

Центральноукраїнський національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Центральноукраїнський національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

АПАРАКІН АНТОН РУСЛАНОВИЧ

УДК 621.914.5

ДИСЕРТАЦІЯ

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЧИСТОВОГО
ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ
ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ЗА РАХУНОК ЗМІНИ СХЕМИ РІЗАННЯ**

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.Р. Апаракін /

Науковий керівник – Підгаєцький Михайло Матвійович,
кандидат технічних наук, доцент

Кропивницький – 2021 рік

АНОТАЦІЯ

Апаракін А.Р. Підвищення ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс за рахунок зміни схеми різання. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2021.

Робота присвячена підвищенню ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс середніх модулів 5...14 мм за рахунок зміни схеми взаємодії різальної кромки інструменту та оброблюваної поверхні та створення передумов для реалізації технології зубофрезерування в умовах гнучкого виробництва.

В першому розділі здійснено аналіз сучасного стану способу черв'ячного зубофрезерування. Аналіз доступних літературних джерел стосовно конструктивних виконань черв'ячних фрез, процесу стружкоутворення, похибок обробки, зносу та стійкості інструменту, режимів різання, сили різання характеризують процес черв'ячного зубофрезерування як дуже енергоємний процес, зі складними умовами різання та стружкоутворення, що виконується дорогим інструментом зі складною геометрією. В свою чергу все це впливає на точність обробки та ресурс зубообробного обладнання. Також, проведено аналіз будови сучасних зубофрезерних верстатів, зокрема, тенденції відходу від механічних ділільних ланцюгів та використання уніфікованих модулів з прямим приводом, мехатронних систем. На підставі описаних у розділі проблем черв'ячного зубофрезерування виникає протиріччя між значним прогресом у створенні верстатних систем та, незважаючи на численні дослідження у даній галузі, зовсім незначним прогресом в удосконаленні самого процесу зубофрезерування з точки зору зниження його енергоємності, підвищення ресурсу верстатів та інструментів та забезпечення точності обробки.

В другому розділі представлено програму та методику теоретичних та експериментальних досліджень. Теоретичні дослідження проводяться за напрямками визначення енергоємності процесів зубофрезерування, шляхів зменшення спотворень геометричної форми обробленої поверхні, впливу зазорів на кінематичну точність ділильних ланцюгів столів зубофрезерних верстатів. Визначені загальні вимоги до процесів моделювання, які забезпечують адекватність процесів моделювання реальним процесам зубофрезерування з наведенням схем різання в умовах довбання різцем. Для умов моделювання розглянуто методики визначення впливу похибок інструменту на точність обробки. Експериментальні дослідження проводяться за напрямками визначення впливу схеми різання на напруження у поверхневому шарі обробленої поверхні, впливу характеру взаємодії головної різальної кромки інструменту з оброблюваною поверхнею на точність в умовах фізичного моделювання процесів (довбання різцем), а також впливу елементів режимів різання на величину шорсткості поверхні в умовах моделювання, описані умови багатофакторного експерименту, рівні незалежних змінних та приведена матриця експерименту. Наведена методика експериментального дослідження формоутворення евольвентного профілю при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні, описано конструкцію експериментального зразка фрези, вхідні та вихідні параметри дослідження та методика налагодження фрези по попередньо обробленій деталі.

В третьому розділі виконується аналіз системи взаємодії різальної кромки і поверхні, що оброблюється та вплив факторів взаємодії на точність обробки, якість обробленої поверхні та напрямок і величину сил різання, включаючи вплив останніх на вузли верстату. Результати досліджень, виконаних в умовах моделювання, дають змогу робити висновки про вплив похибок інструменту та верстата на точність обробки при зубофрезеруванні, вплив системи взаємодії різальної кромки і оброблюваної поверхні на відхилення профілю та рівень сталості процесу зубофрезерування. Для забезпечення вимог до точності і якості обробленої поверхні при зубофрезеруванні, рекомендована система

взаємодії різальної кромки і оброблюваної поверхні, що відмінна від традиційного черв'ячного зубофрезерування.

Грунтуючись на результатах проведених теоретичних досліджень процесу формоутворення (визначення форми одиничних зрізів) та енергоємності обробки, робиться прогноз про зниження енергетичних витрат приблизно в 2,5 рази завдяки зниженню сили різання.

Здійснено кінематичний синтез способу черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі контурної взаємодії різальної кромки та оброблюваної поверхні. Для реалізації способу виконано синтез конструктивної схеми черв'ячно-контурної фрези.

В четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень процесів різання які вказують на те, що поверхня, оброблена дотичною різальною кромкою інструменту має значно гіршу якість (Ra 3,6 мкм та непрямолінійність 0,062 мм), за всіма показниками, ніж поверхня, оброблена різальною кромкою інструменту розташованою по нормалі (Ra 1,25 мкм та непрямолінійність 0,03 мм), що також підтверджується результатами проведеного багатофакторного експерименту по визначенню впливу елементів режимів різання на величину шорсткості поверхні в умовах моделювання процесу. Результати експериментального дослідження впливу характеру взаємодії головної різальної кромки інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах моделювання довбанням дають можливість судити про те, що ресурс по підвищенню колової подачі черв'ячно-контурної фрези дозволяє досягати як мінімум не меншої якості обробленої поверхні, порівняно з традиційною черв'ячною фрезою.

Результати експериментального дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування показали, що правий і лівий профілі обробленої деталі мають схожі по характеру спотворення евольвентограми. Це досягнуто за рахунок адекватних умов різання по правому і лівому профілю деталі.

В п'ятому розділі представлено концептуальну схему продукційного зубообробного центру для обробки шестерень в умовах гнучкого виробництва

на базі черв'ячно-контурного зубофрезерування. Теоретично обґрунтовано зниження амплітуди коливань за наявності додаткового введення постійної складової до моменту сили різання у вигляді постійного моменту пригальмовування.

Запропоновано і обґрунтовано використання методу диференційованого попереднього прорізання западин. Схема припуску запропонованого методу являється раціональною для наступної обробки з огляду на процес різання та умови експлуатації різального інструменту.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше синтезовано принцип чистового черв'ячного зубофрезерування евольвентних поверхонь в якому, при постійному значенні кінематичної колової подачі, площі перерізів зрізів рівні між собою вздовж верстатної лінії зачеплення як по лівим, так і по правим профілям, а умови формоутворення подібні.

2. Вперше створено процес чистового черв'ячного зубофрезерування евольвентних поверхонь, при якому поверхня різання не співпадає з обумовленою евольвентною поверхнею, а розташована до неї під кутом, рівним, або близьким до 90° .

3. Вперше створено метод моделювання чистового черв'ячного зубофрезерування, при якому реалізовані можливості дослідження взаємодії різальної кромки з поверхнями різання, у тому числі і оброблюваною, при умовах як їх співпадіння так і неспівпадіння.

4. Взаємодія різальної кромки і оброблюваної поверхні була досліджена як одномасова коливальна консервативна система, що дозволило підвищити її порядок рівню астатизму за рахунок зміни характеру (геометрії) взаємодії, що адекватно введенню в систему інтегруючої ланки.

Практична цінність одержаних результатів.

1. Розроблена методика графоаналітичного визначення налагоджувальних розмірів інструментального блоку для попереднього прорізання западин з

метою забезпечення раціональної схеми припуску для чистового зубофрезерування.

2. Запропонована конструкція збірної черв'ячної фрези, яка розроблена з метою економії інструментального матеріалу та зниження собівартості інструменту.

3. Створено комп'ютерні моделі кінематики методів чистового зубофрезерування для визначення геометричних форм одиничних різів та закономірності їх розподілення під час обробки.

4. Запропонована технологія яка має перспективи у виробництві шестерень гідравлічних машин, що працюють в режимі реверсивних гідромоторів і повинні мати однакоvu геометричну форму різнойменних профілів. Технологію передано для впровадження у виробництво та апробовано на АТ «Гідросила», м. Кропивницький.

Ключові слова: черв'ячне зубофрезерування, формоутворення, моделювання процесу, енергоємність, гнучке виробництво.

ABSTRACT

Aparakin A.R. Improving the efficiency of finishing gear hobbing of cylindrical gears by changing the cutting scheme. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation for obtaining a scientific degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in a specialty 05.03.01 "Processes of mechanical treatment, machines and tools". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2021.

The work is concerned with increasing the efficiency of finishing gear hobbing of cylindrical gears of medium modules of 5...14 mm by changing the scheme of interaction of the cutting edge of the tool and the machined surface, and creating preconditions for implementation of gear hobbing technology in flexible production.

The first chapter presents the analysis of modern state of gear hobbing. The analysis of available literature sources on designs of gear hobs, the process of chip formation, machining errors, wear and stability of the tool, cutting modes and cutting force characterize the process of gear hobbing as a very energy-intensive process with difficult conditions for cutting and chip formation which is performed by expensive tools with complex geometry. In turn, all this affects the accuracy of processing and service life of gear hobbing equipment. Also, the analysis of the structure of modern gear hobbing machines was carried out, in particular, the trend of shifting from mechanical dividing circuits and the use of unified modules with direct drive and mechatronic systems. Based on the problems of gear hobbing described in the chapter, there is contradiction between significant progress in creating machine systems and, despite numerous studies in this field, not significant progress in improving the process of gear hobbing in terms of reducing its energy consumption, increasing machine life and tools, and ensure the accuracy of processing.

The second chapter presents the programme and methods of theoretical and experimental research. Theoretical research is carried out in the directions of identification of energy consumption of processes of gear hobbing, the ways to reduce distortions of geometrical form of the processed surface, influence of backlashes on kinematic accuracy of dividing circuits of rotary tables of gear hobbing machines. General requirements to modelling processes which provide adequacy of modelling processes to real processes of gear hobbing with guidance of schemes of cutting in the conditions of slotting by the cutter have been identified. For modelling conditions, methods for determining the influence of tool errors on machining accuracy are considered. Experimental studies are conducted to determine the effect of the cutting scheme on the stress in the surface layer of the treated surface, the influence of the nature of the interaction of the main cutting edge of the tool with the treated surface on accuracy in terms of physical modelling (slotting by the cutter), conditions of modelling, conditions of multifactor experiment, levels of independent variables are described and the matrix of experiment has been resulted. The method of experimental research of formation of involute profile at contour gear hobbing is

presented, the design of the experimental sample of the cutter, input and output parameters of research and the technique of adjustment of the cutter on preliminary processed detail are described.

The third chapter presents the analysis of the system of interaction of the cutting edge and the surface being treated. The chapter has also the analysis of the influence of interaction factors on the accuracy of processing, the quality of the treated surface and the direction and magnitude of cutting forces, including the impact of the latter on the machine. The results of research performed in the simulation conditions allow us to draw conclusions about the influence of tool and machine errors on the accuracy of machining during gear hobbing, the influence of the system of interaction of the cutting edge and the machined surface on the profile deviation and the level of process stability of gear hobbing. To ensure the requirements for the accuracy and quality of the machined surface during gear hobbing, the recommended system of interaction of the cutting edge and the machined surface is different from conventional gear hobbing.

Based on the results of theoretical studies of the process of chip formation (determining the shape of single cuttings) and energy consumption during processing, a forecast is made to reduce energy costs by approximately 2,5 times due to reduction in the cutting force.

A kinematic synthesis of the method of contour gear hobbing on the basis of contour interaction of the cutting edge and the treated surface was performed. To implement the method, a synthesis of the constructive scheme of the contour gear hob was performed.

The fourth chapter presents the results of experimental studies of cutting processes which indicate that the surface treated with the tangential cutting edge of the tool has much worse quality (Ra 3.6 μm and non-straight linearity of 0.062 mm), than the surface treated with the cutting edge of the tool located normally (Ra 1.25 μm and non-straight linearity of 0.03 mm), which is also confirmed by the results of a multifactorial experiment to determine the influence of the elements of the cutting modes on the surface roughness in the process of modelling. The results of the

experimental study of the influence of the nature of interaction of the tool main cutting edge with the treated surface in the conditions of modelling by slotting allow us to conclude that the resource to increase the circular feed of the contour gear hob allows achieving the same quality of the treated surface compared with conventional gear hob.

The results of the experimental study of the processes of contour gear hobbing showed that the right and left profiles of the machined part are similar in the nature of the distortion of the involutogram. This is achieved due to adequate cutting conditions on the right and left profile of the part.

The fifth chapter presents a conceptual design of a production gear treating centre for processing gears in flexible production based on contour gear hobbing. The decrease in the amplitude of oscillations in the presence of additional introduction of a constant component to the moment of cutting force in the form of constant braking moment is theoretically substantiated.

The use of the method of differentiated preliminary gashing is offered and substantiated. The allowance scheme of the proposed method is rational for further processing given the cutting process and operating conditions of the cutting tool.

Scientific novelty of the obtained results.

1. For the first time the principle of finishing gear hobbing of involute surfaces was synthesized in which, at a constant value of kinematic circular feed, the cross-sectional areas of sections are equal along the machine line of engagement on both left and right profiles, and chip formation conditions are similar.

2. For the first time, the process of finishing gear hobbing of involute surfaces was created, in which the cutting surface does not coincide with the conditioned involute surface, but is located to it at the angle equal to or close to 90° .

3. For the first time the method of modelling finishing gear hobbing was created, in which the possibilities of studying the interaction of the cutting edge with the cutting surfaces, including the processed one, under the conditions of both their coincidence and mismatch were realized.

4. The interaction of the cutting edge and the treated surface was studied as a single-mass oscillating conservative system, which increased its order of the level of astatism by changing the nature (geometry) of the interaction, which is adequate to the introduction of the integrating link.

Practical value of the results obtained.

1. The technique of graphoanalytical determination of the adjusting dimensions of the tool block for preliminary gashing for the purpose of maintenance of the rational scheme of the allowance for finishing gear hobbing is developed.

2. The design of a split-type gear hob is proposed. It is designed to save instrumental material and reduce the cost of the tool.

3. Computer models of kinematics of methods of finishing gear hobbing for determination of geometrical forms of single cuts and regularities of their distribution during processing are created.

4. The proposed technology that has prospects in the production of gears of hydraulic machines operating in the mode of reversible hydraulic motors and must have the same geometric shape of different profiles. The technology was transferred into production and tested at JSC "Hydrosila" in Kropyvnytskyi.

Key words: gear hobbing, shaping, process modelling, energy consumption, flexible production.

СПИСОК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові роботи, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Підгаєцький М. М. Підвищення точності зубообробки шляхом розділення поверхонь, що взаємодіють з інструментом в процесі різання / М. М. Підгаєцький, А. М. Кириченко, А. Р. Апаракін // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. – Кіровоград: КНТУ, 2014. – Вип. 27. – с. 13-19.

2. Підгаєцький М. М. Порівняльний аналіз кінематики процесу при традиційному та черв'ячно-контурному чистовому зубофрезеруванні шестерень, що використовуються у сільськогосподарській техніці / М. М. Підгаєцький, А. М. Кириченко, А. Р. Апаракін // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин". – Кіровоград: КНТУ, 2014. – Вип. 44. – с. 149-153.

3. Підгаєцький М.М. Динамічний та кінематичний синтез системи черв'ячно-контурного зубофрезерування / М. М. Підгаєцький, А. Р. Апаракін // Журнал "Науковий вісник НГУ". Серія: Геотехнічна і гірнича механіка, машинобудування. – Дніпро: НГУ, 2017. – №3 с. 54-62 (*SciVerse Scopus, Index Copernicus, Ulrich's Web, Research Bib, EBSCO, категорія «А» Переліку наукових фахових видань України, квартиль Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank*).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

4. Підгаєцький М.М. Підвищення точності зубообробки, шляхом розділення поверхонь, що взаємодіють з інструментом в процесі різання / М.М. Підгаєцький, А.М. Кириченко, А.Р. Апаракін // Матеріали III міжнародної

науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій". – 2014. – с. 129-130.

5. Апаракін А.Р. Передумови створення методу диференційованого попереднього прорізання западин зубчастих коліс / Апаракін А.Р., Підгаєцький М.М. // Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем". – Том 1. – 2017. – с. 104-105.

6. Підгаєцький М.М. Синтез концептуальної схеми зубообробного центру для обробки шестерень в умовах гнучкої технології на базі черв'ячно-контурного зубофрезерування / М.М. Підгаєцький, А.Р. Апаракін // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції "Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво". – 2017. – с.144-146.

7. Апаракін А.Р. Порівняння процесів стружкоутворення черв'ячного та черв'ячно-контурного зубофрезерування за допомогою комп'ютерної моделі кінематики / Апаракін А.Р., Підгаєцький М.М. // Матеріали X міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем". – Том 1. – 2020. – с. 123-125.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

8. Пат. 84471 Україна, МПК В23F 19/00. Спосіб лезової обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс після попереднього прорізання впадин. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2013 04277; заявл. 05.04.2013; опубл. 25.10.2013. Бюл. №20.

9. Пат. 102901 Україна, МПК В23F 21/16, В24В 5/36. Збірна чистова черв'ячна фреза. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2015 04926; заявл. 20.05.2015; опубл. 25.11.2015. Бюл. №22.

10. Пат. 110741 Україна, МПК В23F 21/14, В23F 21/16, В23F 5/22. Спосіб фрезерування зубців циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2014 07893; заявл. 14.07.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. №3.

11. Пат. 140800 Україна, МПК В23F 21/00, В24F 21/16. Черв'ячно-контурна фреза зі змінними ріжучими пластинами. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р.; заявник і патентотримач Центральноукраїнський національний технічний університет. Заявка № u 2019 08898; заявл. 23.07.2019; опубл. 10.03.2020. Бюл. №5.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРОБЛЕМ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ	22
1.1 Аналіз та класифікація традиційних черв'ячних фрез	22
1.2 Аналіз процесів черв'ячного зубофрезерування	36
1.3 Аналіз верстатів, що використовуються для черв'ячного зубофрезерування	43
1.4 Висновки, мета і задачі дослідження	46
РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ	48
2.1 Програма теоретичних досліджень	48
2.2 Методика теоретичних досліджень процесів зубофрезерування	49
2.3 Програма експериментальних досліджень	81
2.4 Методика експериментальних досліджень	82
2.5 Висновки по розділу	96
2.6 Рекомендації	97
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ	98
3.1 Визначення можливих варіантів системи взаємодії різальної кромки і поверхні, що оброблюється	98
3.2 Аналіз взаємодії різальної кромки та оброблюваної евольвентної поверхні при черв'ячному зубофрезеруванні	101
3.3 Теоретичні дослідження процесів різання, які притаманні зубофрезеруванню, в умовах моделювання	109
3.4 Теоретичні дослідження процесів традиційного черв'ячного чистового зубофрезерування	117
3.5 Кінематичний синтез та реалізація схеми черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі контурної взаємодії різальної кромки та оброблюваної поверхні	130

3.6	Теоретичні дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування	134
3.7	Висновки по розділу	143
3.8	Рекомендації	145
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ		146
4.1	Результати експериментальних досліджень процесів різання	146
4.2	Результати експериментальних досліджень процесів різання, які притаманні зубофрезеруванню, в умовах моделювання	148
4.3	Результати експериментальних досліджень процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування	154
4.4	Висновки по розділу	156
4.5	Рекомендації	157
РОЗДІЛ 5 КОНЦЕПЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗУБООБРОБКИ ДЛЯ УМОВ ГНУЧКОГО ВИРОБНИЦТВА		158
5.1	Загальні положення	158
5.2	Синтез концептуальної схеми продукційного зубообробного центру для реалізації технології зубообробки в умовах гнучкого виробництва на базі черв'ячно-контурного зубофрезерування	159
5.3	Синтез методу диференційованого попереднього прорізання западин	172
5.4	Синтез конструктивної схеми черв'ячної фрези для черв'ячно-контурного зубофрезерування	180
5.5	Висновки по розділу	185
5.6	Рекомендації	186
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ		187
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		189
ДОДАТКИ		203

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

ПР - поверхня різання;

ОП - оброблювана поверхня;

ДПР - дотична поверхня різання;

НПР - нормальна поверхня різання;

РК - різальна кромка;

ГРК - головна різальна кромка;

ВСТУП

Актуальність теми. Традиційне черв'ячне зубофрезерування має обмежені резерви підвищення ефективності, які визначаються межами швидкостей різання і подач, зносостійкістю інструмента та якістю обробки. Подальше підвищення ефективності обробки можливе за рахунок зміни кінематики різання та використання нових, раціональних схем різання з кінематичним перерозподілом зрізів.

Велика кількість відомих досліджень традиційного черв'ячного зубофрезерування стосується процесів зносу, в тому числі підвищенню стійкості фрези за рахунок надтвердих покриттів, та вивчення ефекту від використання порошкових інструментальних матеріалів. Останніми тенденціями у дослідженнях є використання комп'ютерного моделювання для вивчення вузькоспеціальних аспектів методу. Всі вищезгадані дослідження мають за мету вдосконалення або нейтралізацію недоліків вже існуючої схеми традиційного черв'ячного зубофрезерування. Відсутні спроби кардинально змінити схему формоутворення, геометрію взаємодії різальної кромки інструменту та поверхні, що оброблюється.

За останні 60 років технологія формоутворення евольвентних поверхонь, тобто сам процес різання, мало змінилася. Прогрес в цій галузі торкнувся здебільшого матеріалів різальної частини, конструктивного виконання фрез та верстатів, за рахунок системи ЧПУ та прямого приводу.

Відомі методи черв'ячного зубофрезерування є досить енергоємними і витратними, що обумовлено наявністю значних сил різання, і не відповідають вимогам, які пред'являються до сучасних, енергозберігаючих технологій. У роботі зроблена спроба створення технології зубофрезерування на принципово інших положеннях.

Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувались згідно держбюджетної науково-дослідної програми Центральноукраїнського національного технічного

університету за темою "Теоретичне та експериментальне дослідження черв'ячно-контурного зубофрезерування зубців шестерень гідравлічних машин" (номер державної реєстрації №0116U001974).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем середніх модулів 5...14 мм та створення передумов для виникнення технології зубофрезерування для умов гнучкого виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Визначити схему взаємодії РК інструменту та ОП при формоутворенні евольвентного профілю, яка позбавлена недоліків схеми традиційного черв'ячного зубофрезерування, та дослідити вплив її на точність і якість ОП.

2. Синтезувати процес черв'ячно-контурного зубофрезерування на основі зміни взаємодії РК інструменту та ОП з подальшим дослідженням впливу зміни взаємодії на оціночні показники процесу.

3. Розробити методику та провести порівняльний аналіз формоутворення та енергоємності процесів зубофрезерування в умовах комп'ютерного моделювання.

4. Провести експериментальні дослідження досяжної точності та якості обробленої поверхні, отриманої способом черв'ячно-контурного зубофрезерування.

5. Розробити концепцію технології зубообробки для умов гнучкого виробництва на базі синтезованого способу черв'ячно-контурного зубофрезерування та верстату типу обробний центр.

Об'єкт дослідження це черв'ячні фрези для чистового зубофрезерування.

Предмет дослідження це процес формоутворення та вплив його характеристик на енергоємність процесу зубофрезерування, в залежності від прийнятої схеми різання (взаємодії різальної кромки інструменту та оброблюваної поверхні).

Методи дослідження. При проведенні досліджень використовувалися методи абстрагування, аналіз і синтез, властивості системи взаємодії різальної

кромки та оброблюваної поверхні досліджуються завдяки побудованим моделям, та в умовах комп'ютерного моделювання, експериментальні дослідження проведені з використанням виготовленого прототипу черв'ячно-контурної фрези, керуючись математичним плануванням експерименту. Всі дослідження ґрунтувались на положеннях теорії різання металів, теорії опору матеріалів, теорії проектування різального інструменту, верстатобудування, теорії автоматичного управління процесів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше синтезовано принцип чистового черв'ячного зубофрезерування евольвентних поверхонь в якому, при постійному значенні кінематичної колової подачі, площі перерізів зрізів рівні між собою вздовж верстатної лінії зачеплення як по лівим, так і по правим профілям, а умови формоутворення подібні.

2. Вперше створено процес чистового черв'ячного зубофрезерування евольвентних поверхонь, при якому поверхня різання не співпадає з обумовленою евольвентною поверхнею, а розташована до неї під кутом, рівним, або близьким до 90° .

3. Вперше створено метод моделювання чистового черв'ячного зубофрезерування, при якому реалізовані можливості дослідження взаємодії різальної кромки з поверхнями різання, у тому числі і оброблюваною, при умовах як їх співпадіння так і неспівпадіння.

4. Взаємодія різальної кромки і оброблюваної поверхні була досліджена як одномасова коливальна консервативна система, що дозволило підвищити її порядок рівню астатизму за рахунок зміни характеру (геометрії) взаємодії, що адекватно введенню в систему інтегруючої ланки.

Практична цінність одержаних результатів.

1. Розроблена методика графоаналітичного визначення налагоджувальних розмірів інструментального блоку для попереднього прорізання западин з метою забезпечення раціональної схеми припуску для чистового зубофрезерування.

2. Запропонована конструкція збірної черв'ячної фрези, яка розроблена з метою економії інструментального матеріалу та зниження собівартості інструменту.

3. Створено комп'ютерні моделі кінематики методів чистового зубофрезерування для визначення геометричних форм одиничних різів та закономірності їх розподілення під час обробки.

4. Запропонована технологія, яка має перспективи у виробництві шестерень гідравлічних машин, що працюють в режимі реверсивних гідромоторів і повинні мати однакоvu геометричну форму різнойменних профілів.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, практичні та експериментальні результати досліджень, що містяться у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належать ряд наукових результатів та положень, зокрема: [74] - розробка методики та проведення дослідження в умовах графічного комп'ютерного моделювання, обробка та аналіз результатів дослідження; [75] - проведено аналіз виникнення складного напруженого стану на оброблених евольвентних поверхнях, розробка програми та методики експерименту, проведення експерименту, обробка та аналіз результатів експерименту; [76] - проаналізовано схему впливу сили різання, що діє на привод верстата при обробці способом черв'ячно-контурного зубофрезерування, зроблено висновки про стан силового замикання черв'ячної пари привода шпінделя виробу верстата.

