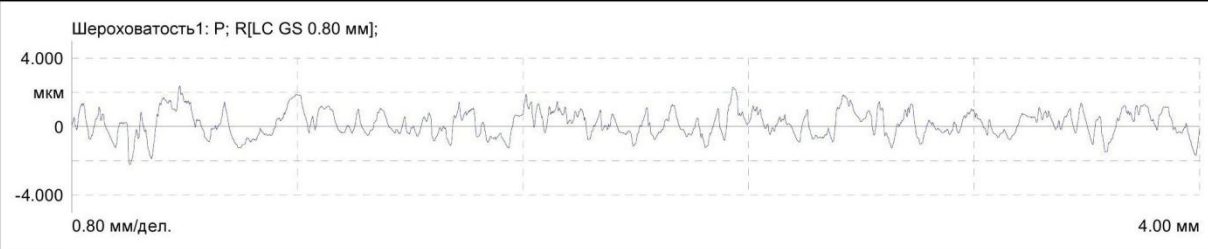
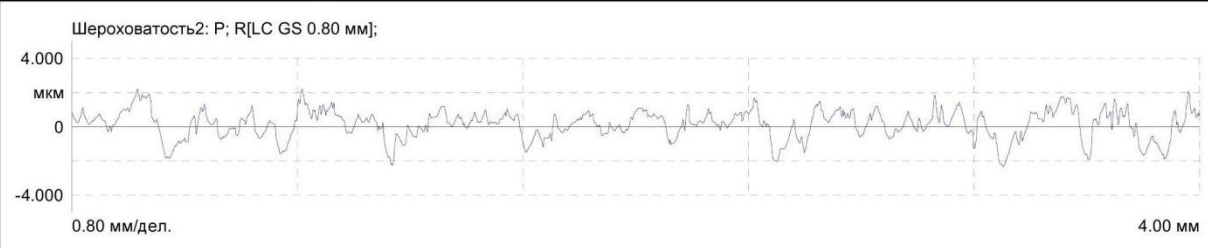
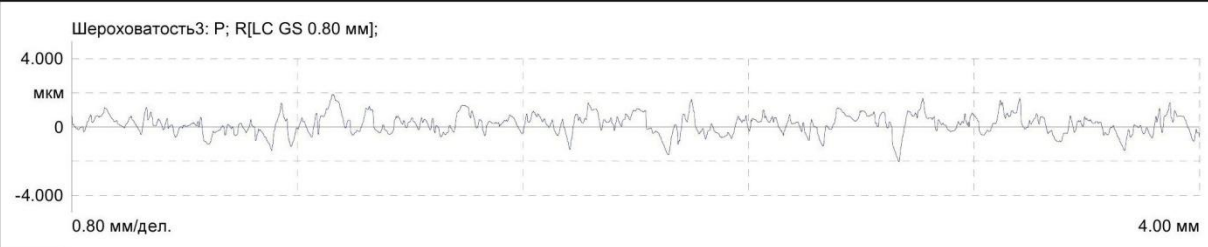
ДОДАТОК Д


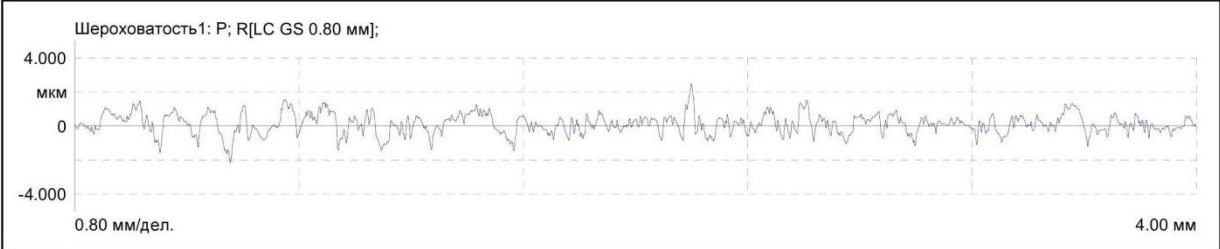
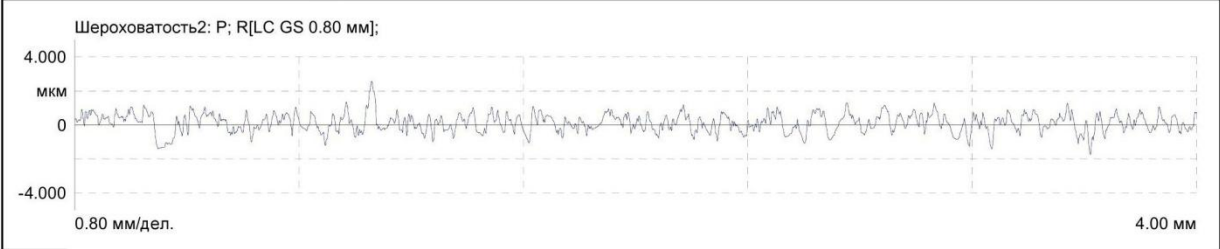