Апробація роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на III Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій" (м. Тернопіль, 19-20 листопада 2014 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем" (м. Чернігів, 24-27 квітня 2017 р.); XVII Міжнародній науково-практичній конференції "Машинобудування очима молодих:

прогресивні ідеї – наука – виробництво" (м. Чернігів, 01-03 листопада 2017 р);
X Міжнародній науково-практичній конференції "Комплексне забезпечення
якості технологічних процесів та систем" (м. Чернігів, 29-30 квітня 2020 р.);
науково-технічних конференціях викладачів, аспірантів та співробітників
Центральноукраїнського національного технічного університету
(м. Кропивницький, 2014 – 2020 рр.).

Публікації за матеріалами дисертації. За темою дисертації
опубліковано 11 праць, з них 3 друковані праці у фахових наукових виданнях
України, матеріали 4-х доповідей на наукових конференціях та 4 патенти.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу,
п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 140
найменувань на 14 сторінках та 15 додатків на 60 сторінках. Основний текст
дисертації викладений на 150 сторінках (не включаючи 25 сторінок таблиць та
рисуноків, які повністю займають площу сторінки), повний обсяг дисертації
становить 262 сторінки, включаючи 99 рисуноків та 38 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПРОБЛЕМ

ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

1.1 Аналіз та класифікація традиційних черв'ячних фрез

Сучасні традиційні черв'ячні фрези мають відносно одноманітну конструкцію, яка відповідає їх функційному призначенню, а саме – обробці зубчастих коліс в умовах обкату на зубофрезерних верстатах. Таке виконання інструменту є наслідком ряду недоліків під час експлуатації, зокрема:

- контакт задніх поверхонь бічних різальних кромки (РК) з оброблюваною поверхнею (ОП) внаслідок низьких значень задніх кутів;
- невірне стружкоутворення;
- пряме перенесення похибок виготовлення, переточок, установок на ОП.

З метою визначення шляхів покращення процесу зубофрезерування розглядається нинішній стан традиційної технології черв'ячного зубофрезерування.


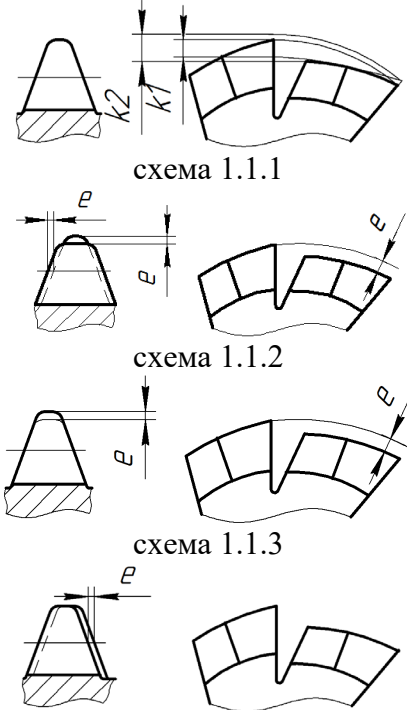

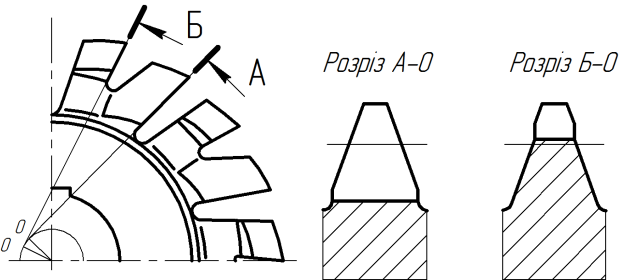
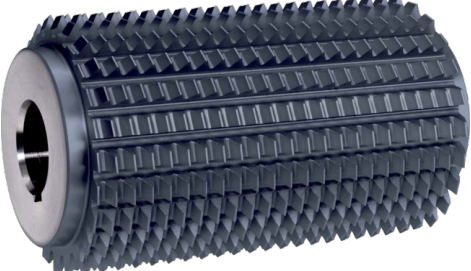
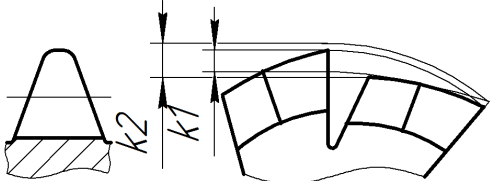
1.1.1 Класифікація конструктивних виконань традиційних черв'ячних фрез

Черв'ячна фреза це єдиний інструмент, що містить в собі елементи кінематичної пари які ув'язані з елементами різального інструменту.

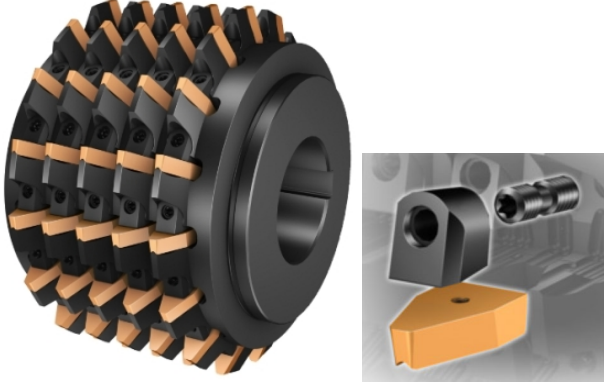
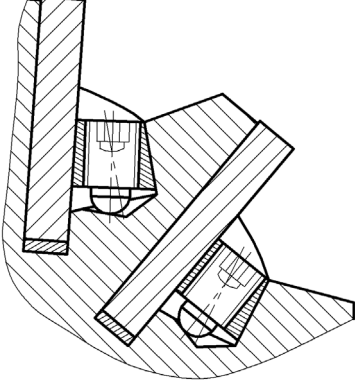
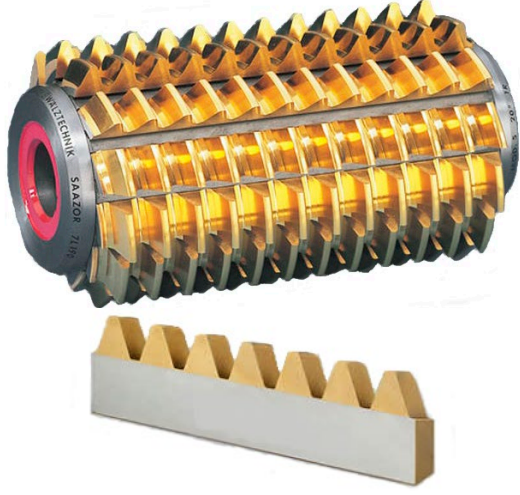
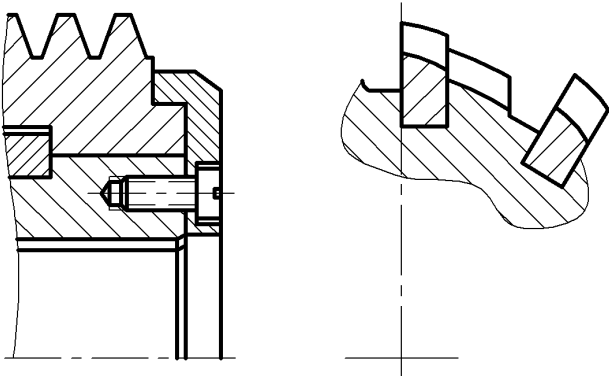

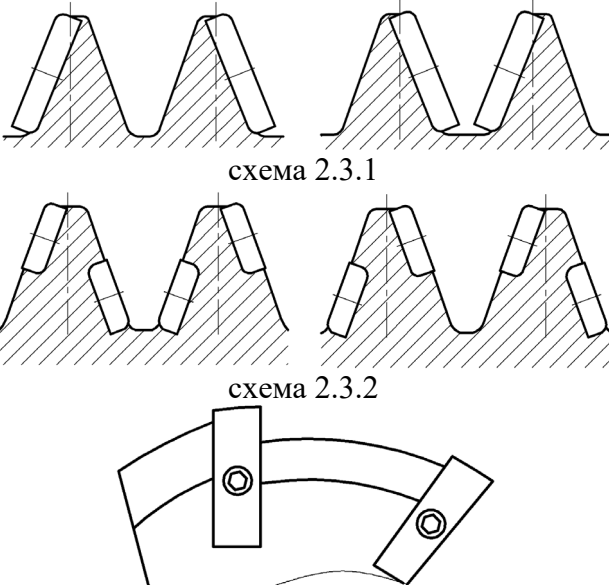
Традиційні черв'ячні фрези представлені у вигляді суцільнометалевої та декількох видів збірних конструкцій. Конструктивно черв'ячна фреза виконана у вигляді циліндричного тіла, на зовнішній поверхні якого розміщена гвинтова поверхня з трапецеїдальними прорізами в перерізі. Гвинтова поверхня, пересічена стружковими канавками, утворює різальні зубці. Для утворення задніх кутів на різальних кромках зубців, виконують затилування по вершинній і бічним різальним кромкам, або гостро заточують.

Класифікація традиційних черв'ячних фрез представлена у табл. 1.1.

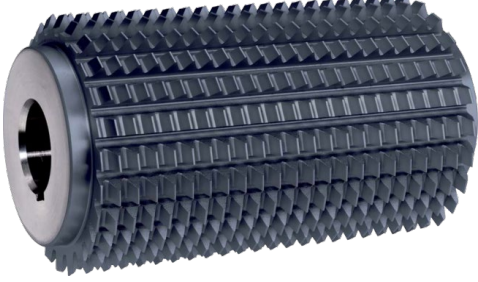
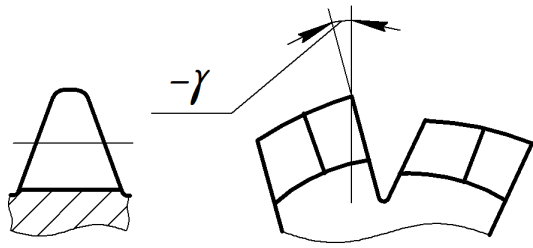

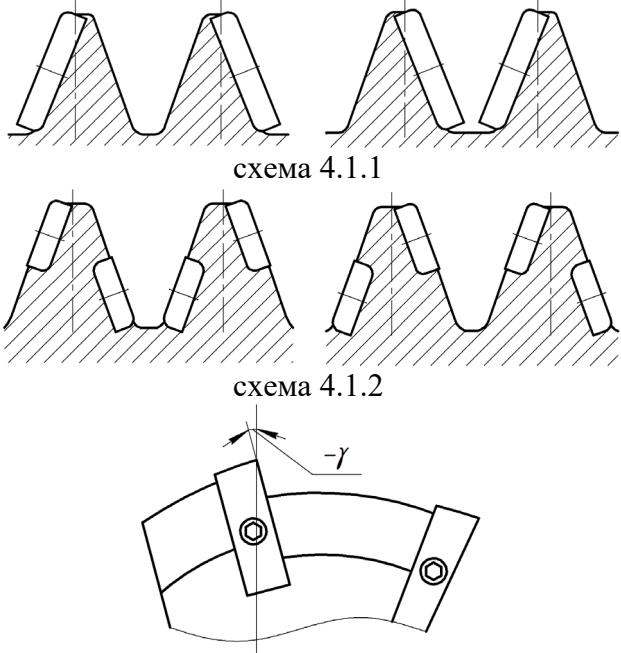

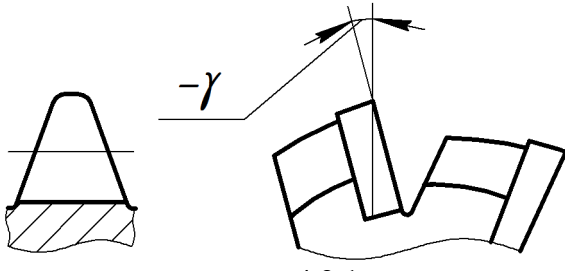
Таблиця 1.1

Натурне зображення	Конструктивна схема різальної частини
1	2
1 Суцільнометалеві традиційні черв'ячні модульні фрези	
1.1 Для обробки зубчастих коліс твердістю HB 200...250	
 <p data-bbox="379 1043 622 1079">[48, 80, 110, 121]</p>	 <p data-bbox="1082 524 1235 560">схема 1.1.1</p> <p data-bbox="1082 712 1235 748">схема 1.1.2</p> <p data-bbox="1082 900 1235 936">схема 1.1.3</p> <p data-bbox="1082 1079 1235 1115">схема 1.1.4</p>
1.2 З поділимим профілем, для попередньої обробки зубчастих коліс твердістю HB 200...250	
 <p data-bbox="322 1653 683 1688">[5, 22, 63, 64, 77, 110, 121]</p>	 <p data-bbox="1082 1550 1235 1585">схема 1.2.1</p>
1.3 Для обробки зубчастих коліс твердістю HB 200...300	
 <p data-bbox="402 2011 603 2047">[110, 121, 127]</p>	 <p data-bbox="1082 1966 1235 2002">схема 1.3.1</p>

Продовження табл. 1.1

1	2
2 Збірні черв'ячні фрези	
2.1 Зі вставними зубцями, для попередньої обробки зубчастих колі твердістю HB 200...300	
 <p data-bbox="347 719 667 757">[50, 51, 57, 71, 80, 128]</p>	 <p data-bbox="1082 719 1241 757">схема 2.1.1</p>
2.2 Зі вставними рейками, для попередньої обробки зубчастих колі твердістю HB 200...300	
 <p data-bbox="252 1294 751 1328">[31, 57, 62, 67, 68, 69, 70, 80, 87, 127]</p>	 <p data-bbox="1082 1234 1241 1267">схема 2.2.1</p>
2.3 З вставними сегментами, які оснащені універсальними різальними елементами, для попередньої обробки зубчастих колі твердістю HB 200...300	
 <p data-bbox="368 1944 635 1977">[5, 31, 65, 110, 121]</p>	 <p data-bbox="1082 1563 1241 1597">схема 2.3.1</p> <p data-bbox="1082 1787 1241 1821">схема 2.3.2</p>

Продовження табл. 1.1

1	2
3 Суцільнометалеві черв'ячні фрези для обробки по технології «Skiving»	
3.1 Для обробки зубчастих коліс твердістю HRC 55...62	
 <p data-bbox="351 616 654 649">[31, 66, 110, 121, 127]</p>	 <p data-bbox="1077 593 1236 627">схема 3.1.1</p>
4 Збірні черв'ячні фрези для обробки по технології «Skiving»	
4.1 З вставними сегментами, які оснащені універсальними різальними елементами, для обробки зубчастих коліс твердістю HRC 55...62	
 <p data-bbox="367 1355 638 1388">[5, 31, 65, 110, 121]</p>	 <p data-bbox="1077 918 1236 952">схема 4.1.1</p> <p data-bbox="1077 1131 1236 1164">схема 4.1.2</p> <p data-bbox="1077 1209 1204 1243">-γ</p>
4.2 З напайними твердосплавними різальними елементами, для обробки зубчастих коліс твердістю HRC 55...62	
 <p data-bbox="399 1948 606 1982">[5, 31, 87, 121]</p>	 <p data-bbox="1077 1870 1236 1904">схема 4.2.1</p>

Порівняльні показники схем по табл. 1.1 зведено до табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Схема (згідно табл. 1.1)	Суттєві порівняльні показники							
	Геометрія різальної частини			Схема різання	Форма задньої грані	Матеріал різальної частини	Оброблюваний матеріал	Точність обробки по DIN 3962
	γ	α_b	α_6					
1.1.1	0°	10...12°	2...4°	Профільна	Затилована	Швидкорізальні сталі	Сталь НВ 200	Попередня обробка: 9...10 кв.; кінцева обробка: 8...9 кв.
1.1.2				Прогресивна				Попередня обробка: 9...10 кв.
1.1.3				Вершинно навантажена				
1.1.4				З поперемінно навантаженими РК				
1.2.1				З поділим профілем початкового контур				
1.3.1				10...12°				2...4°
2.1.1	З поперемінно навантаженими РК							
2.2.1								
2.3.1								
2.3.2		З поперемінно навантаженими РК та поділим профілем						
3.1.1	-15...-30°	10...12°	2...4°		Профільна	Затилована	Сталь HRC 55...62	
4.1.1				З поперемінно навантаженими РК	Гострозаточена			
4.1.2				З поперемінно навантаженими РК та поділим профілем				
4.2.1				Профільна	Затилована			

Як видно з табл. 1.1, збірні черв'ячні фрези мають складну конструкцію та форму. Численні спроби створення збірної конструкції черв'ячної фрези

призвели до того, що на теперішній час існує декілька видів типових конструкцій, представлених різними виробниками. Всі вони вимагають точного виготовлення корпусу фрези, мають значну кількість конструктивних елементів та рекомендуються для використання в умовах чорнової обробки.

Впровадження раціональних схем різання на базі фрез традиційної конструкції в свою чергу призводить до ускладнення геометрії різальної частини зубців і, як наслідок, викликає складності при виготовленні і експлуатації [58, 78, 79].

Також, слід відзначити черв'ячні фрези для обробки по технології «Skiving». Конструктивною особливістю таких фрез являється виконання передніх поверхонь зубців під великим від'ємним кутом $\gamma = -15^\circ \dots -30^\circ$. Подібне виконання передньої поверхні сприяє досягненню значних кутів нахилу різальних кромки λ , що значно впливає на форму стружки, напрямок її сходження, величину та напрямок дії сили різання. Найбільше розповсюдження отримали для чистової обробки загартованих заготовок зубчастих коліс.

1.1.2 Аналіз геометрії різальної частини традиційних черв'ячних фрез

Конструктивні розміри, геометрична точність робочих поверхонь, шорсткість і матеріал фрези регламентуються стандартами [93], [108] та [126, 131, 138] в залежності від класу точності інструменту. На рис. 1.1 представлено конструктивне виконання черв'ячної фрези з зазначенням ключових розмірів.

Геометрія різальної частини має ряд недоліків, що негативно впливають на процес зубофрезерування, зокрема:

- низьке значення задніх кутів по бічним кромкам $\alpha_b = 2 \dots 4^\circ$, що являється причиною тертя задньої поверхні інструмента по поверхні заготовки;
- необхідність у подвійному затилуванні [84] κ_1 та κ_2 накладає обмеження на кількість стружкових канавок, тобто на коловий крок фрези (шліфувати зуб по всій ширині неможливо, так як буде зрізана різальна кромка суміжного зубця).

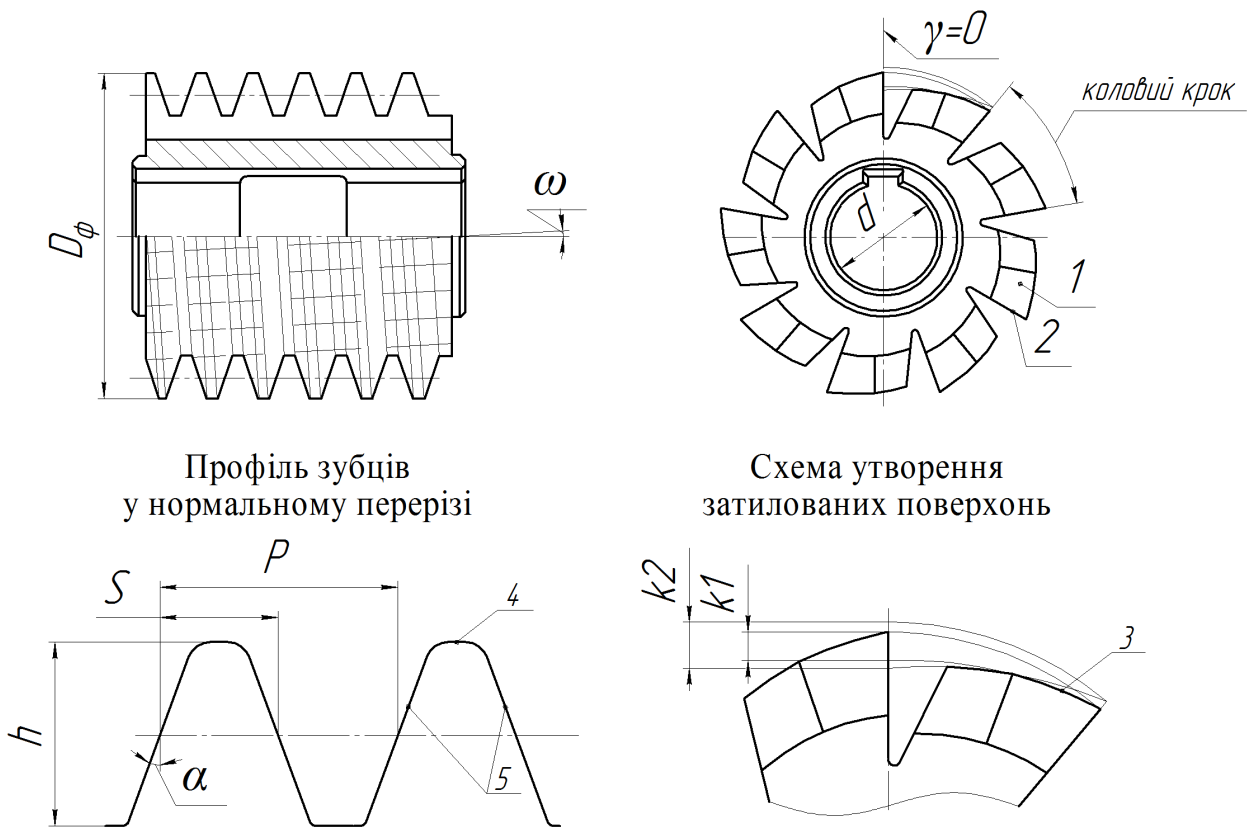


Рис. 1.1 Конструктивне виконання черв'ячної фрези

1 - поверхня задньої грані бічної різальної кромки; 2 - поверхня передньої грані; 3 - поверхня задньої грані вершинної різальної кромки; 4 - вершинна різальна кромка; 5 - бічні різальні кромки; D_ϕ - зовнішній діаметр фрези; ω - кут підйому гвинтової лінії; γ - передній кут; d - діаметр посадочного отвору; α - кут профілю вихідного контуру; $k1$ - величина затилування шліфованої частини зуба фрези; $k2$ - величина затилування не шліфованої частини зуба фрези; h - висота зуба фрези; S - ширина профілю зуба фрези на початковому циліндрі; P - осьовий крок.

1.1.3 Аналіз процесів стружкоутворення традиційних черв'ячних фрез

Дослідження процесів стружкоутворення традиційних черв'ячних фрез передбачає знання перетинів зрізів, що знімаються окремими зубцями фрези. У роботі [130, 134], проведеної в Аахенському вищому технічному училищі, основою дослідження стало визначення товщини зрізів, що знімаються окремими зубцями.

На рис. 1.2 знизу приведені отримані результати вимірювань сили різання для кожного активного зубця фрези, а вгорі відповідні товщини зрізів.

Як видно з рис. 1.2, головна сила різання і перетини зрізу при черв'ячному зубофрезеруванні різні для кожного окремого зуба фрези. Цим черв'ячне

зубофрезерування істотно відрізняється від інших видів обробки різанням, у яких збільшення подачі безпосередньо тягне за собою відповідну зміну товщини зрізу. Для отримання цих даних проведено досліди по нарізанню коліс з тільки однією западиною, що і дозволило встановити відповідність між виміряною для кожного зубця силою різання і розрахунковим перетином зрізу. Наведені на рис. 1.2 перетини зрізів розподіляються відповідно по трьом різальним кромкам зубця фрези - вершинній і двома бічним. На рисунку видно, що в зоні попереднього прорізання западини на частину вершинної кромки припадають значно більші перетини зрізів, ніж на частину бічних. Встановлення залежності між силою різання і перетином зрізу дозволяє більш точно встановити види зносу та їх причини.

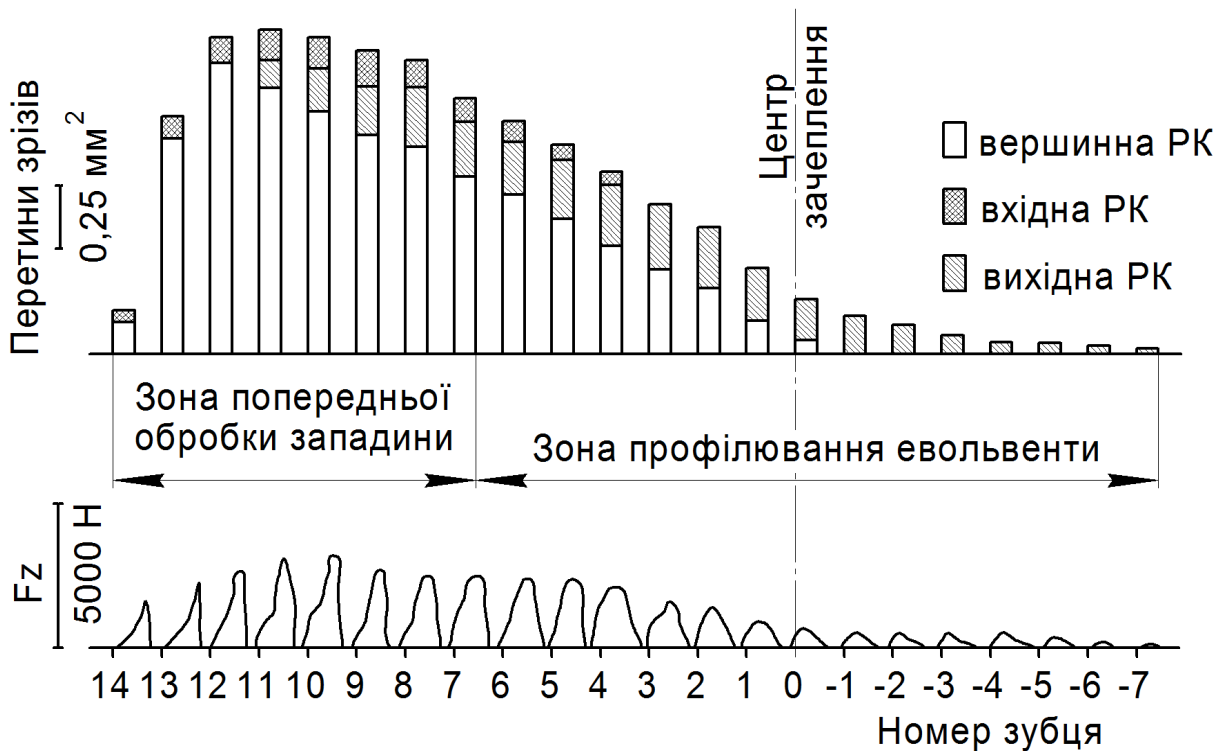


Рис. 1.2 Перетини зрізів, що знімаються кожним окремим зубцем фрези і відповідні їм сили різання

Вплив осьової подачі на товщини зрізів, які знімаються окремими різальними кромками зубця фрези показано на рис. 1.3. Як видно, товщини зрізів лінійно зростають від полюса зачеплення в напрямку вхідної сторони фрези. Вони приблизно рівні для всіх осьових подач і характеризуються

помітними відхиленнями від лінійного зростання тільки для різальних кромок, які вступають в роботу першими.

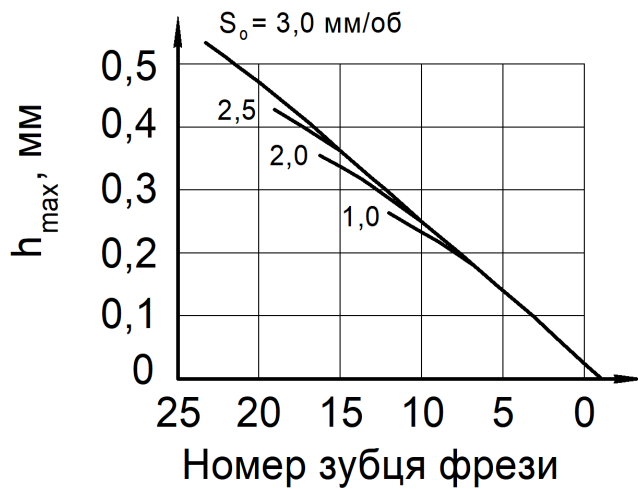


Рис. 1.3 Вплив осевої подачі на товщини зрізів

h_{max} - максимальна товщина зрізу;
 S_o - величини подач.

Наведений графік також підтверджує, що при зубофрезеруванні окремі різальні кромки черв'ячної фрези навантажені неоднаково.

Інше відоме дослідження [107] представляє процес різання при зубофрезеруванні схематично, як показано на рис. 1.4, а.

У дослідженні зазначено, що через складну кінематику процесу зубофрезерування, виникають

проблеми моделювання процесу, тому що кожна впадина шестерні утворюється шляхом послідовного проникнення інструменту зубцями у заготовку в окремих твірних положеннях. Враховуючи обертання інструменту під час кожного проникнення зубця фрези у впадину шестерні, було введено ряд позицій повороту, як поняття для описання поперечного перерізу стружки, як пояснено далі. Параметри, що значно впливають на знос інструменту – формування стружки і її потік.

У правій частині рис. 1.4, вказані фотографії стружок та поверхні заготовки, утворені в зазначених твірних положеннях. За допомогою комп'ютерної програми, геометрія недеформованого зрізаємого шару обчислюється в різних положеннях повороту і твірних положеннях під час утворення впадини шестерні. Принцип роботи цієї програми оснований на математичному описі проникнення інструменту у впадину шестерні. Недеформовані поперечні перерізи зрізаємого шару на кожній різальній кромці представлені в послідовних позиціях обертання інструменту у кожному твірному положенні на рис. 1.4, б.

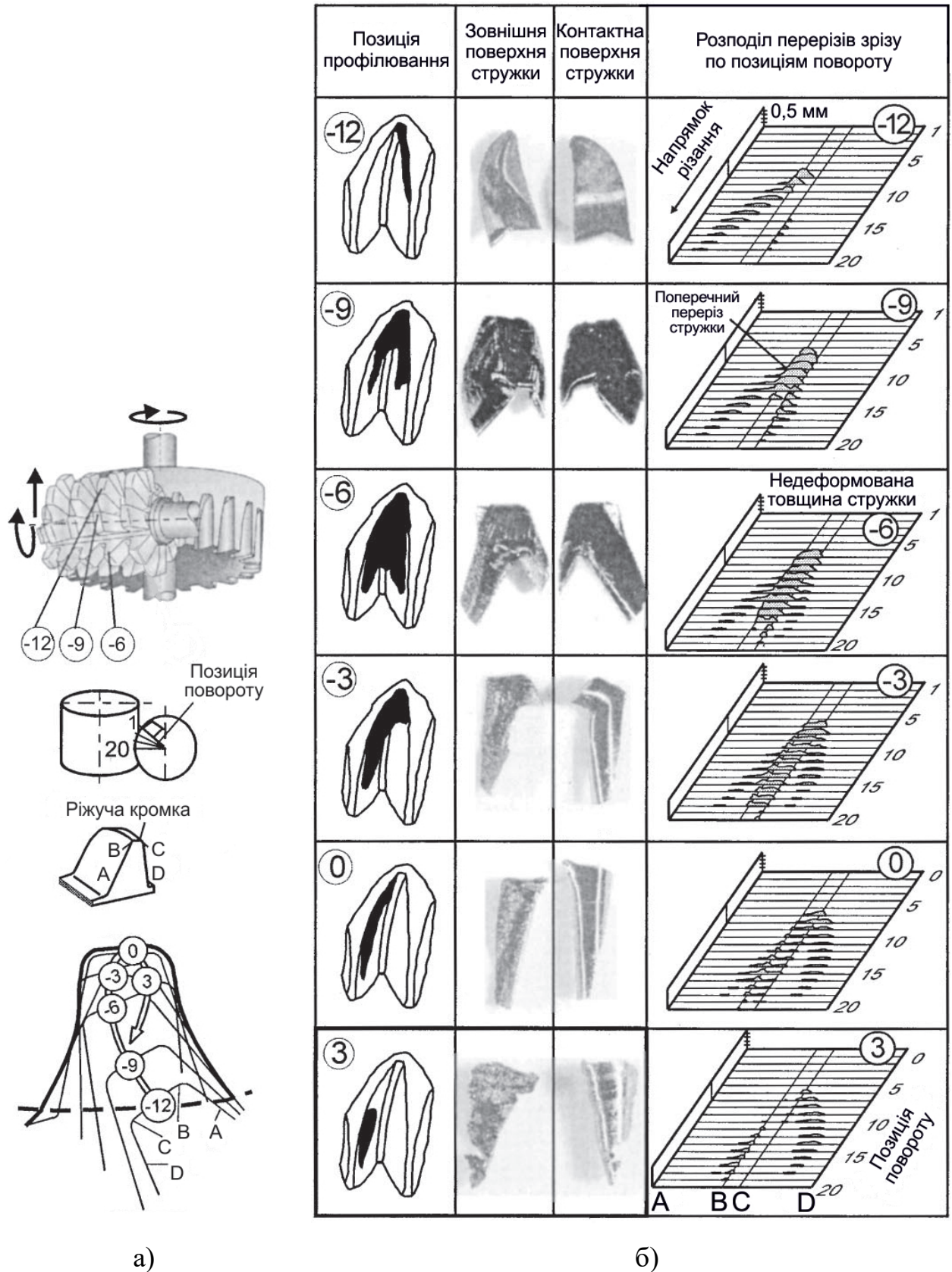


Рис. 1.4 Формоутворення і типові стружки на різних твірних позиціях інструменту при зубофрезеруванні, а також відповідні аналітично визначенні поперечні перерізи зрізаємого шару

Якщо інструмент ріже в перехідній зоні, зоні врізання або на виході, стружкоутворення відрізняється від зони повного різку, рис. 1.5 [107].

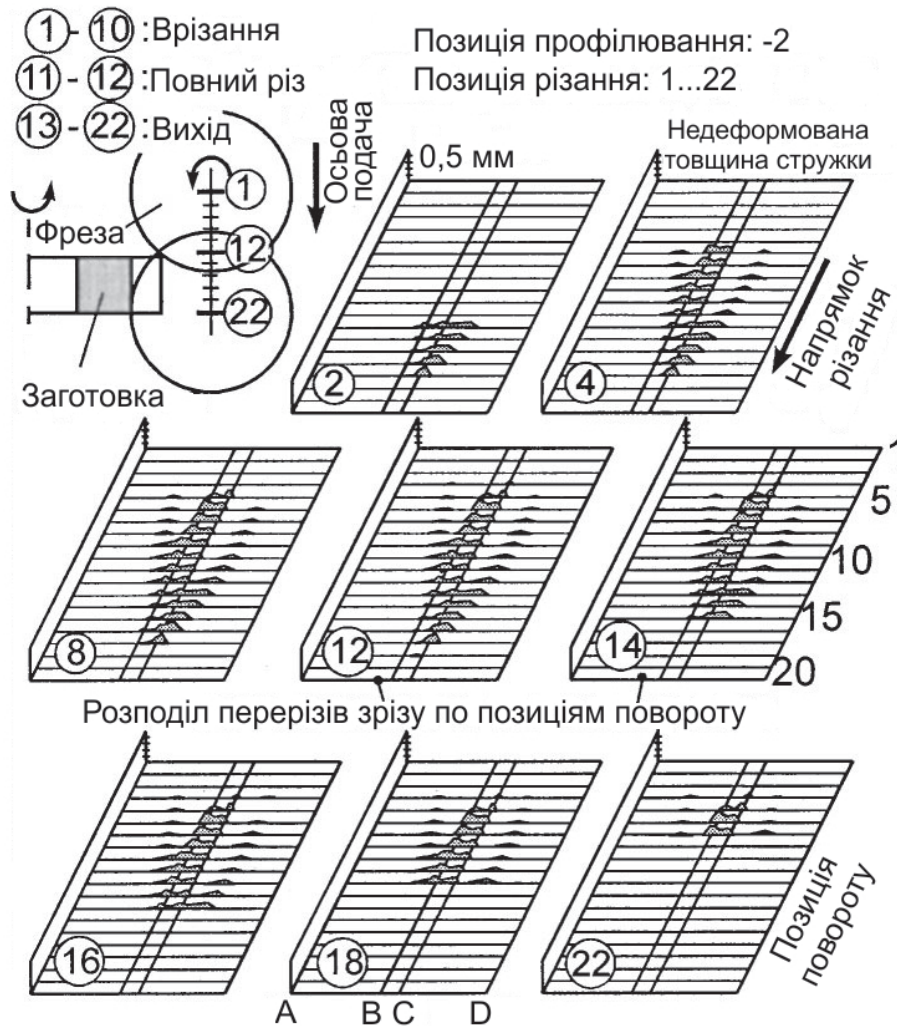


Рис. 1.5 Поперечні перерізи недеформованого зрісаємого шару в зоні врізання, при повному різі і виході інструмента, та в перехідних позиціям різання

Геометрія недеформованого зрісаємого шару, враховуючи напрямок різання, являє собою передню або задню частину геометрії стружки повного різку. У 11-му і 12-му твірних положеннях, що розглядаються для даного випадку, зустрічаються стружки з такою ж геометрією за оберт інструменту та з максимальними габаритними розмірами (стружки повного різку), тоді як в інших позиціям різання формуються тільки частини стружки повного зрізу. Довжина стружки в послідовних положеннях входу різальної кромки зростає, в той час як у зоні виходу аналогічних положень різання, довжина стружки постійно зменшується.

1.1.4 Аналіз похибок зубофрезерування, пов'язаних з конструктивним виконанням черв'ячних фрез

Отримання зубчастих коліс необхідної точності та якості при черв'ячному зубофрезеруванні – складна технологічна задача, рішення якої залежить від багатьох факторів, але найбільший вплив здійснюють:

- верстат що використовується, його технологічні можливості і динамічні характеристики;
- інструмент, точність його виготовлення та установки.

Систематичні похибки зубофрезерування від неточності виготовлення черв'ячної фрези наведені на рис. 1.6 та рис. 1.7 [133].



Рис. 1.6 Вплив відхилення вісєвого кроку фрези на оброблюваний профіль

1 – теоретичний профіль зубця; 2 – профіль, що отримується при малому коловому кроці;
3 - профіль, що отримується при великому коловому кроці.

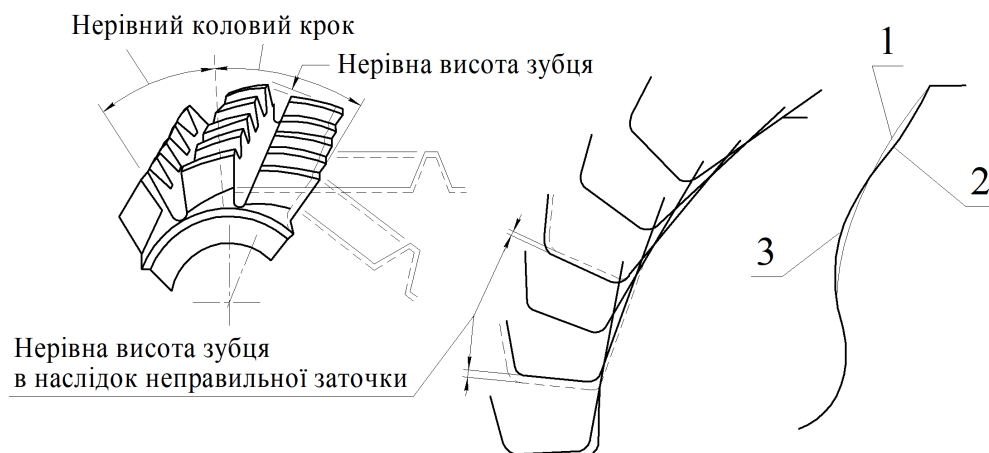


Рис. 1.7 Вплив накопиченої похибки колового кроку фрези на профіль

1 – теоретичний профіль зубця; 2 – профіль, що отримується при малому коловому кроці;
3 - профіль, що отримується при великому коловому кроці.

Обробці зубчастих коліс черв'ячними фрезами характерні також систематичні похибки від неточності заточування фрези, як показано на рис. 1.8 [3].

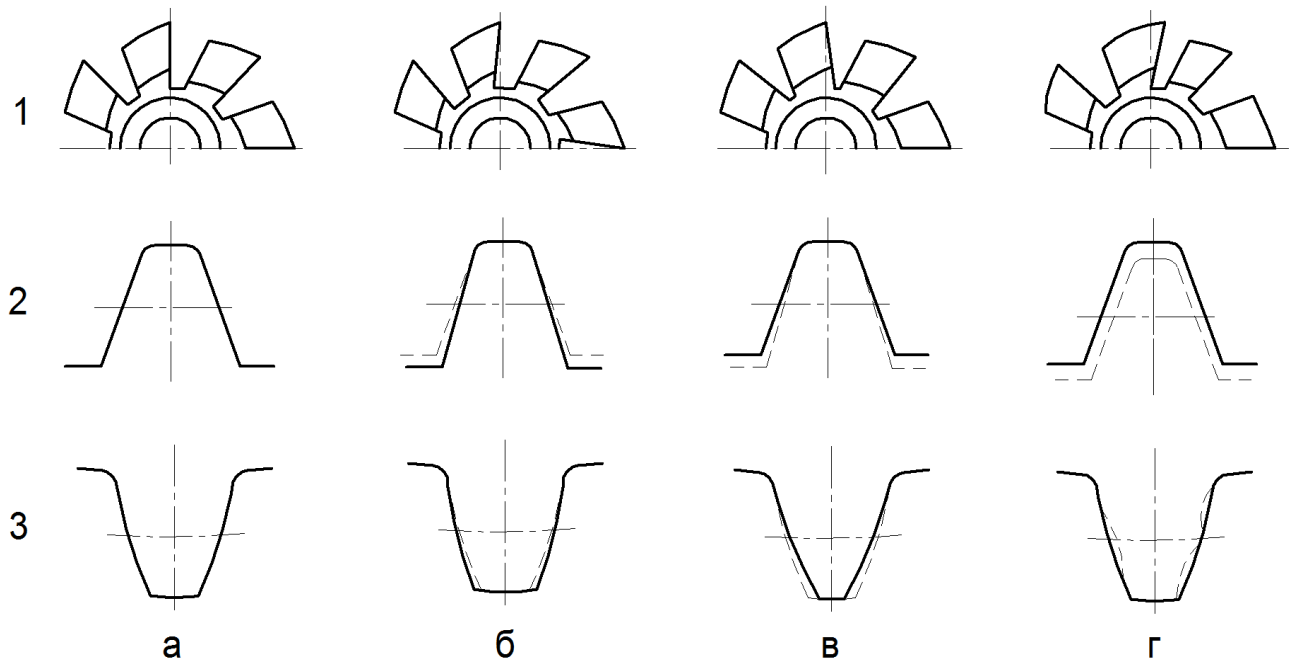


Рис. 1.8 Схеми впливу розташування передньої поверхні зубців фрези на оброблюваний профіль

1 - форма заточки передньої поверхні фрези; 2 - профіль зубців фрези;

3 - профіль зубців оброблюваного колеса;

а - правильна заточка (передня поверхня фрези розташована в радіальній площині);
б, в, г - неправильна заточка (передня поверхня фрези відхилена від радіальної площини).

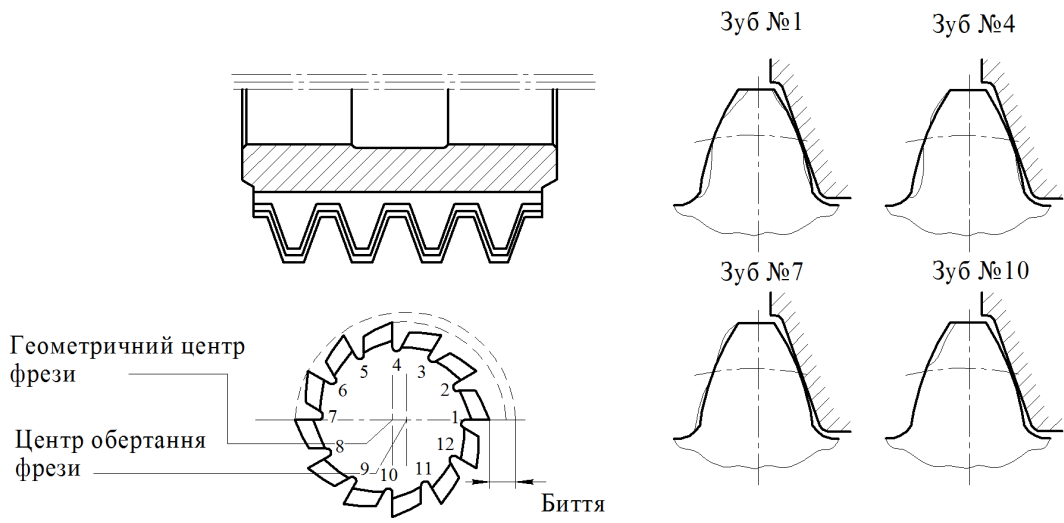
Точність установки фрези на інструментальній оправці також має свій вплив, рис. 1.9 [34, 133].

Переточка фрез відбувається по переднім граням. Після здійснення переточки, вона повинна перевірятися за наступними параметрами:

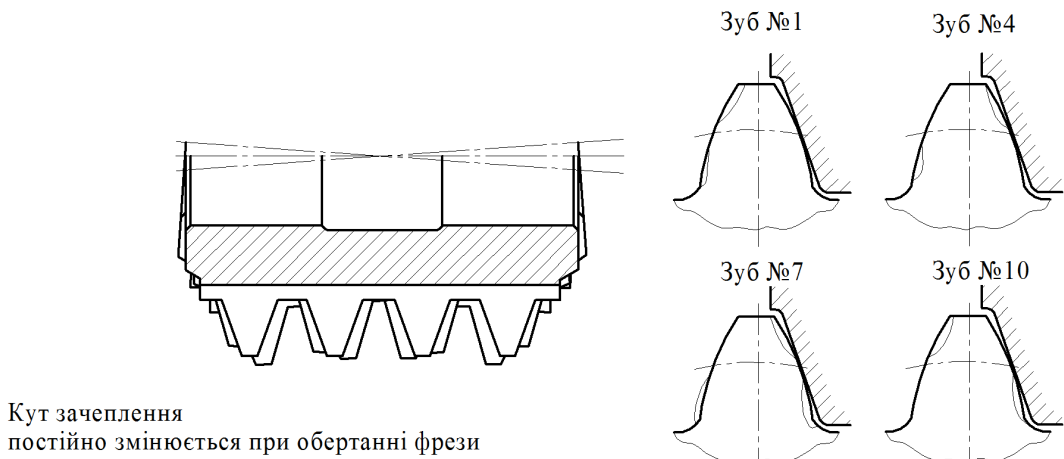
- прямолінійність передньої грані (в радіальному напрямку);
- відхилення гвинтової поверхні від її теоретичного положення;
- нерівномірність (коливання в межах окружності) окружного кроку зубців фрези.

Дослідженням впливу вищезгаданих факторів на точність і шорсткість оброблених зубчастих коліс присвячена велика кількість робіт [33, 40, 52, 95].

Результат биття фрези на обробленому зубчастому колесі



Результат биття фрези на обробленому зубчастому колесі



Результат биття фрези на обробленому зубчастому колесі

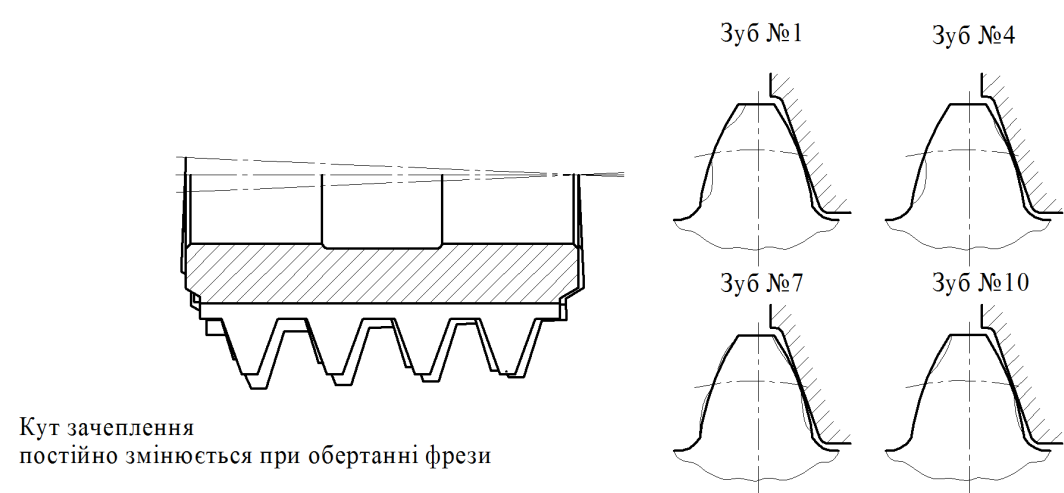


Рис. 1.9 Схема впливу радіального биття фрези на оброблюваний профіль

1.2 Аналіз процесів черв'ячного зубофрезерування

У підрозділі робиться аналіз процесів зносу черв'ячних фрез та сил різання, які виникають під час обробки.

1.2.1 Аналіз зносу та стійкості черв'ячних фрез

На зношеному зубці черв'ячної фрези розрізняють наступні види зносу: знос по задній поверхні; знос по профілю (у вигляді канавки на бічній кромці); округлення різальних кромek; викришування та утворення лунки на передній поверхні, як показано на рис. 1.10 [101, 121, 130].

Знос, як правило, нерівномірний внаслідок невільних умов стружкоутворення, рис. 1.11. Як видно з графіку, найбільшого зносу зазнає вхідна різальна кромка, яка працює в умовах «попутного» зубофрезерування.

Для цілеспрямованого дослідження зносу черв'ячних фрез досліди, як правило, доводиться проводити у виробничих умовах, бажано в умовах масового виробництва.

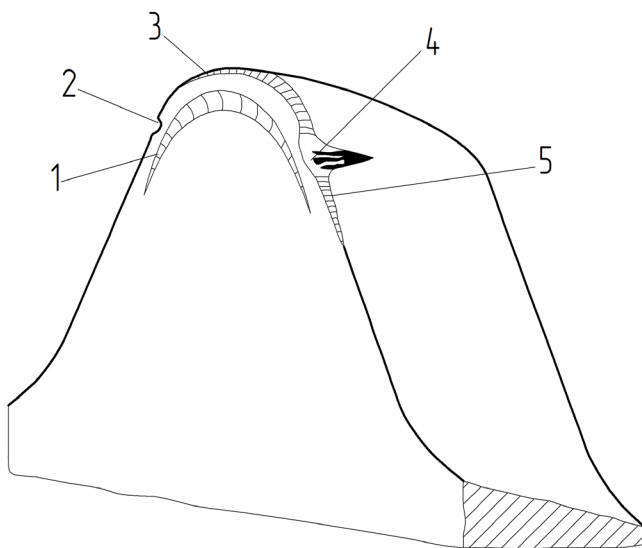


Рис. 1.10 Схема сліду зносу на зубцях черв'ячної фрези

1 – лунка; 2 – скол;
3 – округлення вершинної РК; 4 – знос по задній поверхні; 5 – округлення бічної РК.

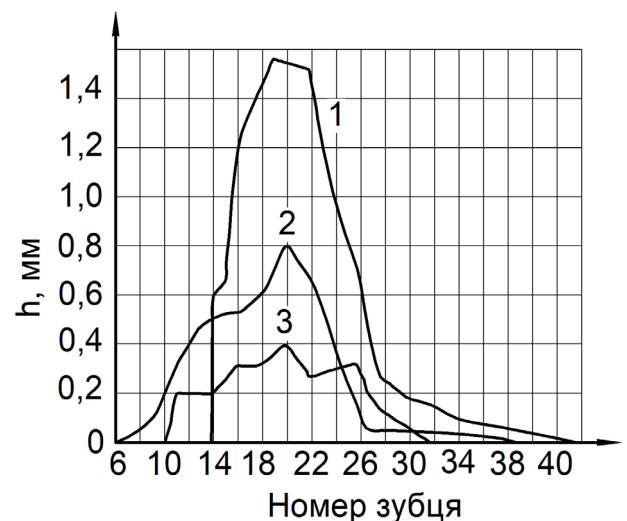


Рис. 1.11 Криві зносу задніх поверхонь зубців фрези уздовж витка

1 - знос по бічній РК, що працює в умовах «попутного» фрезерування (вихідна кромка); 2 - знос по бічній РК, що працює в умовах «зустрічного» фрезерування (вхідна кромка); 3 - знос по вершинній РК.