Результати вибіркового вимірювання шорсткості в межах окремих деталей на профілограф-профілометрі Mahr GD 25

	MarWin 5.00-06 SP 2	10.08.2016 1 07:49:27 Контролер:
Деталь: Статор		Подпись:
Номер чертежа:		Цикл обработки:
№1		
Комментарий:		
Измерительный прибор MarTalk Устройство подачи: DriveUnit.GD 25 Адаптер: MFW-250:2 (#71881) -1.6 %		Lt: 18.00 мм Ls: 2.50 мкм VB: +/-250.0 мкм Vt: 0.50 мм/с Точки: 36000
Шероховатость 1: P; R[LC GS 0.80 мм];		
		
Шероховатость 2: P; R[LC GS 0.80 мм];		
		
Шероховатость 3: P; R[LC GS 0.80 мм];		
		
Параметры шероховатости- Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм];		
Ra	1,4052 мкм	0,0000
Параметры шероховатости- Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм];		
Ra	1,4824 мкм	0,0000
Параметры шероховатости- Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм];		
Ra	1,3695 мкм	0,0000

 MarWin 5.00-06 SP 2		10.08.2016 1 08:13:31 Контролер:
Деталь: Статор	Номер чертежа:	Цикл обработки:
		Подпись:
		№2
Комментарий:		
Измерительный прибор MarTalk Устройство подачи: DriveUnit.GD 25 Адаптер: MFW-250:2 (#71881) -1.6 %		Lt: 18.00 мм Ls: 2.50 мкм VB: +/-250.0 мкм Vt: 0.50 мм/с Точки: 36000
Шероховатость 1: P; R[LC GS 0.80 мм]; 		
Шероховатость 2: P; R[LC GS 0.80 мм]; 		
Шероховатость 3: P; R[LC GS 0.80 мм]; 		
Параметры шероховатости- Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 1,1007 мкм 0,0000 0,0000		
Параметры шероховатости- Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 1,2681 мкм 0,0000 0,0000		
Параметры шероховатости- Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 1,3310 мкм 0,0000 0,0000		

 MarWin 5.00-06 SP 2		10.08.2016 1 08:59:24 Контролер:
Деталь: Статор		Номер чертежа:
Цикл обработки:		Подпись:
№3		
Комментарий:		
Измерительный прибор MarTalk Устройство подачи: DriveUnit.GD 25 Адаптер: MFW-250:2 (#71881) -1.6 %		Lt: 18.00 мм Ls: 2.50 мкм VB: +/-250.0 мкм Vt: 0.50 мм/с Точки: 36000
<p>Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм];</p> 		
<p>Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм];</p> 		
<p>Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм];</p> 		
Параметры шероховатости- Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм];		
Ra	1,5881 мкм	0,0000
Параметры шероховатости- Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм];		
Ra	1,7382 мкм	0,0000
Параметры шероховатости- Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм];		
Ra	1,3403 мкм	0,0000

 MarWin 5.00-06 SP 2		10.08.2016 1 16:09:30 Контролер:
Деталь: Статор		Подпись:
Номер чертежа:	Цикл обработки:	
Комментарий:		№5
Измерительный прибор MarTalk Устройство подачи: DriveUnit.GD 25 Адаптер: MFW-250:2 (#71881) -1.6 %		Lt: 18.00 мм Ls: 2.50 мкм VB: +/-250.0 мкм Vt: 0.50 мм/с Точки: 36000
<p>Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм];</p> 		
<p>Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм];</p> 		
<p>Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм];</p> 		
Параметры шероховатости- Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм];		
Ra	0,6270 мкм	0,0000
Параметры шероховатости- Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм];		
Ra	0,6051 мкм	0,0000
Параметры шероховатости- Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм];		
Ra	0,5195 мкм	0,0000

 MarWin 5.00-06 SP 2		10.08.2016 1 16:43:18 Контролер:
Деталь: Статор	Номер чертежа:	Цикл обработки:
		Подпись:
		№6
Комментарий:		
Измерительный прибор MarTalk Устройство подачи: DriveUnit.GD 25 Адаптер: MFW-250:2 (#71881) -1.6 %		Lt: 18.00 мм Ls: 2.50 мкм VB: +/-250.0 мкм Vt: 0.50 мм/с Точки: 36000
Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм]; 		
Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм]; 		
Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм]; 		
Параметры шероховатости- Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 0,6284 мкм 0,0000 0,0000		
Параметры шероховатости- Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 0,5517 мкм 0,0000 0,0000		
Параметры шероховатости- Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 0,6305 мкм 0,0000 0,0000		

ДОДАТОК Е

Результати вибіркового вимірювання відхилення форми профілю в межах окремих цівок на профілограф-профілометрі Mahr GD 25