На рис. 1.12 наведено результати досліджень зносу, проведених на АТ «Гідросила».

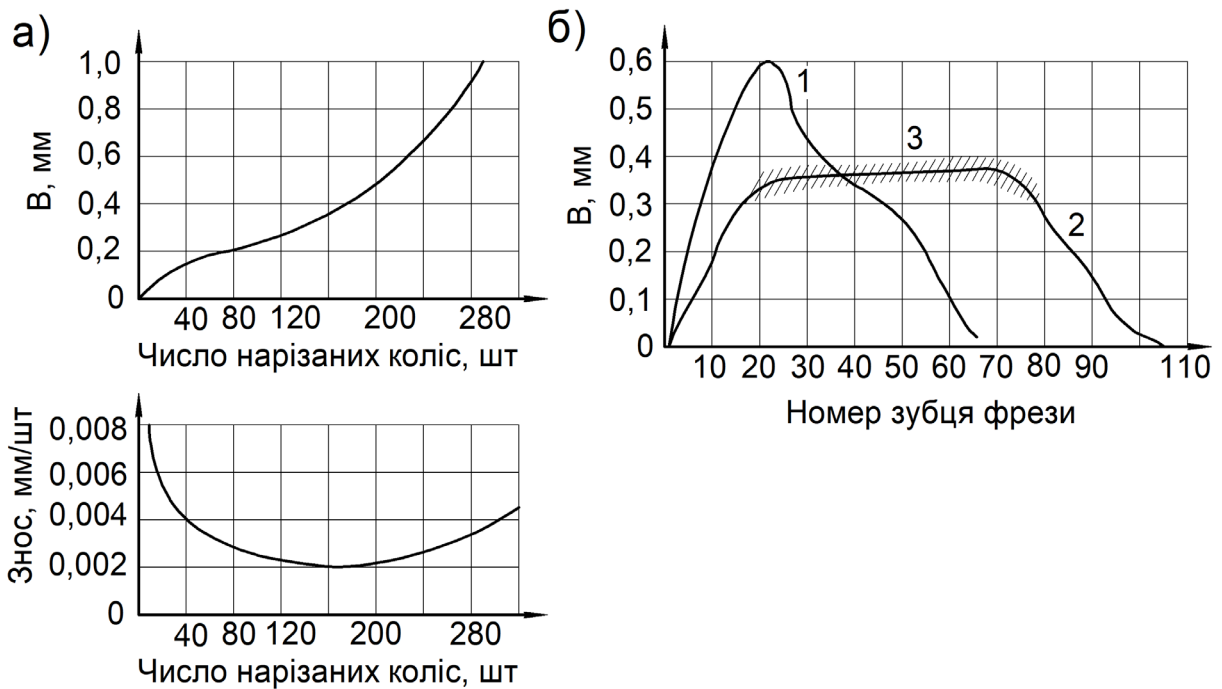


Рис. 1.12 Залежність ширини стрічки зносу по бічній задній поверхні

а) залежність від числа нарізаних коліс; б) величина зносу окремих зубців черв'ячної фрези при роботі без осьових пересувки, і з пересувками;

V - ширина стрічки зносу, мм; 1 – обробка 40 коліс без пересувки; 2 – обробка 160 коліс з перерозподілом (крок пересувки 0,64 мм/пакет); 3 - область розсіювання даних.

Верхня крива на рис. 1.12, а описує залежність ширини стрічки зносу по задній поверхні V від числа нарізаних коліс. Вона має звичайний вигляд, що характеризується дегресивним зростанням зносу в початковий період роботи фрези, до якого примикає ділянка майже лінійного зростання зносу в середній частині. При подальшому збільшенні числа нарізаних коліс зростання зносу набуває прогресивного характеру (зростання зносу відбувається відносно все більш круто). Нижня крива на рис. 1.12, а описує зміну зносу по ширині стрічки V , віднесений до одного обробленого колеса, в залежності від числа нарізаних коліс. Ця крива має мінімум і, тим самим, дозволяє визначити величину осьової пересувки фрези, при якій витрати на інструмент будуть мінімальними. На рис. 1.12, б дано розподіл зносу по активним зубцям фрези при обробці 40 коліс без осьової пересувки і при обробці 160 коліс з осьовою пересувкою фрези. У першому випадку робота попередньої прорізки западин виконується одними і

тими ж зубцями, так що максимальний знос виникає на дуже обмеженому числі зубців, у другому випадку завдяки пересувці в зону максимального навантаження потрапляють при черговому циклі обробки нові зубці фрези, так що відносно велике число зубців фрези має майже однакові стрічки зносу. Під шириною B стрічки зносу на рис. 1.12 розуміється найбільший знос по бічній стороні профілю.

Особливий інтерес представляє вплив елементів режимів різання на знос інструменту. На рис. 1.13 показана залежність ширини стрічки зносу B по задній поверхні від подачі.

На рис. 1.13, а представлено розподіл зносу по зубцям черв'ячної фрези при величині подачі в якості параметра, а на рис. 1.13, б поле максимальних зносів у вигляді функції подачі. При малих подачах товщини зрізів і сили різання невеликі, але велике число врізань фрези, необхідних для зняття даного обсягу стружки. При збільшених подачах зростають товщини зрізів і тим самим навантаження на різальні кромки зубців і температура різання, але зменшується число врізань.

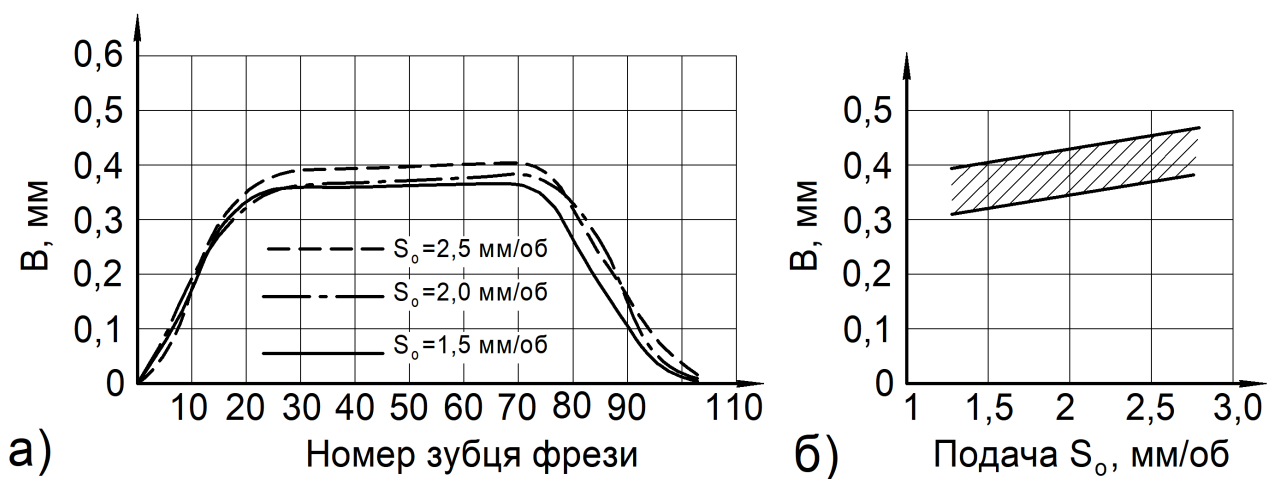


Рис. 1.13 Залежність ширини стрічки зносу від подачі

- а) розподіл зносу по зубцям фрези при різних подачах;
 б) ширина стрічки зносу як функція подачі
 B - ширина стрічки зносу, мм; S_0 – подача, мм/об.

Порівнюючи середній знос при різних подачах, можна прийти до висновку, що зростання зносу зі збільшенням подачі настільки незначне, що воно далеко перекривається отриманими в результаті цього перевагами від

зниження основного часу обробки. З цього можна зробити висновок, що в дослідженому інтервалі збільшення подачі обмежується не зносом, а якістю оброблених профілів зубців, зокрема, слідами подачі які на них виникають.

Аналізуючи фактори, що впливають на знос черв'ячної фрези, можна класифікувати їх на три групи [46, 117, 123]:

- пов'язані з геометрією фрези;
- пов'язані з процесом різання;
- пов'язані з геометрією колеса.

До першої групи належать діаметр, число заходів і число різальних рейок (число стружкових канавок) фрези, а також такі фактори як: радіус при вершині зубця, задній і передній кути у різальних кромках, похибки радіального биття і напрямку гвинтової лінії, деякі інші конструктивні особливості і матеріал фрези.

Далі, знос залежить від елементів режимів різання – кроку осьових пересувок фрези, осьової подачі і швидкості різання, а також глибини різання. Він залежить і від таких факторів процесу, як метод фрезерування (попутне або зустрічне), від стану зубофрезерного верстату, від способу установки і закріплення інструмента й оброблюваного колеса і, нарешті, від МОР. З параметрів оброблюваного колеса на знос фрези впливають його діаметр, модуль, кут нахилу зубця, величина зміщення вихідного контуру, ширина колеса і, звичайно, його матеріал. Цю множину факторів, що впливають на знос можна звести до двох груп:

- фактори, пов'язані з геометрією зачеплення і які визначають дійсну довжину дуги зрізу і товщину зрізу, що знімається окремою різальною кромкою фрези;
- технологічні чинники, такі як швидкість різання, пара оброблюваного-інструментального матеріалів, геометрія різальних кромок, МОР і т.д.

Отже, внаслідок складних умов стружкоутворення, зуб черв'ячної фрези зазнає зносу складної форми. Механізми виникнення та фактори відомі і досліджені.

1.2.2 Аналіз впливу параметрів режимів різання на силу різання при черв'ячному зубофрезеруванні

Згідно результатів дослідження сили різання при черв'ячному зубофрезеруванні [130, 134], встановлено, що сили різання які виникають на кожній різальній кромці зубця фрези, можна розрахувати, виходячи з перетину зрізу який нею знімається. Найважливіше значення набуває в цьому випадку визначення перетинів зрізів, що знімаються окремими зубцями. Їх визначення дозволяє також прогнозувати очікуваний знос інструменту і можливості застосування певних інструментальних матеріалів. На товщини зрізів і довжини дуг зрізів при зубофрезеруванні роблять дуже незначний вплив швидкості різання і подача; вони визначаються переважно геометричними параметрами фрези і колеса яке нарізується [87]. На рис. 1.14 показані величини виникаючої на окремих кромках фрези головної сили різання F_z для трьох різних величин подач при зустрічному зубофрезеруванні прямозубих коліс.

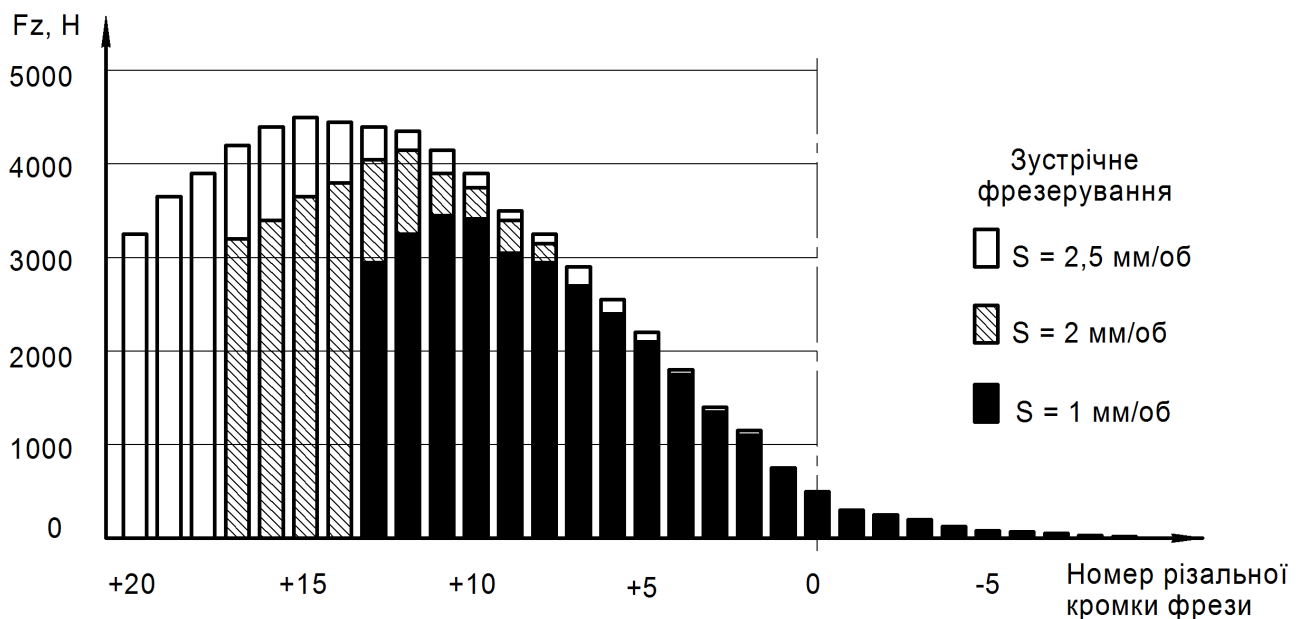


Рис. 1.14 Вплив подачі на силу різання при зубофрезеруванні

F_z – головна сила різання; S – подача, мм/об.

З рис. 1.14 видно, що на вхідній стороні фрези сили різання спочатку швидко зростають, а потім до кінця активної ділянки лінії зачеплення поступово падають. За винятком перших працюючих кромки, на всіх інших сили різання майже однакові, незважаючи на різну величину осевої подачі.

Причина цього явища в тому, що форми стружок на цих різальних кромках визначаються майже винятково розмірами черв'ячної фрези і колеса, яке нарізується. З рис. 1.14 також випливає, що число працюючих різальних кромки фрези із збільшенням подачі зростає. У наведеному прикладі при осьовій подачі в 1 мм/об на вхідній стороні фрези беруть участь у різанні тільки 13 зубців, при подачі 2 мм/об їх число збільшується до 17, а при подачі 2,5 мм/об воно складає вже 20 різальних кромки або на 50% більше, ніж при подачі 1 мм/об.

Результати дослідження [130] впливу осьової подачі на максимальну силу різання F_z показані на рис. 1.15. Сила різання в дослідженому випадку дегресивно зростає із збільшенням подачі приблизно до величини $S = 1,25$ мм/об, а вище цього значення подачі зростання F_z стає злегка

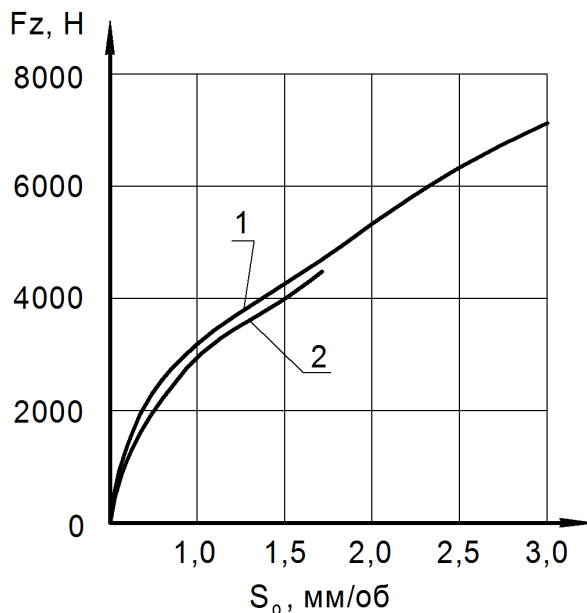


Рис. 1.15 Вплив осьової подачі на максимальну силу різання

1 - розрахункові значення;

2 - виміряні значення;

Параметри колеса:

$m = 5$ мм; $z = 9$; матеріал - сталь 45; $\beta_o = 0^\circ$.

Параметри фрези:

$d_k = 100$ мм; $g = 1$; $i = 10$; $\gamma_o = 0^\circ$.

прогресивним, знову стаючи дегресивним при $S > 2$ мм/об. При $S = 3$ мм/об величина F_z приблизно в 2 рази перевищує її значення при $S = 1,5$ мм/об. Фрезерування зустрічне.

У роботах [87, 130] показано, що швидкість різання не чинить суттєвого впливу на складові сили різання. Для всіх оброблюваних матеріалів вони залишалися майже постійними при швидкостях різання, що перевищують 50 м/хв, і мали тенденцію до зростання при менших швидкостях. Це зростання F_z із зменшенням швидкості різання було дещо більше при зустрічному фрезеруванні, ніж

при попутному. Але незалежно від методу фрезерування і параметрів колеса тенденція до зменшення F_z спостерігалася зі збільшенням швидкості різання до

20 м/хв; при подальшому збільшенні швидкості різання сила різання F_z не зменшувалася, як це видно на рис. 1.16 і табл. 1.3.

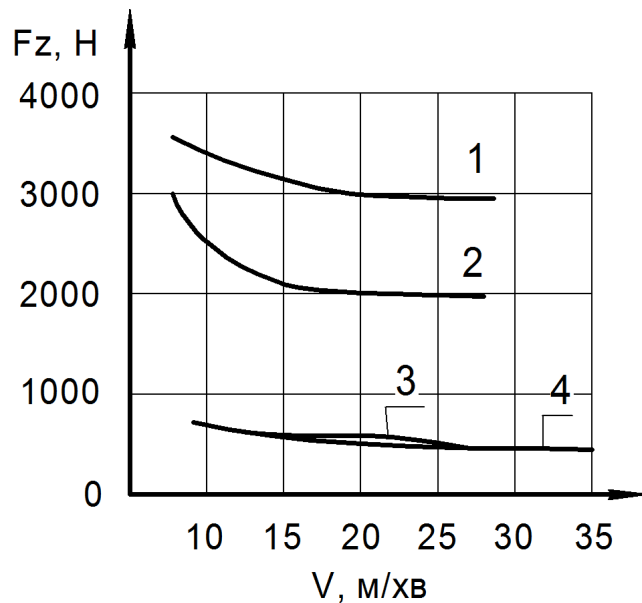


Рис. 1.16 Вплив швидкості різання на головну силу різання

матеріал – сталь 45;
глибина різання: $2m$;
зміщення профілю: $x = 0$;
колесо прямозубе.

Таблиця 1.3

Крива на рис. 1.16	Параметри колеса			Параметри фрези		d_k , мм	i
	m , мм	z	S , мм/об	Вид фрезерування	Фреза		
1	5	9	3	Зустрічне	P6M5	100	10
2	3	10	2		P6M5	100	10
3	5	8	1	Попутне	P6M5	100	10
4	5	8	1		P6M5K5	100	10

Це особливо наочно підтверджується кривою залежності сили різання від швидкості різання для черв'ячної фрези $m = 5$ мм. Чисельне значення подачі становило в цих дослідах приблизно $2/3$ частки модуля. Головна сила різання крім параметрів режимів різання залежить також від параметрів колеса, зокрема від його числа зубців і зміщення профілю. Впливають на величину F_z також число стружкових канавок черв'ячної фрези та її радіальне биття.

Відтак, сила різання, яка виникає під час черв'ячного зубофрезерування, залежить від перетину зрізу що знімається, а вплив швидкості різання і подачі незначний.

1.3 Аналіз будови сучасних зубофрезерних верстатів, що використовуються для черв'ячного зубофрезерування

Сучасні зубофрезерні верстати (рис. 1.17) складаються з розміщених на станині вузлів: фрезерної стійки, інструментального супорту зі шпинделем інструменту, супорту виробу з шпинделем виробу, контрпідтримки та системи ЧПУ [24, 82, 94].

Основними тенденціями при конструюванні серед виробників зубофрезерного обладнання [109, 116, 120] є відхід від механічних ділільних ланцюгів, використання уніфікованих модулів з прямим приводом.

До уніфікованих модулів зубообробного центру слід віднести інструментальний шпіндель та шпіндель виробу.



Рис. 1.17 Зубофрезерний верстат виробництва фірми Gleason [109]

1.3.1 Інструментальний шпіндель

На ринку наявні фрезерні шпинделі прямого приводу від виробників: GMN (Німеччина) [111], HAAS (США) [113], IBAG (Швейцарія) [114], SPINDER (Тайвань) [132], YAMA SEIKI (Японія) [140], та інші.

Інструментальний шпіндель з прямим приводом, має типову конструкцію, яка показана на рис. 1.18 [111].

Як видно зі схеми рис. 1.18, у корпусі розміщено статор приводу, а ротор – безпосередньо на фрезерному шпінделі. Таким чином виключаються всі негативні властивості [7], що притаманні шпінделям із кінематичними ланцюгами.

Конструкцією передбачено ряд датчиків (температури, вібрацій, осьового зазору, затиску інструменту), які призначені для роботи разом із адаптивною системою ЧПУ.

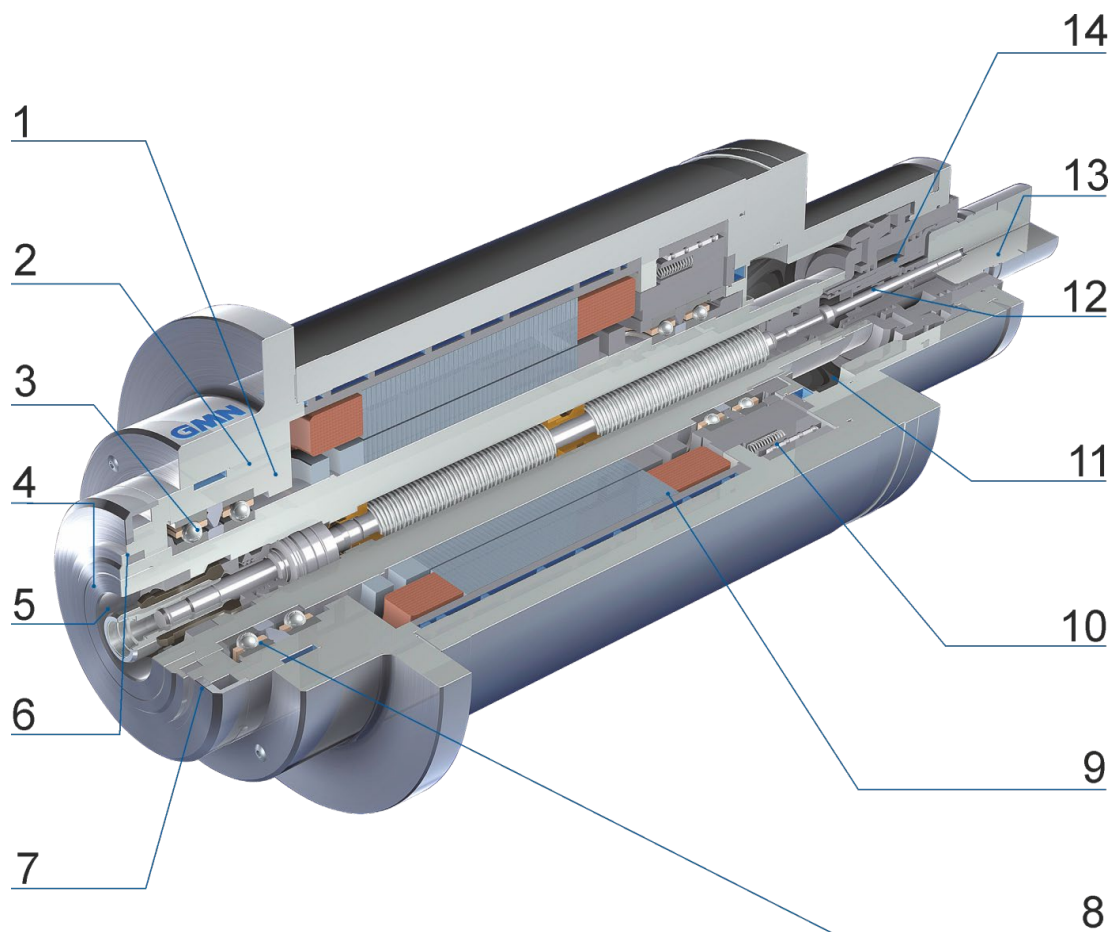


Рис. 1.18 Інструментальний шпіндель із прямим приводом

1 – демпфер; 2 – датчик вібрації; 3 – прецизійні підшипники; 4 – пневматичний датчик контролю контакту інструментальної оправки і шпінделя; 5 – очищувач інструментального конусу; 6 – система захисту від забруднень; 7 – датчик осьового зазору; 8 – температурний датчик; 9 – ротор і статор прямого приводу; 10 – система адаптивного попереднього натягу підшипників; 11 – енкодер; 12 – датчик затиску інструменту; 13 – поворотний блок системи змащування; 14 – система розтиску інструменту.

Окремо слід розглянути систему гідровіскозного демпфування (ГВД) підшипників [111].

Термін "гідровіскозне" вказує на те, що в'язке демпфування прикладається до кулькового підшипника шпинделя за допомогою гідравлічної системи, рис. 1.19.

Мета технології ГВД полягає в об'єднанні переваг кулькових і гідростатичних підшипників. Кулькові підшипники мають низький коефіцієнт тертя, працюють на високих швидкостях, по суті, нечутливі до високих перевантажень. Використання їх доцільне для досягнення високої жорсткості шпинделя, але демпфування їх досить низьке. Саме тому коли необхідно досягти дуже високої точності і низького рівня вібрації в шпинделях використовуються гідростатичні підшипники. Проте їх недоліки включають в себе втрати на тертя при високих швидкостях, більш високу вартість і необхідність складної системи рециркуляційних гідростатичних опор.

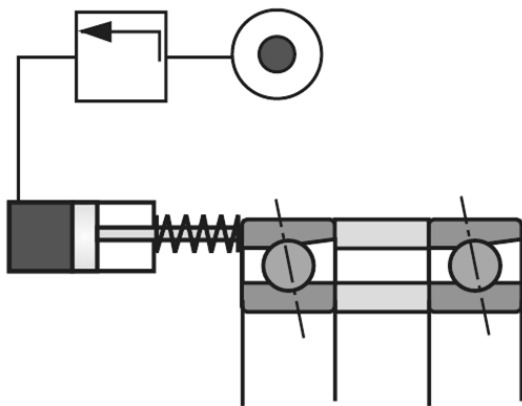


Рис. 1.19 Принципова схема технології гідровіскозного демпфування підшипника

Попереднє навантаження підшипника здійснюється за допомогою тиску масла через внутрішній поршень, як видно з рис. 1.19. Таким чином, жорсткість шпинделя може змінюватися і оптимізуватися в залежності від умов обробки і швидкості обертання. Перевагою системи регулювання попереднього

навантаження підшипника є зменшення вібрації [99].

За рахунок зменшення власних коливань інструментального шпинделя вдається досягти зменшення коливань на 65%, у порівнянні зі звичайними конструкціями шпинделів, поліпшуючи динамічну жорсткість шпинделів на 135% в вісєвому напрямку [100].

1.3.2 Шпіндель виробу

У зубофрезерних верстатах функції підтримування оброблюваних заготовок виконують ділильні столи. Тому експлуатаційні якості цих верстатів в значній мірі визначаються конструкцією останніх, точністю обертання і жорсткістю їх шпінделів, що сприймають частину маси оброблюваного колеса і надають йому обертання [15].

Так само як і інструментальний шпіндель, шпіндель виробу виконується прямого приводу, типова конструкція якого показана на рис. 1.20 [129], [72]. Столи представлені виробниками ETEL (Швейцарія) [105], FIBRO (Німеччина) [106], HAAS (США) [112], LCM (Італія) [119], UCAM (Індія) [139], та інші.

Дана конструкція позбавлена недоліків, викликаних наявністю ділильної механічної передачі, має задовільні габаритні та експлуатаційні показники.

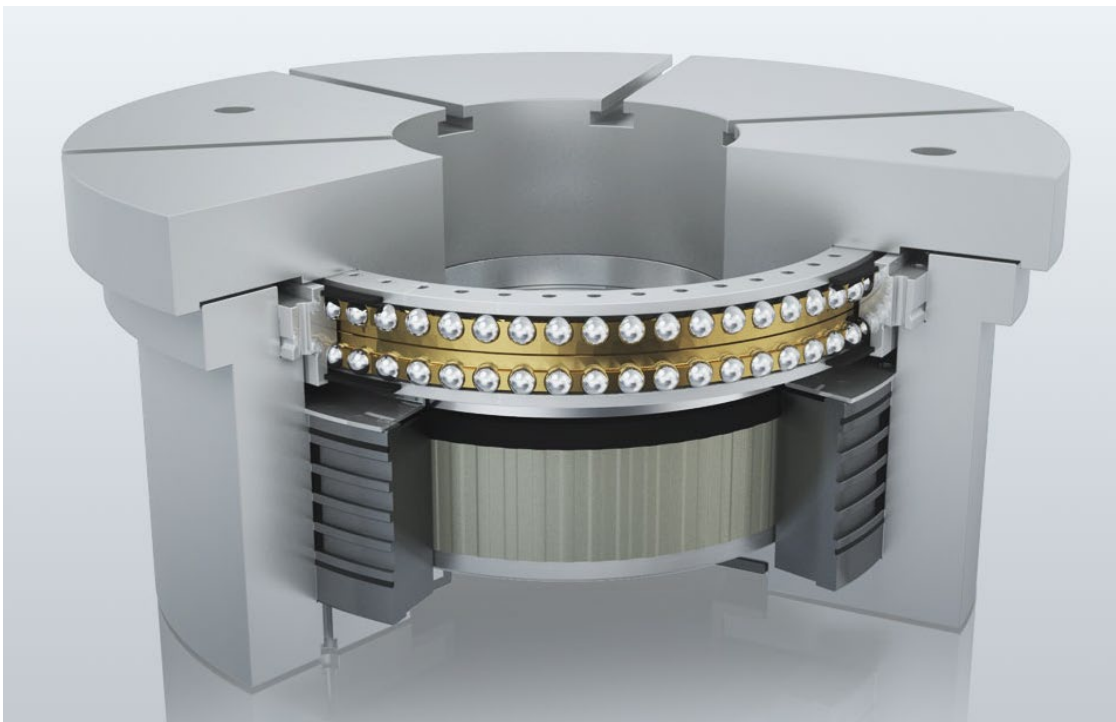


Рис. 1.20 Ділильно-поворотний стіл з прямим приводом фірми Schaeffler

1.4 Висновки, мета і задачі дослідження

Відомі літературні джерела характеризують процес черв'ячного зубофрезерування як дуже енергоємний процес, зі складними умовами різання та стружкоутворення, що виконується дорогим інструментом зі складною

геометрією. В свою чергу все це впливає на точність обробки та ресурс зубообробного обладнання.

На підставі описаних у розділі проблем черв'ячного зубофрезерування виникає протиріччя між значним прогресом у створенні верстатних систем (з розвитком сервоприводів та систем ЧПУ) та, незважаючи на численні дослідження у даній галузі, зовсім незначним прогресом в удосконаленні самого процесу зубофрезерування, з точки зору зниження його енергоємності, підвищення ресурсу верстатів та інструментів та забезпечення точності обробки.

Метою досліджень даної роботи є підвищення ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем середніх модулів 5...14 мм та створення передумов для виникнення технології зубофрезерування для умов гнучкого виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **задачі**:

- визначити схему взаємодії РК інструменту та ОП при формоутворенні евольвентного профілю, яка позбавлена недоліків схеми традиційного черв'ячного зубофрезерування, та дослідити вплив її на точність і якість ОП;

- синтезувати процес черв'ячно-контурного зубофрезерування на основі зміни взаємодії РК інструменту та ОП з подальшим дослідженням впливу зміни взаємодії на оціночні показники процесу;

- розробити методику та провести порівняльний аналіз формоутворення та енергоємності процесів зубофрезерування в умовах комп'ютерного моделювання;

- провести експериментальні дослідження досяжної точності та якості обробленої поверхні, отриманої способом черв'ячно-контурного зубофрезерування;

- розробити концепцію технології зубообробки для умов гнучкого виробництва на базі синтезованого способу черв'ячно-контурного зубофрезерування та верстату типу обробний центр.

РОЗДІЛ 2
ПРОГРАМА І МЕТОДИКА
ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ПРОЦЕСІВ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

2.1 Програма теоретичних досліджень

Теоретичні дослідження проводились за наступними напрямками:

- 1) дослідження взаємодії РК та оброблюваної евольвентної поверхні:
 - а) виявлення різниці у діючих напруженнях на оброблених поверхнях при різних схемах взаємодії РК і ОП;
 - б) визначення напрямку та наявності перемінності сили різання і моменту на приводі стола верстата під час обробки методами зубофрезерування з різною схемою взаємодії РК і ОП;
- 2) дослідження процесів зубофрезерування в умовах моделювання:
 - а) дослідження впливу похибки встановлення інструменту на точність обробки в умовах моделювання;
 - б) моделювання мікронерівностей, притаманних методам традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування і черв'ячно-контурного зубофрезерування;
 - в) комп'ютерне моделювання взаємодії РК та ОП;
- 3) теоретичні дослідження процесів традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування:
 - а) визначення енергоємності традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування на базі відомих досліджень;
 - б) дослідження процесів формоутворення традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування;
 - в) визначення енергоємності традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування на базі дослідження процесів формоутворення;

- 4) дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування:
- а) визначення енергоємності черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі відомих досліджень контурного зубофрезерування;
 - б) дослідження процесів формоутворення черв'ячно-контурного зубофрезерування;
 - в) визначення енергоємності черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі дослідження процесів формоутворення.

2.2 Методика теоретичних досліджень процесів зубофрезерування

Головним показником ефективності процесів зубофрезерування може бути енергоємність процесу. Вона може бути визначена по силам різання, які виникають в процесі обробки, наприклад, однієї западини.

Існує значна кількість досліджень по визначенню сили різання при черв'ячному зубофрезеруванні [2, 30, 107, 122, 130]. В кожному із досліджень передбачена значна кількість впливових параметрів, які сприяють більш точному визначенню значень. Але для порівняльної оцінки різних, по суті, методів зубофрезерування існуючі визначення досить громіздкі та незручні. Вони враховують параметри, які можуть бути визначені як постійні, принаймні, для обробки одного зубчастого колеса.

Для спрощення розрахунків передбачено припущення про можливість оцінки силових характеристик на базі застосування номінального зубчастого колеса та номінальної формули, визначення яких наведені нижче.

Ефективність процесу визначається через його енергоємність, так як вона впливає на фактичні витрати енергії, навантаження на елементи верстата та інструмента, а також, як наслідок, на точність обробки [8, 54, 56].

Необхідність визначення енергоємності процесу зубофрезерування окремо для шпінделя інструменту і шпінделя виробу з'являється з поширенням у сучасних верстатах прямого приводу. Використання сервоприводів дозволяє мінімально скоротити кінематичні ланцюги та надати кожному рухомому вузлу власний двигун.

2.2.1 Загальні припущення які прийняті для аналізу енергоємності процесів зубофрезерування

Для аналізу енергоємності процесів черв'ячного зубофрезерування приймаються ряд припущень:

- 1) номінальна формула сили різання при зубофрезеруванні – формула, яка вміщує найбільш впливові параметри та припускає можливість наближених розрахунків, метою яких є не абсолютне визначення розраховуваного параметра, а його відносне значення, необхідне для адекватних порівнянь;
- 2) енергоємність розраховується окремо для кожного із шпінделів зубофрезерного верстата:
 - а) для інструментального шпінделя – по крутному моменту від сили F_z , для обох методів;
 - б) для шпінделя виробу – по крутному моменту від сили F_x , для традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування;
 - в) для шпінделя виробу – по крутному моменту від сили F_y , для черв'ячно-контурного зубофрезерування;
- 3) енергоємність оцінюється для обробки однієї міжзубової западини номінального зубчастого колеса, зокрема:
 - а) для традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування;
 - б) для черв'ячно-контурного зубофрезерування;
- 4) номінальне зубчасте колесо визначається номінальним модулем m_n та номінальною кількістю зубців z_n ;
- 5) модуль номінального зубчастого колеса m_n приймається в середині діапазону середніх модулів $m = 5 \dots 14$ мм, тобто $m_n = 9$ мм [3];
- 6) кількість зубців номінального зубчастого колеса z_n приймається із урахуванням мінімального значення коефіцієнту перекриття для зубофрезерування $\varepsilon \rightarrow 1,0$. Це обумовлено тим, що в такому випадку на силові характеристики впливають лише різні в межах однієї оброблюваної западини. Для даного випадку приймаємо $z_n = 9$ шт;

- 7) верстатне зачеплення інструмента і деталі відбувається в обкаті без ковзання по колу, зокрема:
- a) при черв'ячному чистовому – по початковому колу;
 - б) при черв'ячно-контурному – по основному колу;
- 8) припуск на обробку номінального зубчастого колеса розміщується лише на активній частині профілю, в зоні за основним колом припуск відсутній, тобто він знімається на попередній обробці;
- 9) чисельні значення сил різання F_z , F_x , F_y приймаються із досліджень у відомих роботах [26, 30, 130];
- 10) співвідношення між номінальними силами різання F_z , F_x приймаються згідно відомих досліджень [9, 13, 21, 26, 27, 92, 122];
- 11) енергоємність E визначається площею фігури, яка утворена епюрою множин значень перемінних сил F в межах кута повороту φ при обробці однієї западини, і розраховується за формулою:

$$E = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_{max}} F d\varphi; \quad (2.1)$$

- 12) чисельне значення енергоємності оцінюють в умовних одиницях.

2.2.2 Загальні припущення до аналізу процесу формоутворення на базі комп'ютерної моделі кінематики зубофрезерування

З метою дослідження геометрії одиничних зрізів, що виконуються кожним окремим зубцем фрези, необхідно дотримуватись ряду припущень:

- 1) визначення характеру розподілу перетинів зрізів, що знімаються кожним зубцем фрези при проходженні по оброблюваній западині заготовки у твірних позиціях;
- 2) визначення чисельного значення і геометричної форми одиничних зрізів у кожній з комплекту радіальних січних площин при проходженні зубця фрези вздовж дуги контакту РК зубця фрези і заготовки;

- 3) під «твірною позицією» слід розуміти позицію зубця фрези у момент врізання у тіло заготовки при формуванні евольвентного профілю;
- 4) комплект радіальних січних площин представляє з себе множину радіальних площин, дотичних до геометричної вісі фрези, розташованих з постійним кроком по всій довжині дуги контакту РК зубця фрези і заготовки;
- 5) визначення геометричної форми та чисельних значень розмірів одиничного зрізу у досліджуваній січній площині відбувається шляхом накладення зображень поперечних перерізів оброблюваної заготовки до, та після проходження зубця фрези;
- 6) необхідна умова для визначення геометричної форми та чисельних значень розмірів зрізів – це врізання зубця фрези у западину, сформовану на попередніх твірних позиціях, та з урахуванням осьової подачі.

2.2.3 Методика досліджень взаємодії різальної кромки та оброблюваної евольвентної поверхні при черв'ячному зубофрезеруванні

2.2.3.1 Методика визначення шляхів зменшення спотворень геометричної форми обробленої поверхні шляхом зміни схеми різання

Об'єкт дослідження – процес механічної обробки.

Мета дослідження – визначення шляхів зменшення спотворень геометричної форми обробленої поверхні шляхом зміни схеми різання.

Методика теоретичного дослідження. Існуючі роботи по теорії процесу різання не дають чіткого нормативного визначення поверхонь по характеру взаємодії їх з РК інструмента. В роботах [13, 20, 21, 37, 81] мають місце поняття поверхні різання і обробленої поверхні для випадку поздовжнього точіння прохідним різцем.

Для більш чіткого визначення поверхонь, які виникають в процесі різання, доцільно прийняти ряд умовних припущень:

- 1) всі поверхні, які взаємодіють з різальним інструментом, приймають умовну назву поверхні різання (ПР);

- 2) поверхні різання умовно поділяються в залежності від характеру взаємодії з РК інструменту;
- 3) ПР, до яких РК є дотичною, і на які діють сили різання, розміщені по нормалі до неї, приймають назву нормальні поверхні різання (НПР);
- 4) ПР, до яких РК перпендикулярна, а сили різання – дотичні до неї, приймають назву дотичні поверхні різання (ДПР);
- 5) ПР, після закінчення їх взаємодії з різальним інструментом, можуть поділятися на функційні та вільні (функційні, це ті, які взаємодіють з іншими поверхнями при роботі у вузлі, а вільні – які не взаємодіють);
- 6) напруження які виникають на ПР визначаються по відомим формулам теорії опору матеріалів [10, 36].

У дослідженні розглядається обробка на токарному верстаті підрізним різцем, рис. 2.1.

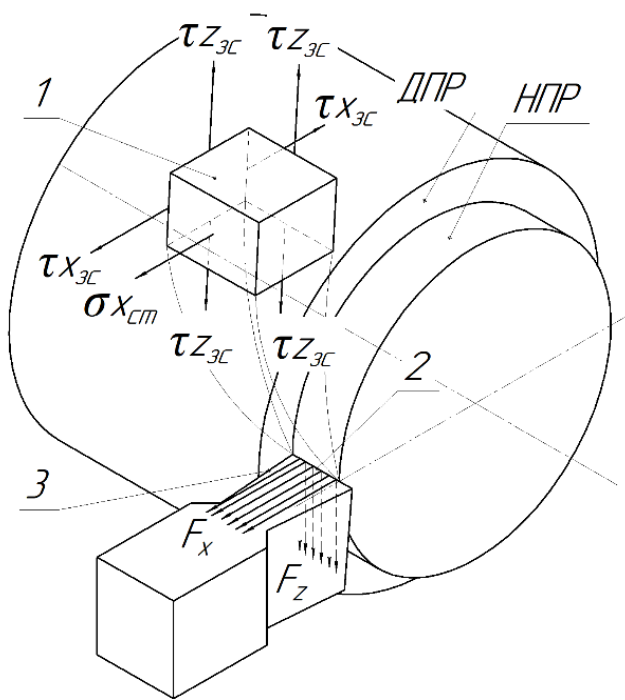


Рис. 2.1 Дія сил та виникаючі напруження при обробці

- 1 – елементарна частка відокремлюваного шару матеріалу; 2 – головна РК;
- 3 – допоміжна РК; F_x , F_z – сили різання;
- τ_{z3c} – дотичне напруження зрізу;
- $\sigma_{xст}$ – нормальне напруження стиснення;
- ДПР – дотична поверхня різання;
- НПР – нормальна поверхня різання.

Інтенсивні навантаження, розповсюджені повздовж головної різальної кромки від дії сил F_x і F_z , викликають виникнення на НПР та ДПР складного напруженого стану [37, 81, 90].

При цьому на НПР складний напружений стан утворюється внаслідок виникнення нормальних напружень стискання $\sigma_{x_{ct}}$ від сили F_x та дотичних напружень зсуву (зрізу) $\tau_{z_{zc}}$ від дії сил F_z .

Для умов складного напруженого стану на НПР загальні напруження визначають по формулі [10], МПа:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{x_{ct}}^2 + 4\tau_{z_{zc}}^2}. \quad (2.2)$$

Одночасно на ДПР виникають дотичні напруження від дії сил F_x і F_z , МПа:

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_{z_{zc}}^2 + \tau_{x_{zc}}^2}. \quad (2.3)$$

Вхідні параметри дослідження – система визначення напружень в залежності від схеми різання на прикладі обробки на токарному верстаті підрізним різцем.

Дослідження проводиться для конструкційної сталі 40Х ГОСТ 4543-71, граничні напруження якої рівні [47]:

$$[\sigma_{ct}] = 300 \text{ МПа};$$

$$[\tau_{zc}] = 120 \text{ МПа}.$$

Вихідні параметри дослідження:

- 1) значення відносної різниці в напруженнях на НПР та ДПР;
- 2) рекомендації щодо оптимальної схеми взаємодії РК та ОП для зубообробки.

2.2.3.2 Методика визначення шляхів підвищення точності за рахунок адекватності процесів різання по різнойменних профілях

Об'єкт дослідження – процес механічної обробки.

Мета дослідження – визначення шляхів підвищення точності обробки за рахунок адекватності процесів різання по різнойменних профілях.

Методика теоретичного дослідження. Важливу роль, з огляду на вплив сили різання на кінематичні пари верстата, грає напрямок та наявність

перемінності сили різання і момент, що діє на привод стола верстата під час обробки, так як, при певних умовах, може виникати силове розмикання кінематичних пар. Для того, щоб елементи кінематичної пари знаходились в постійному контакті, вони повинні бути замкнені силою різання, яка буде направлена протилежно напрямку обертання стола верстата [6].

Для більш чіткого визначення впливу сил та моментів різання на ділильну пару верстата доцільно прийняти ряд припущень:

- 1) сили різання діють по нормалі до РК і для способів обробки які розглядаються – рівні;
- 2) розглядаються лише ті сили різання або їх складові, що утворюють крутний момент;
- 3) сили різання які утворюють вигин деталі не розглядаються, так як вони не впливають на кінематику процесу.

Вхідні параметри дослідження – схеми дії сил F_x та F_y , і утворення ними крутних моментів. Схема дії сил для традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування представлена на рис. 2.2.

Схему дії сил при обробці інструментом, РК якого переміщується повздовж оброблюваної поверхні по еквідістантному контуру та розташована по нормалі до оброблюваної поверхні показано на рис. 2.3.

Вихідні параметри дослідження – висновки про вплив схеми різання на кінематичну точність верстатів з черв'ячною ділильною парою.

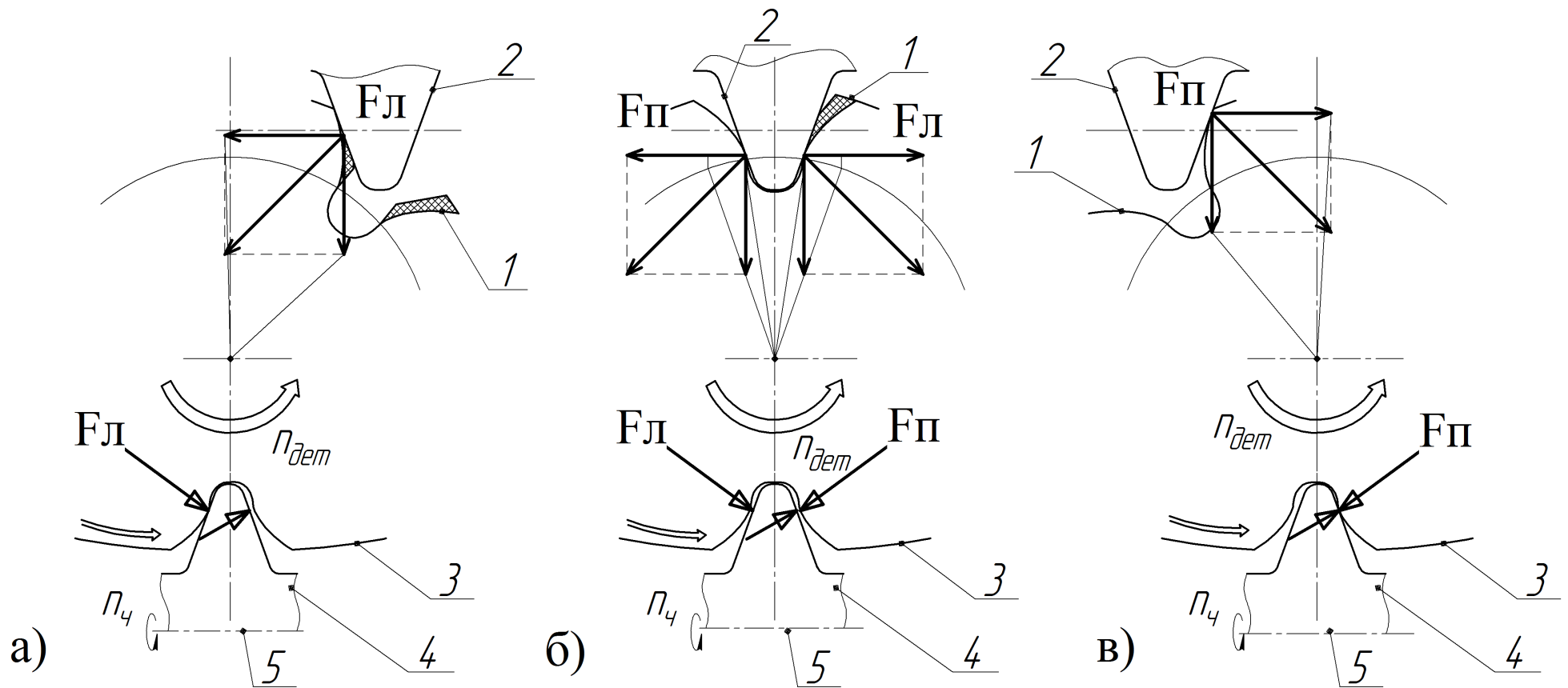


Рис. 2.2 Вектори сил різання при традиційному чистовому черв'ячному зубофрезеруванні

а) обробка правого профілю до точки, яка знаходиться на початковому колі;

б) одночасна обробка лівого і правого профілю;

в) обробка лівого профілю.

1 – заготовка; 2 – зубець черв'ячної фрези; 3 – черв'ячне колесо ділильної пари верстата; 4 – черв'як; 5 – вісь черв'яка;

F_l, F_n – відповідно ліво- та правонаправлені сили різання;

$n_{дет}$ – напрямок обертання деталі; $n_ч$ – напрямок обертання приводного черв'яка.

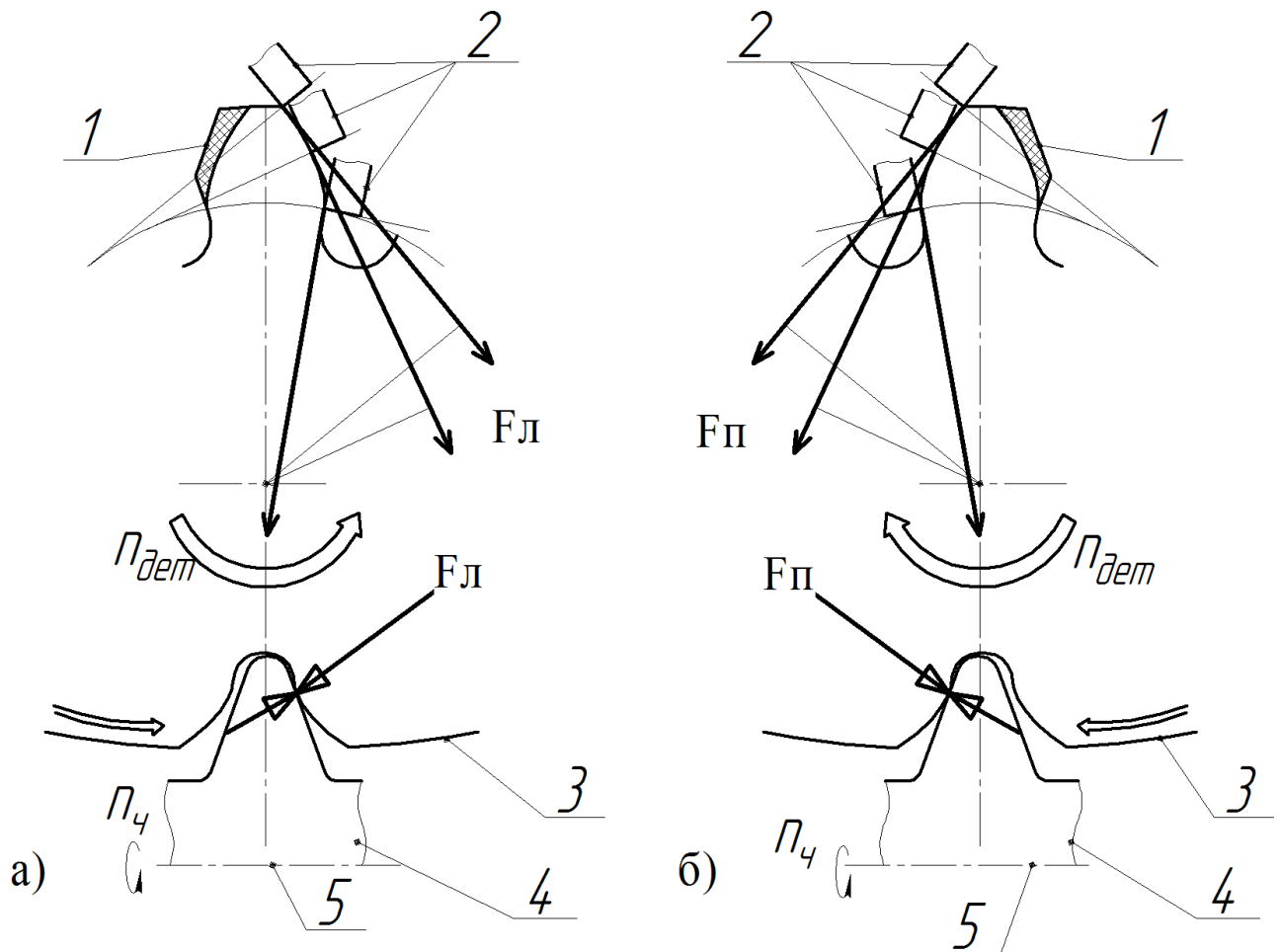


Рис. 2.3 Вектори сил різання при обробці евольвентної поверхні інструментом, різальна кромка якого переміщується повздовж оброблюваної поверхні по еквідістантному контуру

а) обробка правого профілю; б) обробка лівого профілю;
 1 – заготовка; 2 – зубець фрези; 3 – черв'ячне колесо ділильної пари верстата;
 4 – черв'як; 5 – вісь черв'яка;
 $F_{л}, F_{п}$ – відповідно лівонаправлена та правонаправлена сили різання;
 $n_{дет}$ – напрямок обертання деталі; $n_{ч}$ – напрямок обертання приводного черв'яка.

2.2.4 Методика досліджень процесів різання, які притаманні зубофрезеруванню, в умовах моделювання

2.2.4.1 Загальні вимоги до процесів моделювання

Висновки, що виводяться при аналізі процесів зубофрезерування експериментально, можна використовувати в окремих випадках, так як вони не дають універсальних закономірностей за допомогою яких можливо оцінити процес різання. Більш ефективно вивчати процеси в умовах моделювання, для чого необхідно і достатньо розробити вимоги до процесу моделювання.

До однієї з важливіших вимог до моделювання процесів зубофрезерування потрібно віднести забезпечення адекватності моделей до реальних процесів. У табл. 2.1 наведено ряд вимог до моделей процесів різання.

Таблиця 2.1

Параметр	Традиційне чистове черв'ячне зубофрезерування	Зубофрезерування з розташованою по нормалі до оброблюваної поверхні РК інструменту
Різальна кромка	Дотична до оброблюваної поверхні	По нормалі до оброблюваної поверхні
Робоча подача за рахунок	Обертання заготовки	
Заготовка	Дискової форми	
Зрізаємий шар	Конусної форми, нерівномірної товщини (товстіша на основі)	Елементна, наближена до паралелограма, форма
Розташування інструменту відносно заготовки	Вісь обертання інструменту перпендикулярна вісі обертання деталі	
Довжина РК	3 припуска	1,5 припуска
Колова подача	S мм/подв. хід	$0,5 \cdot S$ мм/подв. хід
Швидкість різання	25 м/хв	

Виконання наведених вимог забезпечить адекватність моделей процесів різання реальним способам зубофрезерування.

В загальному вигляді, моделі відповідають ескізам на рис. 2.4.

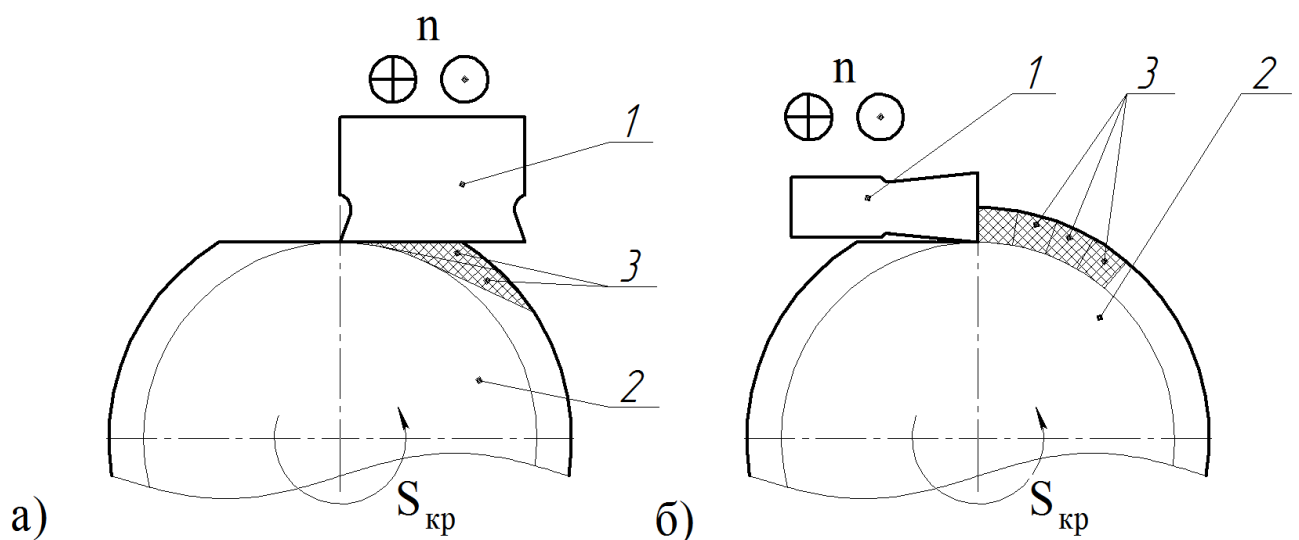


Рис. 2.4 Моделі процесів різання

- а) традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування;
 б) способу зубофрезерування з розташованою по нормалі до оброблюваної поверхні РК;
 1 – інструмент; 2 – заготовка; 3 – послідовні одиничні різні інструменту.

2.2.4.2 Методика дослідження впливу похибок інструменту та верстата на точність обробки при зубофрезеруванні

Об'єкт дослідження – технологічна система інструмент-деталь в умовах моделювання.

Мета дослідження – визначити вплив похибки встановлення інструменту на точність оброблюваного профілю.

Методика теоретичного дослідження. Вплив радіальної похибки встановлення інструменту досліджується на основі створених моделей (р. 2.2.4.1).

З цією метою, вищезгадані моделі піддають впливу періодичного зміщення контуру інструменту. Вплив похибки виражається у різниці між теоретичним та реальним профілем деталі.

Вхідні параметри процесу – моделі процесів зубофрезерування, описані в р. 2.2.4.1.

Вихідні параметри дослідження – висновки про вплив схеми різання на похибку обробки.

2.2.4.3 Методика визначення впливу схеми різання на відхилення профілю при зубофрезеруванні

Об'єкт дослідження – процеси різання в умовах моделювання.

Мета дослідження – визначення впливу схеми різання на відхилення оброблюваного профілю та характер залишкових гребінців в умовах моделювання.

Методика теоретичного дослідження. Вплив схеми різання на відхилення оброблюваного профілю та характер залишкових гребінців досліджується на основі створених моделей (р. 2.2.4.1).

Дослідження проводиться шляхом моделювання обробки заготовки радіусом R способами, описаними у р. 2.2.4.1. Послідовні одиничні різи інструменту задаються кутом повороту столу верстату φ з оброблюваною заготовкою. Відхилення профілю виражається у висоті залишкових гребінців h .

Вхідні параметри процесу – моделі процесів різання, описані в р. 2.2.4.1.

Вихідні параметри дослідження – висновки про вплив схеми різання на характер та величину залишкових гребінців.

2.2.4.4 Методика визначення рівня сталості процесів різання при профільній та контурній взаємодії в умовах комп'ютерного моделювання

Об'єкт дослідження – процеси різання в умовах моделювання.

Мета дослідження – визначення впливу схеми різання на рівень сталості процесів різання в умовах комп'ютерного моделювання.

Методика теоретичного дослідження. Система взаємодії РК та ОП розглядається як система автоматичного управління з метою визначення її статичних та динамічних характеристик.

Рівень сталості процесів різання визначаємо в умовах комп'ютерного моделювання. Метою моделювання є визначення стану системи, при якому вона набуває астатичності.

Так, з метою адекватного здійснення спрощення процесів, традиційне черв'ячне чистове зубофрезерування (рис. 2.5, а) замінюється моделюванням в умовах токарної операції (рис. 2.5, б), що відповідає умовам профільної взаємодії з огляду на те, що ОП співпадає з ПР. В свою чергу, контурна взаємодія (рис. 2.5, в) моделюється точінням прохідним різцем (рис. 2.5, г). Адекватність процесів різання створеним моделям досягається за рахунок аналогічної взаємодії РК і ОП.

Відтворення збурення, аналогічного збуренню яке виникає при врізанні зубців фрези, відбувається за рахунок ексцентриситету заготовки. Як результат, величина припуску має перемінне значення, що наближає умови відтворення при обточуванні до умов, які виникають при зубофрезеруванні.

Для побудови осцилограм та визначення пружної деформації системи по заданим схемам різання використовується прикладна програма «Моделювання технологічної спадковості» [73].

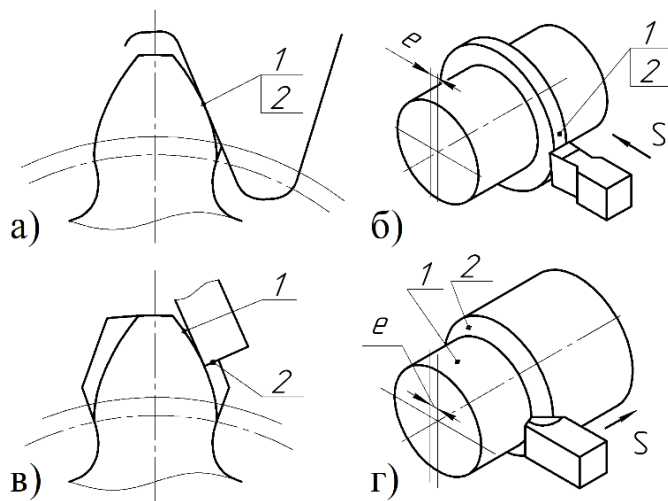


Рис. 2.5 Схеми різання до комп'ютерного моделювання

а) профільна взаємодія при традиційному чистовому черв'ячному зубофрезеруванні; б) профільна взаємодія при підрізанні на токарному верстаті; в) контурна взаємодія при зубофрезеруванні; г) контурна взаємодія при точінні прохідним різцем на токарному верстаті.
1 – оброблювана поверхня,
2 – поверхня різання;
 e – ексцентриситет; S – подача.

Вхідні параметри процесу – схеми різання, показані на рис. 2.5.

Вихідні параметри дослідження – осцилограми пружної деформації системи.

2.2.5 Методика теоретичних досліджень процесів традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування

2.2.5.1 Методика визначення енергоємності традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування на базі відомих досліджень

Об'єкт дослідження – процес чистового черв'ячного зубофрезерування.

Мета дослідження – визначення навантаження шпінделя інструменту та шпінделя виробу під час зубофрезерування. Визначення витрат енергії на зняття припуску при чистовому черв'ячному зубофрезеруванні.

Методика теоретичного дослідження. Дослідження енергоємності процесів фрезерування проводиться на базі відомих досліджень та має наближений характер.

Значення крутного моменту від сили F_z визначається шляхом множення сили на плече – радіус фрези r_ϕ :

$$M(F_z) = F_z \cdot r_\phi. \quad (2.4)$$

Визначення моменту різання на шпінделі виробу відбувається наступним чином. Для традиційного черв'ячного чистового зубофрезерування момент

різання визначається як сила F_x помножена на плече, тобто на радіус основного кола r_o :

$$M(F_x) = F_x \cdot r_o. \quad (2.5)$$

Схема утворення моментів різання на шпінделі виробу представлена на рис. 2.6. На схемі показано напрямки векторів сил різання у просторі. Зі схеми видно утворення перемінного за напрямком моменту $M(F_x)$, який викликаний зміною напрямку сили F_x при переході від обробки вхідною різальною кромкою фрези, до роботи вихідною.

Потужність являється похідною від енергії (роботи) за часом.

Отже, диференціал потужності dN визначається:

$$dN = f'(E)d\varphi, \quad (2.6)$$

де E – енергія (робота), кВт·год;

φ – кут розгорнутості, що обмежує оброблювану западину між зубцями, град.

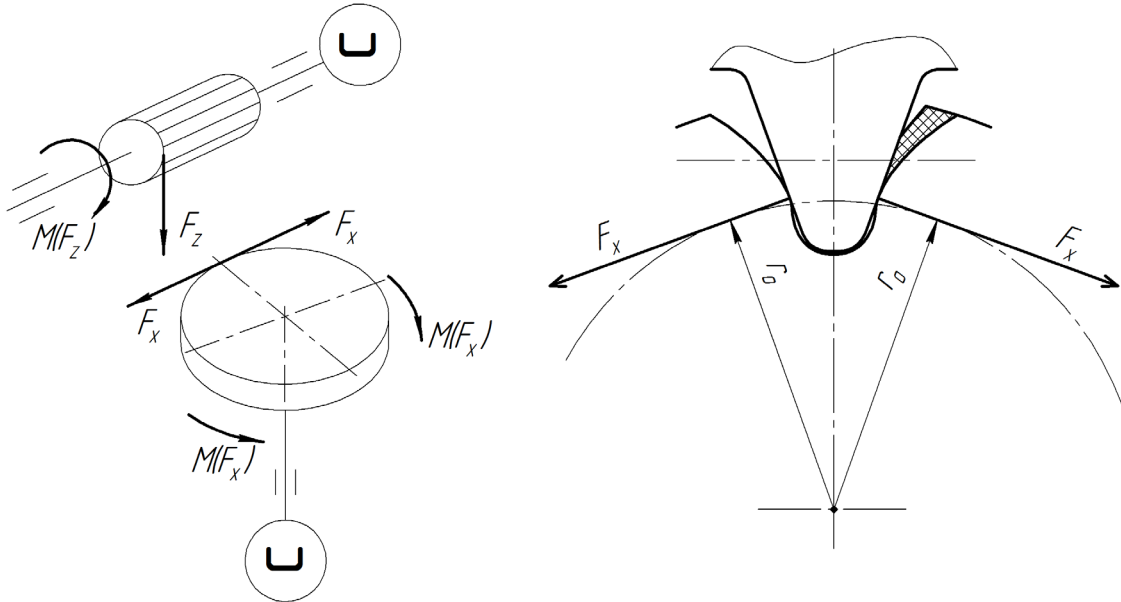


Рис. 2.6 Схема утворення моментів сил різання при традиційному чистовому черв'ячному зубофрезеруванні

r_o – радіус основного кола; $F_{z,x}$ – складові сили різання; $M(F_{z,x})$ – моменти сил різання.

Відома формула потужності інструментального шпінделя в залежності від сил різання, кВт [83]:

$$N = \frac{F_z \cdot V}{1020 \cdot 60}, \quad (2.7)$$

де F_z – складова сили різання, Н;

V – швидкість різання, м/хв.

Ефективна потужність шпінделя виробу розраховується по формулі, кВт:

$$N = \frac{F_{(x,y)} \cdot V}{1020 \cdot 60 \cdot z_d}, \quad (2.8)$$

де $F_{(x,y)}$ – сила різання, яка утворює момент на шпінделі виробу, Н;

V – швидкість різання, м/хв;

z_d – число зубців зубчастого колеса, шт.

У формулах (2.7...2.8) всі дані окрім сил різання $F_{(x,y,z)}$ являються постійними, тому диференціал потужності, пов'язаний із силами різання визначається за формулою:

$$dN = c \cdot f'(F_{(x,y,z)}) d\varphi, \quad (2.9)$$

де c – постійний коефіцієнт.

Прирівнявши формули (2.6) і (2.9) і проінтегрувавши отримане рівняння маємо:

$$E = c \cdot \int_{\varphi=0}^{\varphi=\varphi_{max}} F_{(x,y,z)} d\varphi, \quad (2.10)$$

де φ – параметр, тотожній часу T обробки однієї западини, тобто $\varphi \equiv T$.

Для визначення енергоємності процесу необхідно значення потужності по формулам (2.7) та (2.8) помножити на час обробки однієї западини. Тому доцільно формулу (2.10) представити у вигляді:

$$E = c \cdot \int_{T=0}^{T=T_{max}} F_{(x,y,z)} dT, \quad (2.11)$$

Для оцінки енергоємності процесу на базі осцилограмних епюр сил різання $F_{(x,y,z)}$ та потужності N необхідно визначити енергоємність елементарної (нескінченно малої) частини осцилограм, рис. 2.7.

З цією метою отримані осцилограми діляться на елементарні частини з нескінченно малими значеннями потужності ΔN та часу ΔT , наприклад, в межах до 3% від значень максимальної потужності:

$$\Delta N \leq 0,03 \cdot N_{max}, \quad (2.12)$$

$$\Delta T \leq 0,03 \cdot T_{max}. \quad (2.13)$$

Після чого визначаємо кількість елементарних площ, із значенням ΔN и ΔT розміщених в межах активної частини осцилограм.

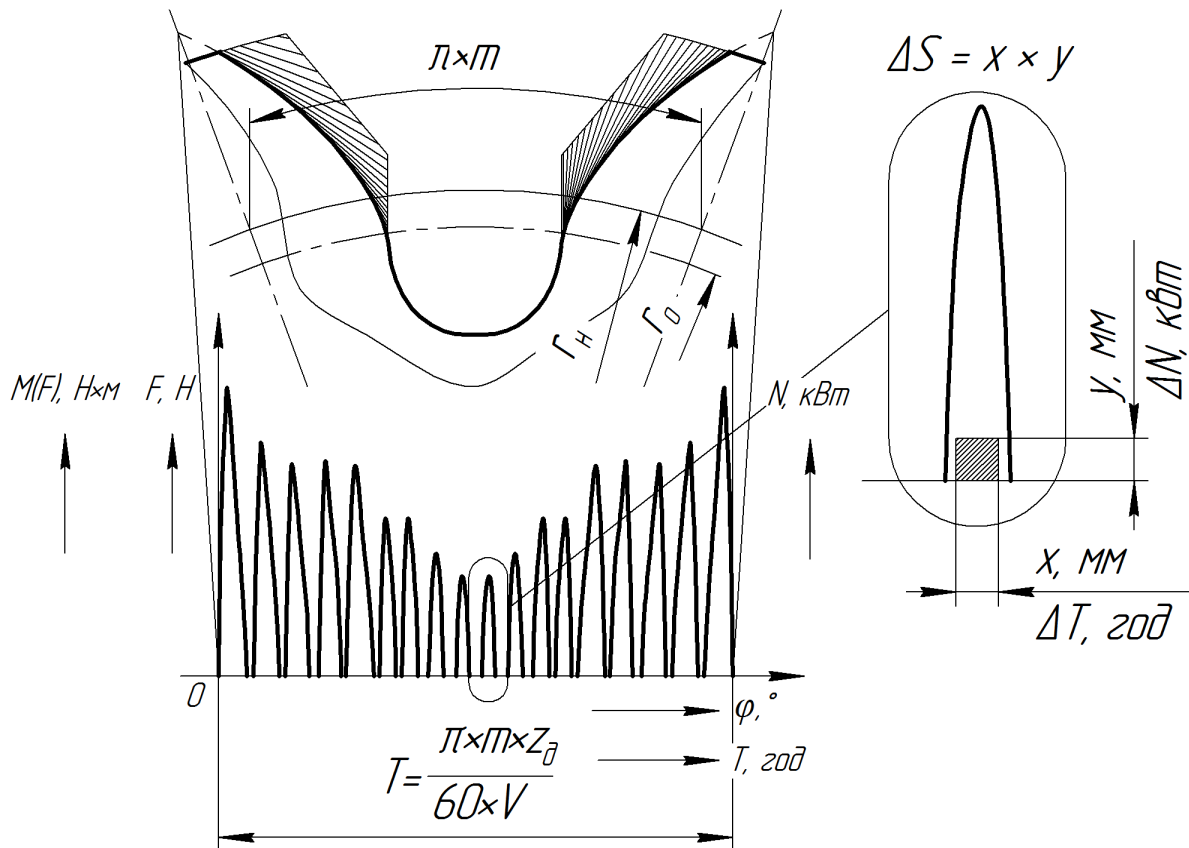


Рис. 2.7 Методика визначення питомої енергоємності на базі осцилограмних епюр сил різання

F – сила різання, Н; $M(F)$ – момент від сили різання, Н·м;
 N – потужність, кВт; T – час обробки однієї западини зубчастого колеса, год; φ – кут розгорнутості, що обмежує оброблювану западину між зубцями, град; x, y – елементарні частини з нескінченно малими значеннями потужності ΔN та часу ΔT ; r_n – радіус початкової окружності, по якому відбувається обкат без ковзання черв'ячної фрези, мм;
 r_o – радіус основної окружності, мм.

Відтворимо диференціювання побудованої осцилограми, для чого виділяємо будь-який одиничний її елемент та в його активній площині розміщуємо квадрат, який би не виходив за межі площини, з розмірами x та y . При цьому, $x = y$, а його площа дорівнює, мм^2 :

$$\Delta S = x \cdot y. \quad (2.14)$$

Значення y відтворює на числовій осі потужності $N(F)$ питома значення потужності, тобто $y = \Delta N$, кВт.

Значення x відокремлює на числовій осі T, φ значення часу $x = \Delta T$, яке разом із значенням ΔN відтворює питому площину енергоємності ΔE відокремленого одиничного елемента ΔS , кВт·год:

$$\Delta E = \Delta T \cdot \Delta N. \quad (2.15)$$

Таким чином загальна енергоємність процесу може бути визначена по формулі, кВт·год:

$$E = \Delta E \cdot \frac{S}{\Delta S}, \quad (2.16)$$

де S – загальна площа осцилограмної епюри, мм^2 .

Після перетворень формула приймає вигляд:

$$E = \Delta T \cdot \Delta N \cdot \frac{S}{\Delta S}, \quad (2.17)$$

де ΔT – значення часу яке відповідає значенню потужності ΔN , год;

ΔN – питома значення потужності, кВт;

S – загальна площа осцилограмної епюри, мм^2 ;

ΔS – площа окремого одиничного елемента, мм^2 .

Вхідні параметри дослідження. Значення сили F_z для традиційного черв'ячного чистового зубофрезерування беремо з роботи [130], виділивши з осцилограми сили різання зону профілювання евольвенти вихідною різальною кромкою фрези, так як умови різання в цьому випадку відповідають умовам чистового зубофрезерування, рис. 1.2.

Визначення сили F_x (на шпінделі виробу) буде здійснюватися через визначення співвідношень складових сили різання, наведених у роботах [9, 13,

21, 26, 27, 92, 122]. В роботах що розглядаються [26, 27, 122, 130], визначені осцилограми, які записані при повнопрофільній обробці западини зубчастого колеса. Можливість використання даних осцилограм для оцінювання чистового процесу зубофрезерування вимагає внесення деяких пояснень.

При здійсненні повнопрофільної обробки виділяють три зони:

- 1) зона попередньої обробки западини;
- 2) зона профілювання евольвенти вхідною РК зубців фрези;
- 3) зона профілювання евольвенти вихідною РК зубців фрези.

Для побудови осцилограм на підставі попередніх досліджень необхідно прийняти ряд припущень, зокрема:

- 1) розглядаються осцилограми, які записані в зоні профілювання, тобто в площині, в якій відбувається формоутворення евольвентного профілю. Таким вимогам може відповідати лише зона в якій працює вихідна різальна кромка зубців фрези. Це обумовлено тим, що в цій зоні знімаються найменші припуски, які з деякими припущеннями можливо прирівняти до припусків при чистовому зубофрезеруванні;
- 2) співвідношення між силами різання F_z , F_x , F_y приймається згідно відомих досліджень, тобто:

$$F_y = 0,5 \dots 0,6 \cdot F_z; \quad (2.18)$$

$$F_x = 0,2 \dots 0,3 \cdot F_z; \quad (2.19)$$

- 3) сила різання F_x змінює свій вектор на 180° при переході через міжосьовий перпендикуляр верстатного зачеплення фреза-заготовка.

З урахуванням прийнятих припущень, за допомогою комп'ютерного моделювання, побудуємо осцилограми сил різання, які можуть виникати при черв'ячному чистовому зубофрезеруванні.

Параметри обробки та режими різання, при записі осцилограм у роботі [130], зведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Найменування параметру	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення
Параметри зубчастого колеса [130]	Модуль	m	мм
	Число зубців	z_{∂}	шт
	Радіус основного кола	r_o	мм
Параметри черв'ячної фрези [130]	Зовнішній діаметр	D_{ϕ}	мм
	Число рейок	z_{ϕ}	шт
Режими обробки [130]	Швидкість різання	V	м/хв
	Осьова подача	f_o	мм/об. дет
Співвідношення між силами різання при фрезеруванні [27, 92]	$F_x:F_z$	відн. одиниць	0,2...0,3
	$F_y:F_z$		0,5...0,6

Вихідні параметри дослідження:

- 1) осцилограми сил різання, які можуть виникати при черв'ячному чистовому зубофрезеруванні;
- 2) осцилограми крутних моментів на інструментальному і шпінделі виробу;
- 3) осцилограми потужності на інструментальному шпінделі і шпінделі виробу;
- 4) енергоємність навантаження інструментального шпінделя і шпінделя виробу.

Вихідні дані дослідження представляються для шпінделя інструменту та шпінделя виробу у формі таблиці, табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Найменування параметрів що визначаються	Позначення	Одиниця виміру
Діапазон сил різання	F_z	Н
	F_x	
Площа активної частини осцилограмних епюр	S	мм ²
	S	
Діапазон крутних моментів	$M(F_z)$	Н·м
	$M(F_x)$	
Діапазон потужностей	$N(F_z)$	кВт
	$N(F_x)$	
Енергоємність	$E(F_z)$	кВт·год
	$E(F_x)$	

2.2.5.2 Методика дослідження процесів формоутворення традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування на базі комп'ютерної моделі кінематики зубофрезерування

Об'єкт дослідження – процес чистового черв'ячного зубофрезерування.

Мета дослідження – визначити геометрію одиничних зрізів у всіх твірних позиціях по траєкторії руху зубця черв'ячної фрези та ступінь навантаження окремих ділянок РК, на підставі розподілення площин одиничних зрізів під час обробки однієї впадини зубчатого колеса.

Методика теоретичного дослідження. Дослідження площин перетину зрізів при чистовому черв'ячному зубофрезеруванні, виконується відповідно до методики, описаній в роботах [96, 97, 98, 102, 104, 107, 122, 130, 136] для дослідження черв'ячного зубофрезерування по суцільній заготовці. У роботах описано метод розрахунку площин зрізів, що дозволяє точно визначити геометрію окремих зрізів, що знімаються кожним зубцем черв'ячної фрези.

Робота виконується у середовищі CAD-системи, після створення тривимірних моделей заготовки та інструменту.

Для цього необхідно зафіксувати форму та чисельні значення розмірів одиничного зрізу при формуванні евольвентного профілю зубчастого колеса у так званих твірних позиціях (рис. 2.8), та у всіх радіальних січних площинах (рис. 2.9) по траєкторії руху зубця черв'ячної фрези.

Поняття твірних позицій введено як аналог кінематики руху зубця черв'ячної фрези, з огляду на відносно складну його траєкторію, так як формування кожної впадини заготовки відбувається врізанням зубця фрези у впадину деталі, сформовану на попередніх твірних позиціях.

Нумерація твірних позицій починається з від'ємних чисел, які відповідають роботі зубця фрези вхідною РК, та закінчується додатними – робота вихідною РК. Позиція «0» відповідає симетричному розташуванню профілю зубця фрези у впадині заготовки.

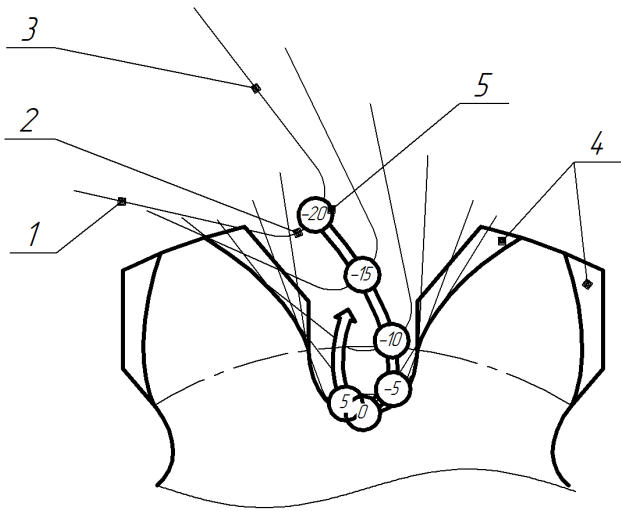


Рис. 2.8 Схема розташування твірних позицій зубця черв'ячної фрези при традиційному чистовому зубофрезеруванні

1 – вхідна різальна кромка; 2 – вершинна різальна кромка; 3 – вихідна різальна кромка; 4 – припуск на чистову обробку; 5 – твірна позиція зубця фрези.

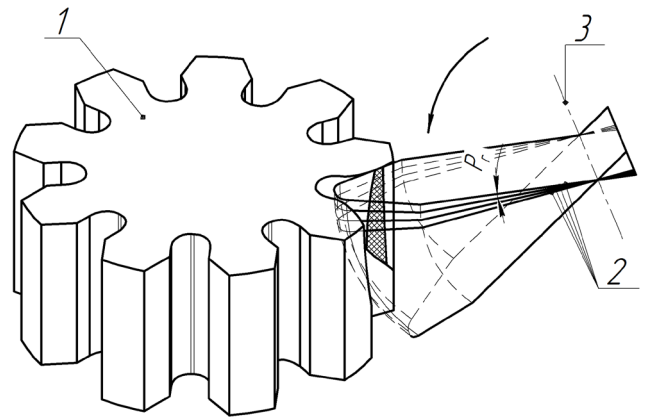


Рис. 2.9 Схема розташування радіальних січних площин при традиційному чистовому зубофрезеруванні

1 – заготовка; 2 – комплект радіальних січних площин; 3 – вісь обертання інструменту; P_r – крок радіальних січних площин.

Січні площини являють собою визначені положення зубця фрези на яких розглядається геометрія одиничних зрізів при проходженні його вздовж дуги контакту різальної кромки зубця фрези і заготовки.

Вхідні параметри дослідження наведено у таблицях 2.4...2.6.

Вихідні параметри дослідження. Отримані в ході дослідження графічні зображення перетинів зрізів відображаються на номінальних площинах, рис. 2.10.

Таблиця 2.4

Параметри процесу моделювання

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
Кінематична колова подача	S_k	мм/зуб	2,826	-
Осьова подача	S_o	мм/об. дет.	4	-
Крок радіальних січних площин	P_r	град.	3	-

Таблиця 2.5

Параметри заготовки

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
Число зубців деталі	z_d	шт	9	-
Модуль	m	мм	9	-
Припуск на товщину зубця*	ΔS	мм	2	-

* припуск розміщений лише в зоні евольвентного профілю, перехідна крива, розміщена за основним колом, не оброблюється, вона оброблена попередньо

Таблиця 2.6

Параметри фрези

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
Зовнішній діаметр	D_f	мм	140	-
Число зубців	z_f	шт	14	-
Модуль	m	мм	9	-
Число заходів	k	-	1	-
Напрямок витків	-	-	-	правий
Осьовий крок*	P_o	мм	28,2740	-

* інші розміри профілю зубців фрези у нормальному перерізі див. ГОСТ 9324-80 [93]

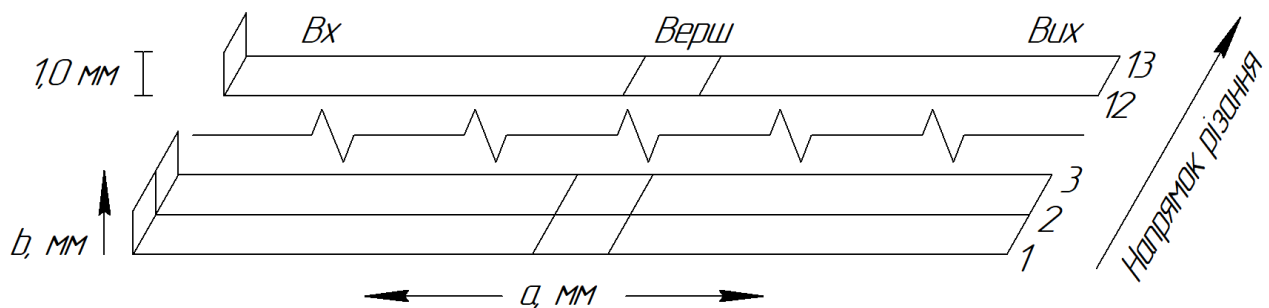


Рис. 2.10 Номінальні площини перетинів зрізів черв'ячного зубофрезерування

a – ширина зрізу, мм; b – товщина зрізу, мм;

Вх, Верш, Вих – вхідна, вершинна та вихідна РК; 1...13 – радіальні січні площини.

Для кожної твірної позиції будується окремий графік. Дані представляються для кожної радіальної січної площини, описаної горизонтальною лінією з номером від «1» до «13». Для чисельної оцінки перетинів зрізу вказано масштаб. Над верхньою лінією дані позначення різальної кромки, яка здійснює різання.

Отримані графічні зображення перетинів зрізів для всіх січних площин і для всіх, що беруть участь у роботі зубців фрези можуть дати повну картину про форми та чисельні значення розмірів одиничних зрізів, а також ступінь навантаження окремих зубців черв'ячної фрези та окремих ділянок РК.

По вже відомим площинам та чисельним значенням розмірів одиничних зрізів будуються тривимірні графіки. По вісі абсцис графіків вказується номер твірної позиції, по вісі ординат – номер січної площини, а по вісі аплікату, для кожного графіка окремо, – площа поперечного перерізу, ширина, товщина зрізу.

2.2.5.3 Методика визначення енергоємності традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування на базі дослідження процесів формоутворення

Об'єкт дослідження – процес чистового черв'ячного зубофрезерування.

Мета дослідження – визначити енергоємність процесу традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування на основі отриманих даних дослідження процесів формоутворення.

Методика теоретичного дослідження. Для оцінки енергоємності процесу по отриманим даним дослідження процесів формоутворення, необхідно задатися оціночними показниками, які відображаються відносним модулем сили $|F|$ та відносним модулем енергоємності $|E|$.

Відносний модуль сили $|F|$ – значення сили різання, визначене по емпіричній формулі, в якій значення постійних параметрів прийняті рівними одиниці, а при його визначенні враховуються тільки значення перемінних параметрів.

Відома формула для розрахунку сили різання [13]:

$$F_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{mp}, \quad (2.20)$$

де C_p – постійна, що враховує властивості оброблюваного матеріалу;

t – глибина різання, мм;

S_z – осьова подача, мм/об. дет;

B - ширина різання, мм;
 z - кількість зубців фрези, шт;
 D – діаметр фрези, мм;
 n - частота обертів фрези, об/хв;
 K_{mp} - поправочний коефіцієнт;
 x, y, u, q, w – показники степеня.

Нехтуючи впливом властивостей оброблюваного матеріалу та впливом режимів різання, з огляду на моделювання обробки однакових заготовок при однакових умовах різання, виводимо відносний модуль сили, у відносних одиницях сили:

$$|F_z| = t^x \cdot B^u. \quad (2.21)$$

Зовнішнім діаметром фрези у даному дослідженні нехтуємо, приймаємо $r_\phi = 1$, тому момент на інструментальному шпінделі тотожний модулю сили:

$$M(F_z) \equiv |F_z|. \quad (2.22)$$

Визначення моменту різання на шпінделі виробу відбувається наступним чином. Для традиційного черв'ячного чистового зубофрезерування момент різання визначається як сила F_x помножена на плече (рис. 2.6), тобто на радіус основного кола r_o :

$$M(F_x) = F_x \cdot r_o. \quad (2.23)$$

Для зручності розрахунків, приймаємо значення $r_o \rightarrow 1,0$.

Відносний модуль енергоємності $|E|$ – визначене по відносному модулю сили $|F|$ значення енергоємності, яке діє в межах площини що розглядається (зони обробки однієї впадини).

Для визначення відносного модуля енергозатрат, звернемось до відомої формули механічної роботи A [41]:

$$A = F \cdot V \cdot T, \quad (2.24)$$

де F – сила, Н;

V – швидкість, м/хв;

T – час, с.

Задавшись однаковою швидкістю різання та однаковим параметром, тотожнім часу T – обробкою однієї міжзубової западини φ (тобто $\varphi \equiv T$), виводимо відносний модуль енергозатрат, у відносних одиницях енергії:

$$|E| = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\max} \sum |F| d\varphi. \quad (2.25)$$

Вхідні параметри дослідження – глибина та ширина зрізу, на кожній твірній позиції, отримані під час дослідження формоутворення на базі комп'ютерної моделі кінематики зубофрезерування, згідно методики р. 2.2.5.2.

Вихідні параметри дослідження. Отримані в ході дослідження чисельні значення відносного модуля сили $|F|$ представляються у вигляді графіків – епюрних осцилограм, а енергоємність $|E|$ – чисельним значенням, в умовних одиницях. Вихідні дані дослідження представляються для шпінделя інструменту та шпінделя виробу у формі таблиці, табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Найменування параметрів що визначаються	Позначення	Одиниця виміру
Діапазон відносного модуля сили $ F $	$ F_z $	відносні одиниці сили
	$ F_x $	
Діапазон крутних моментів	$M(F_z)$	відносні одиниці
	$M(F_x)$	
Відносний модуль енергозатрат	$ E(M_z) $	відносні одиниці енергоємності
	$ E(M_x) $	

2.2.6 Методика теоретичних досліджень процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування

2.2.6.1 Методика визначення енергоємності черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі відомих досліджень контурного зубофрезерування

Об'єкт дослідження – процес контурного зубофрезерування дисковою фрезою.

Мета дослідження – визначення навантаження шпінделя інструменту та шпінделя виробу під час черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі аналізу відомих досліджень контурного зубофрезерування [23, 25, 28, 29, 124]. Визначення витрат енергії на зняття припуску при контурному зубофрезеруванні в зоні, яка є адекватною до черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Методика теоретичного дослідження. Методика дослідження аналогічна описаній для традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування у р. 2.2.5.1, за винятком наведених нижче відмінностей.

Момент різання на шпінделі фрези $M(F_z)$ розраховується по формулі (2.4).

Схема утворення моментів різання на шпінделі виробу при контурному зубофрезеруванні представлена на рис. 2.11. На рисунку показані послідовні положення зубців фрези з прикладеними до них векторами сил різання F_y . В кожному твірному положенні зубця фрези до вектора сили різання будується дотичне коло з радіусом r , яке концентричне геометричному центру оброблюваної деталі.

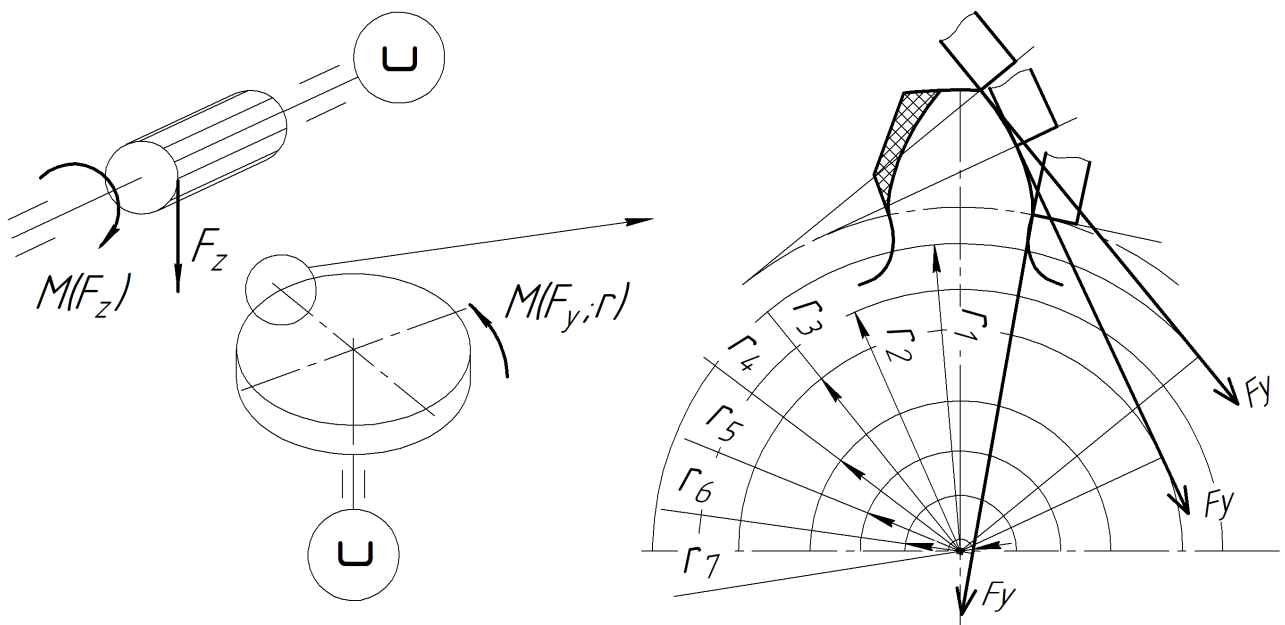


Рис. 2.11 Схема утворення моментів при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні

$r_1 \dots r_7$ – радіуси кіл, дотичних до векторів сили різання; $F_{z,y}$ – складові сили різання; $M(F_{z,y})$ – моменти сил різання.

Отже, визначення моменту різання, утвореного силою різання F_y , для контурного зубофрезерування здійснюється у декількох точках при обробці евольвентного профілю з визначенням радіусів кіл, дотичних до векторів сили різання:

$$M(F_y)_i = F_y \cdot r_i. \quad (2.26)$$

Для оцінки енергоємності процесу на базі осцилограмних епюр сил різання $F_{(x,y,z)}$ та потужності N необхідно визначити енергоємність елементарної (нескінченно малої) частини осцилограм по рис. 2.12 як описано у р. 2.2.5.1.

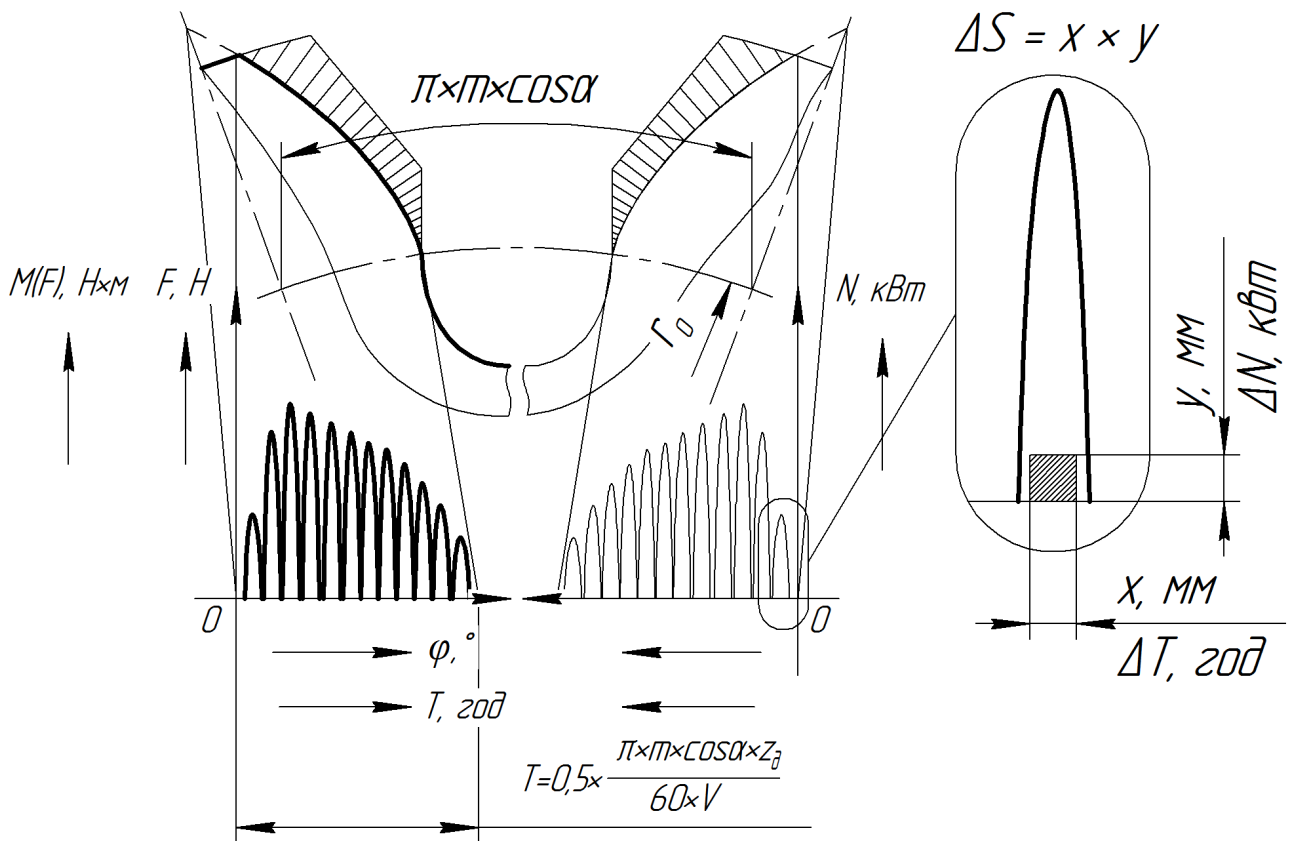


Рис. 2.12 Методика визначення питомої енергоємності на базі осцилограмних епюр сил різання

F – сила різання, Н; $M(F)$ – момент від сили різання, Н·м;
 N – потужність, кВт; T – час обробки однієї западини зубчастого колеса, год; φ – кут розгорнутості, що обмежує оброблювану западину між зубцями, град; x, y – елементарні частини з нескінченно малими значеннями потужності ΔN та часу ΔT ; r_o – радіус основної окружності, по якій відбувається обкат без ковзання контурної фрези, мм.

Вхідні параметри дослідження. У дослідженні використовуються значення складових сил різання F_z та F_y , для контурного зубофрезерування, з деякими умовностями, з наведених у роботі [30]. До умовностей слід віднести:

- знехтування обробкою западини (зони за основним колом);
- використання даних обробки тільки одного (вхідного) профілю з огляду на споріднені умови різання.

На рис. 2.13 наведені осцилограми сил різання F_z та F_y , які були досліджені в роботі [30].

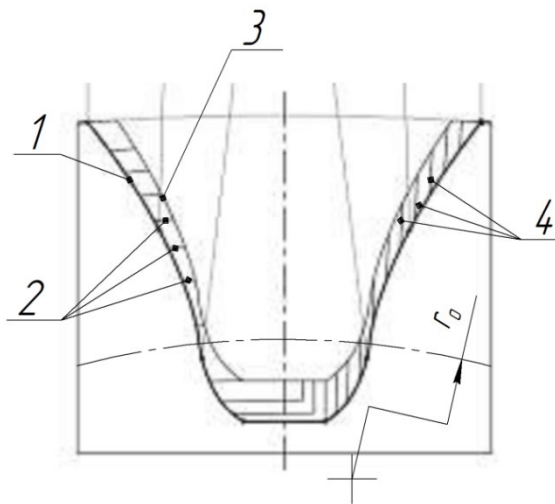
Наведені осцилограми відтворюють сили різання які виникають в визначених точках контуру профілю. При цьому розміщення слідів одиничних зрізів наближене до слідів одиничних зрізів черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Таке розміщення дає змогу з достатньою, для теоретичних досліджень, точністю використати частину осцилограми для оцінки осцилограм сил різання в умовах черв'ячно-контурного зубофрезерування.

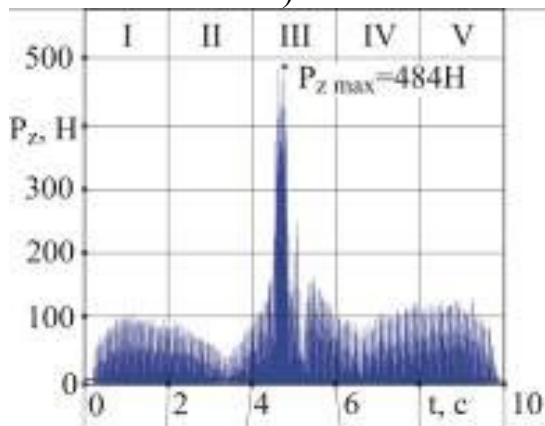
Параметри обробки та режими різання при записі осцилограм у роботі [30] зведено у табл. 2.8.

Таблиця 2.8

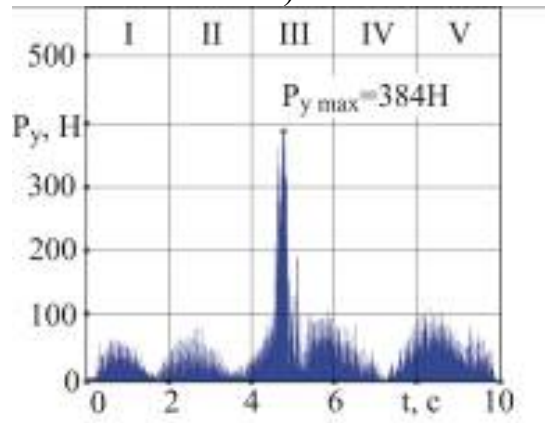
Найменування параметру		Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	
				Наведені в попередніх дослідженнях	Прийняті для теоретичних досліджень
Параметри зубчастого колеса	Модуль	m	мм	7	
	Число зубців	z_d	шт	20	
	Діапазон радіусів кіл, дотичних до векторів сили різання	r_i	мм	40,15...7,03	
Параметри дискової фрези	Зовнішній діаметр	D_ϕ	мм	100,0	
	Число зубців	z_ϕ	шт	12	
Режими обробки	Швидкість різання	V	м/хв	188	40
	Осьова подача	f_o	мм/об. дет	2,0	



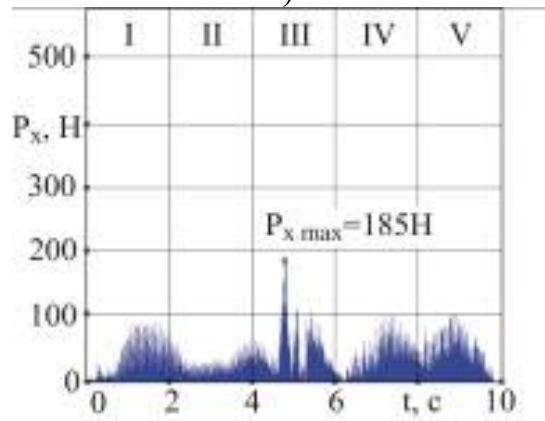
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.13 Епюрна схема складових сил різання при обробці способом контурного зубофрезерування дисковим інструментом [30]

- а) ескіз обробленої впадини;
 б) осцилограма складової сили різання F_z ;
 в) осцилограма складової сили різання F_y ;
 в) осцилограма складової сили різання F_x ;
 1 – контур профілю обробки;
 2 – сліди одиничних зрізів, розміщення яких наближене по нормалі до евольвенти;
 3 – контур профілю до обробки;
 4 – сліди одиничних зрізів, розміщення яких наближене між нормаллю та дотичною до евольвенти;
 r_0 – радіус основної окружності.

Вихідні параметри дослідження:

- 1) осцилограми сил різання, які можуть виникати при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні;
- 2) осцилограми крутних моментів на інструментальному шпінделі і шпінделі виробу;
- 3) осцилограми потужності на інструментальному шпінделі і шпінделі виробу;
- 4) енергоємність навантаження інструментального шпінделя і шпінделя виробу.

Вихідні дані дослідження представляються для шпінделя інструменту та шпінделя виробу у формі таблиці, табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Найменування параметрів що визначаються	Позначення	Одиниця виміру
Діапазон сил різання	F_z	Н
	F_y	
Площа активної частини осцилограмних епюр	S	мм ²
Діапазон крутних моментів	$M(F_z)$	Н·м
	$M(F_y)$	
Діапазон потужностей	$N(F_z)$	кВт
	$N(F_y)$	
Енергоємність	$E(F_z)$	кВт·год
	$E(F_y)$	

2.2.6.2 Методика дослідження процесів формоутворення черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі комп'ютерної моделі кінематики зубофрезерування

Об'єкт дослідження – процес черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Мета дослідження – визначити геометрію одиничних зрізів у всіх твірних позиціях по траєкторії руху зубця черв'ячно-контурної фрези та ступінь навантаження окремих ділянок РК, на підставі розподілення площин одиничних зрізів під час обробки однієї впадини зубчатого колеса.

Методика теоретичного дослідження. Методика дослідження аналогічна описаній для традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування

у р. 2.2.5.2. Схема розташування твірних позицій приведена на рис. 2.14. Схема розташування радіальних січних площин приведена на рис. 2.15.

Нумерація твірних позицій починається з позиції «1», та продовжується у додатному напрямку.

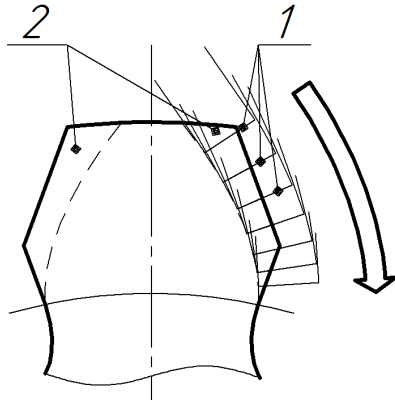


Рис. 2.14 Схема розташування твірних позицій зубця черв'ячно-контурної фрези при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні

1 – головна різальна кромка;
2 – припуск на чистову обробку.

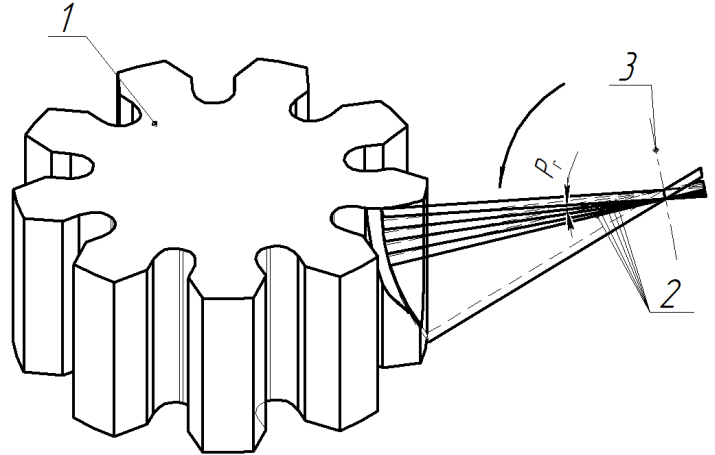


Рис. 2.15 Схема розташування радіальних січних площин при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні

1 – заготовка; 2 – комплект радіальних січних площин; 3 – вісь обертання інструменту;
 P_r – крок радіальних січних площин.

Вхідні параметри дослідження наведено у табл. 2.10 і табл. 2.11.

Таблиця 2.10

Параметри процесу моделювання

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
Кінематична колова подача	S_k	мм/зуб	1,709	-
Осьова подача	S_o	мм/об	4	-
Крок радіальних січних площин	P_r	град.	3	-

Таблиця 2.11

Параметри фрези

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
Число зубців	z_f	шт	20	-
Число заходів	k	-	1	-
Напрямок витків	-	-	-	правий
Осьовий крок	P_o	мм	28,2740	-

Параметри заготовки див. табл. 2.5.

Вихідні параметри дослідження. Отримані в ході дослідження чисельні значення перетинів зрізів відображають у вигляді відомої схеми (рис. 2.10), але змінений з урахуванням особливостей черв'ячно-контурного зубофрезерування. Схема представлена на рис. 2.16.

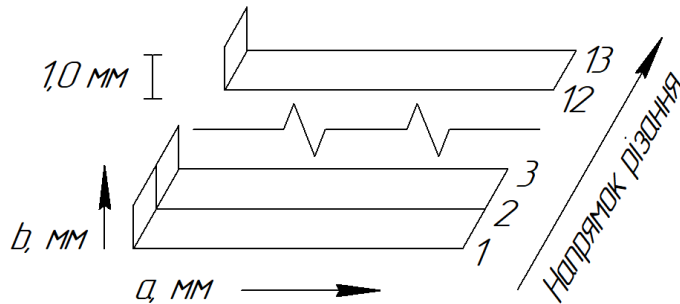


Рис. 2.16 Номінальні площини перетинів зрізів черв'ячно-контурного зубофрезерування
 a – ширина зрізу, мм; b – товщина зрізу, мм; 1...13 – радіальні січні площини.

По вже відомим площинам та чисельним значенням розмірів одиничних зрізів будуються тривимірні графіки. По вісі абсцис графіків вказується номер твірної позиції, по вісі ординат – номер січної площини, а по вісі аплікату, для кожного графіка окремо, – площа поперечного перерізу, ширина, товщина зрізу.

2.2.6.3 Методика визначення енергоємності черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі дослідження процесів формоутворення

Об'єкт дослідження – процес черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Мета дослідження – визначити енергоємність процесу черв'ячно-контурного зубофрезерування на основі отриманих даних дослідження процесів формоутворення.

Методика теоретичного дослідження. Методика дослідження аналогічна описаній для традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування у р. 2.2.5.3, за винятком описаних нижче відмінностей.

Схема утворення крутних моментів різання на шпінделі виробу показана на рис. 2.11. Визначення моменту різання на шпінделі виробу здійснюється по формулі (2.26) у декількох точках при обробці евольвентного профілю з визначенням радіусів кіл, дотичних до векторів сили різання.

Як видно з рис. 2.11, на відміну від традиційного черв'ячного зубофрезерування, плече прикладення сили змінює своє значення під час обробки, тому приймаємо:

$$0,15 < r_o < 1,0. \quad (2.27)$$

Вхідні параметри дослідження – глибина та ширина зрізу, на кожній твірній позиції, отримані в результаті дослідження формоутворення на базі комп'ютерної моделі кінематики зубофрезерування, р. 2.2.6.2.

Вихідні параметри дослідження. Отримані в ході дослідження чисельні значення відносного модуля сили $|F|$ представляються у вигляді графіків – епюрних осцилограм, а енергоємність $|E|$ – чисельним значенням, в умовних одиницях енергоємності.

Вихідні дані дослідження представляються для шпінделя інструменту та шпінделя виробу у формі таблиці, табл. 2.12.

Таблиця 2.12

Найменування параметрів що визначаються	Позначення	Одиниця виміру
Діапазон відносного модуля сили $ F $	$ F_z $	відносні одиниці сили
	$ F_x $	
Діапазон крутних моментів	$M(F_z)$	відносні одиниці
	$M(F_x)$	
Відносний модуль енергозатрат	$ E(M_z) $	відносні одиниці енергоємності
	$ E(M_x) $	

2.3 Програма експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження проводились за наступними напрямками:

- 1) дослідження процесів різання:
 - а) обробка заготовки по обумовленим схемам різання;
 - б) контроль параметрів отриманої поверхні;
- 2) дослідження процесів зубофрезерування в умовах моделювання:
 - а) підготовка заготовок для проведення експерименту;
 - б) налагодження верстату;
 - в) обробка заготовок методами, що моделюють процеси різання;
 - г) контроль параметрів обробленої поверхні;

- д) створення математичної моделі шорсткості поверхні;
- 3) дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування:
 - а) попереднє прорізання западин дисковими фрезами;
 - б) наладка черв'ячно-контурної фрези по попередньо нарізаній впадині;
 - в) обробка заготовок методом черв'ячно-контурного зубофрезерування;
 - г) контроль параметрів отриманих деталей.

2.4 Методика експериментальних досліджень

2.4.1 Методика експериментального дослідження процесів різання

Об'єкт дослідження – процес механічної обробки.

Мета дослідження – визначення впливу схеми різання на напруження в поверхневому шарі обробленої поверхні.

Для проведення дослідів використовувалося описане нижче обладнання.

Верстат. Токарно-гвинторізний верстаті моделі 16К20.

Вимірювальне обладнання. Дослідження отриманих поверхонь проводились на інструментальному мікроскопі БМИ-1.

Непрямолінійність вимірюна за допомогою координатно-вимірювальної машини Carl-Zeiss Contura G2.

Різальний інструмент. Прохідний та підрізний різці з різальними частинами з сплаву Т15К6.

Методика експериментального дослідження. На токарному верстаті послідовно велась обробка заготовки спочатку різцем, ГРК якого дотична до оброблюваної поверхні (рис. 2.17, а), а потім різцем, ГРК якого нормальна до оброблюваної поверхні (рис. 2.17, б).

В якості заготовки використовувалася труба зі сталі 45 ГОСТ 4543-71.

Глибина наклепаного шару визначалась наступним шляхом. Знімалась рентгенограма з наклепаного зразка, потім з цього ж зразка послідовно знімалися невеликі шари шляхом травлення в реактиві; після кожного травлення замірявся знятий шар та знімалась нова рентгенограма. Цей процес тривав до тих пір, поки на рентгенограмі не виходив явний дублет, котрий і

показував, що наклеп повністю знято. Рентгенограми знімались по методу Закса на Co випроміненні.

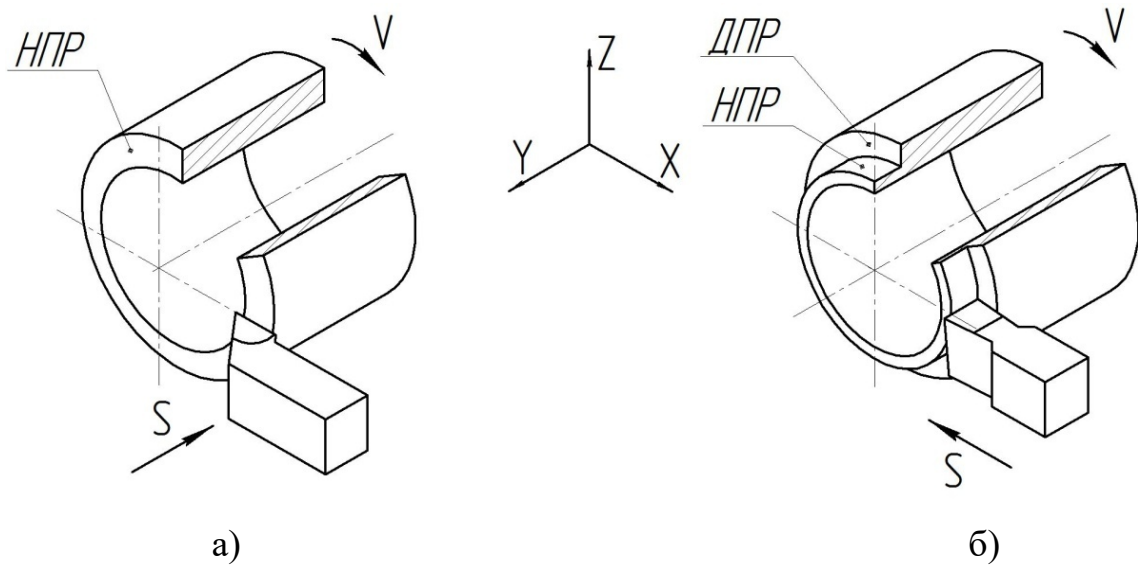


Рис. 2.17 Схеми обробки експериментального зразка

- а) схема різання при дотичній ГРК різця до оброблюваної поверхні;
 б) схема різання при нормальній ГРК різця до оброблюваної поверхні.
 V – головний рух різання; S – подача.

Вхідні та вихідні параметри дослідження зведено у табл. 2.13.

Таблиця 2.13.

Вхідні та вихідні параметри обробки

Параметри обробки						
Вхідні				Вихідні		
Назва	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Назва	Позначення	Одиниця виміру
1. Обробка дотичною ГРК інструменту						
Частота обертів шпінделя	n	об/хв	630	Шорсткість	R_a	мкм
Подача	S	мм/об	0,1	Непрямолінійність	–	мм
Глибина різання	t	мм	4	Глибина наклепу	h	мкм
2. Обробка ГРК інструменту розташованою по нормалі						
Частота обертів шпінделя	n	об/хв	630	Шорсткість	R_a	мкм
Подача	S	мм/об	0,1	Непрямолінійність	–	мм
Глибина різання	t	мм	4	Глибина наклепу	h	мкм

2.4.2 Методика експериментального дослідження процесів різання, які притаманні зубофрезеруванню, в умовах моделювання

2.4.2.1 Методика експериментального дослідження впливу характеру взаємодії ГРК інструменту з оброблюваною поверхнею на точність обробки при фізичному моделюванні процесів

Об'єкт дослідження – процеси різання в умовах фізичного моделювання процесів зубофрезерування.

Мета дослідження – визначення впливу характеру взаємодії ГРК інструменту з оброблюваною поверхнею на точність обробки при фізичному моделюванні процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування та традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування.

Для проведення дослідів використовувалося описане нижче обладнання.

Верстат. Обробка велась на довбальному верстаті моделі 7А420.

Вимірювальне обладнання. Вимір деталі проводився на вимірювальній машині MarForm MMQ 400.

Різальний інструмент. Моделювання виконувалося довбальними різцями з широкою та вузькою ГРК (рис. 2.18), згідно моделі рис. 2.4.

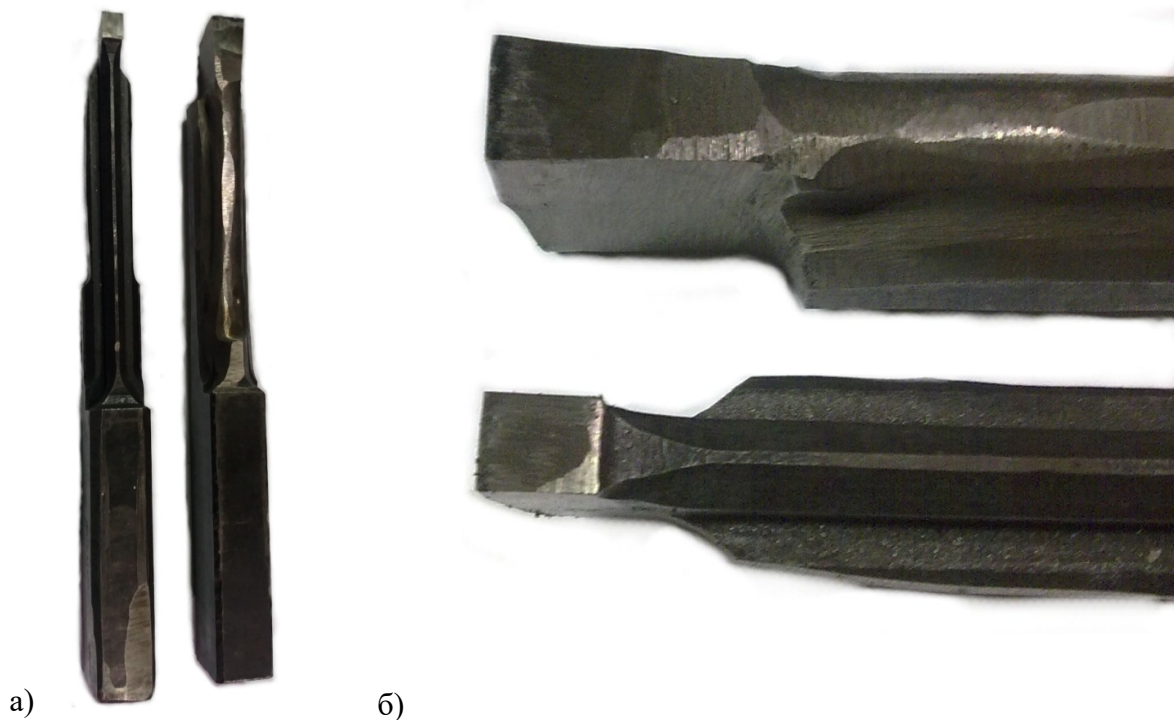


Рис. 2.18 Різці довбальні, що використовувались при моделюванні

а) загальний вид; б) різальна частина

Методика експериментального дослідження. Креслення заготовки приведено на рис. 2.19.

Експеримент проводився для перевірки теорії, що описується в розділі 2.2.4.3. На довбальному верстаті послідовно, за три позиції велась обробка

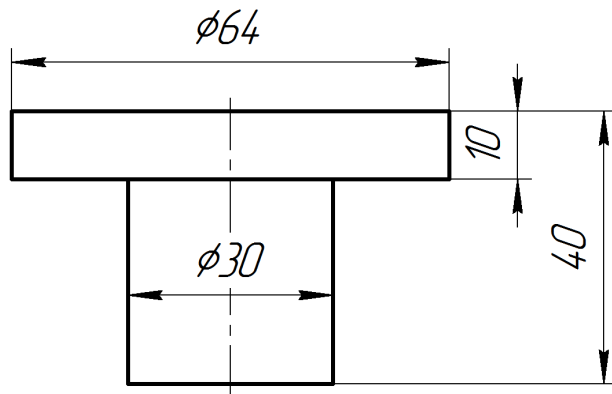


Рис. 2.19 Робоче креслення заготовки для моделювання

заготовки спочатку різцем, ГРК якого дотична до оброблюваної поверхні (рис. 2.20, а), а потім різцем, ГРК якого нормальна до оброблюваної поверхні (рис. 2.20, б). Обробка за схемою рис. 2.20, б виконувалась при різних значеннях колової подачі.

Визначення шорсткості оброблених поверхонь та характеру мікронерівностей виконувалося за допомогою вимірювальної машини Mahr MarForm MMQ 400.

Вхідні параметри дослідження, режими різання та параметри заготовки зведено до таблиць 2.14...2.16.

Таблиця 2.14

Вхідні параметри процесу

Найменування	Позначення відповідно документації	Кількість	Примітки
Різець довбальний ГОСТ 10046-72	2182-0602	1	Рис. 2.18
	2182-0611	1	
Верстат	7A420	1	-
Верстатне пристосування	Патрон трикулачковий	1	-
Заготовка	-	1	Рис. 2.19

Таблиця 2.15

Режими різання

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
Число подвійних ходів	$n_{дв.х}$	хв ⁻¹	63	-
Колова подача	S_k	град°/об	2,5	рис. 2.20, а
			1,5	
			1	
			5,5	рис. 2.20, б

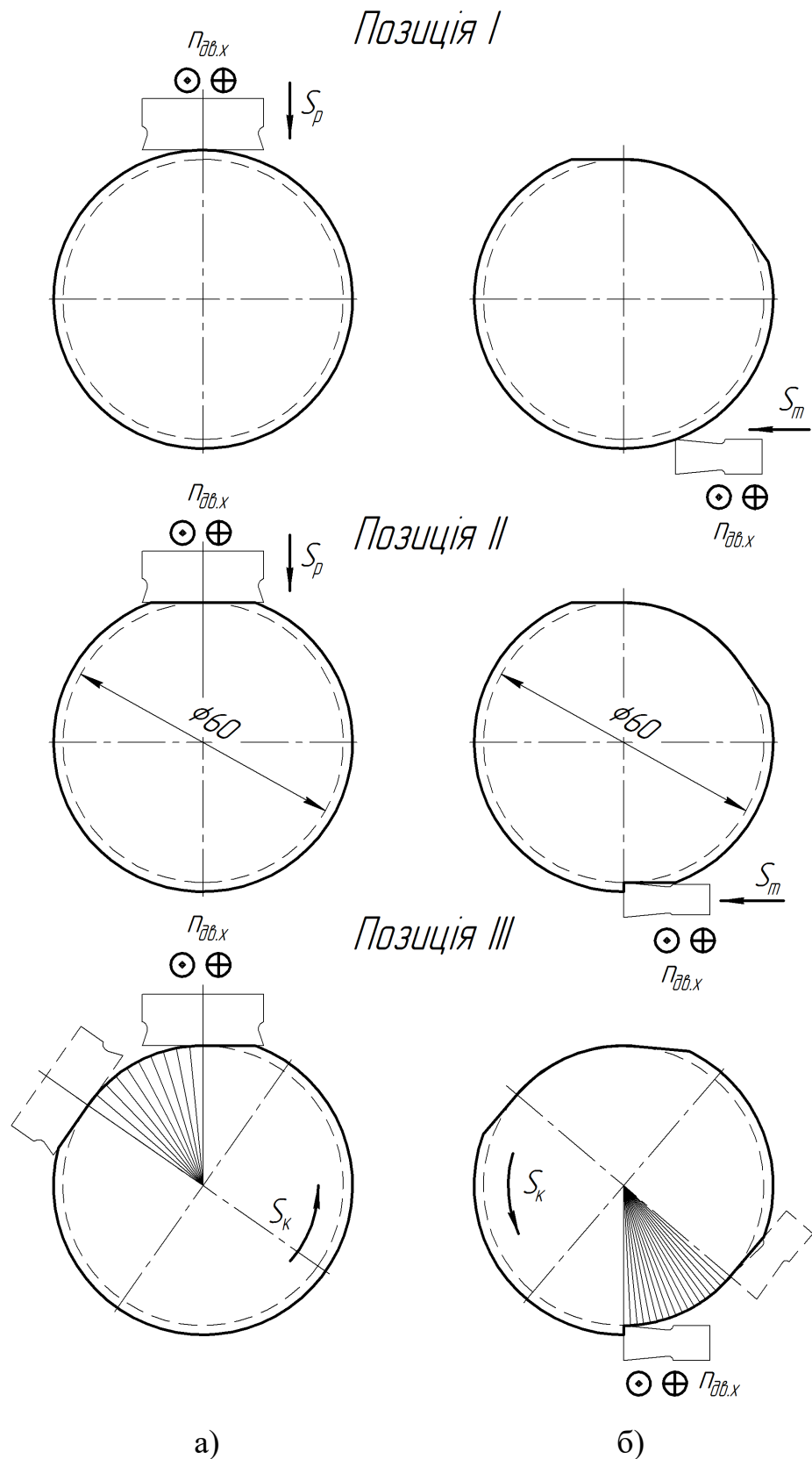


Рис. 2.20 Схеми обробки експериментального зразка при моделюванні

а) схема різання при дотичній ГРК різця до оброблюваної поверхні;

б) схема різання при нормальній ГРК різця до оброблюваної поверхні.

Позиція I - початок врізання;

Позиція II - кінець врізання (вихідне положення для ввімкнення колової подачі);

Позиція III - кінець обробки;

$n_{\text{об.х}}$ – головний рух різання; S_p , S_m , S_k — радіальна, тангенціальна та колова подачі.

Таблиця 2.16

Параметри заготовки

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
Матеріал деталі	Сталь 20 ГОСТ 1050-88	-	-	-
Твердість деталі	НВ	-	130	-
Припуск на діаметр	ΔS	мм	4	-

Вихідні параметри дослідження зведено до табл. 2.17.

Таблиця 2.17

Найменування		Позначення	Одиниця виміру	Засіб контролю
Шорсткість оброблених поверхонь по ISO P468	Повздожж твірної	R_a	мкм	Mahr MarForm MMQ 400
	Повздожж напрямної	R_a	мкм	

2.4.2.2 Методика експериментального дослідження впливу елементів режимів різання на величину шорсткості поверхні

Об'єкт дослідження – процеси різання в умовах моделювання.

Мета дослідження – дослідити вплив елементів режимів різання на величину шорсткості поверхні при розташованій нормально до оброблюваної поверхні ГРК інструменту.

Для проведення досліду використовувалося описане нижче обладнання.

Верстат. Довбальний верстат з ЧПУ CNC-200.

Вимірювальне обладнання. Вимір деталей проводився на координатно-вимірювальній машині Mahr GMX 275.

Різальний інструмент. Різці довбальні, див. рис. 2.18.

Загальні положення. Відомі дослідження [137] впливу елементів режимів різання на величину шорсткості оброблюваної поверхні, які прийняті як припущення для аналізу та проведення експериментального дослідження в умовах моделювання.

Згідно вищезгаданим дослідженням, функціональна залежність між шорсткістю поверхні і незалежними перемінними, що підлягають дослідженню, може бути виражена таким чином:

$$R_a = C \cdot V^p \cdot S^m \cdot t^n \quad (2.28)$$

де, R_a – шорсткість поверхні, мкм;

C – стала;

V, S, t – відповідно швидкість різання, подача і глибина різання;

Рівняння (2.28) можна переписати у формі логарифмічного рівняння:

$$\ln R = \ln C + p \cdot \ln V + m \ln S + n \cdot \ln t \quad (2.29)$$

яке представляє наступну лінійну математичну модель:

$$\eta = \beta_0 x_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \quad (2.30)$$

де η – справжнє значення шорсткості поверхні в логарифмічному масштабі;

$x_0 = 1$ (фіктивна змінна);

x_1, x_2, x_3 – логарифмічні перетворення швидкості різання, подачі і глибини різання;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ – параметри, що підлягають оцінці.

Рівняння (2.30), однак, може бути виражено в наступному вигляді:

$$y - \epsilon = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 \quad (2.31)$$

де y – логарифмічне перетворення вимірюваної величини шорсткості поверхні;

ϵ – експериментальна помилка;

b_0, b_1, b_2, b_3 – відповідні оцінки параметрів $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$.

Коли з'ясувалася недостатність моделі першого порядку для шорсткості, то виявилось можливим уточнити рівняння (2.30) у такий спосіб:

$$\eta = \beta_0 x_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 \quad (2.32)$$

Рівняння (2.32) можливо замінити рівнянням:

$$\hat{y} = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (2.33)$$

де \hat{y} – оцінка шорсткості поверхні в логарифмічному масштабі;

b – являються оцінками значень β .

Оцінки цих останніх параметрів отримуються по методу найменших квадратів за допомогою основної формули виду:

$$\mathbb{b} = (\mathbb{X}^T \mathbb{X})^{-1} \mathbb{X}^T \mathbb{y} \quad (2.34)$$

де \mathbb{b} – матриця оцінок параметра;

\mathbb{X} – розрахункова матриця;

\mathbb{X}^T – транспозиція \mathbb{X} ;

\mathbb{y} – матриця вимірних величин шорсткості поверхні в логарифмічному масштабі.

Опис процесу моделювання. Моделювання відбуватиметься в умовах довбання, згідно рис. 2.20, б. Адекватність обраної схеми довбання процесу черв'ячно-контурного зубофрезерування описана у р. 2.2.4.1.

Методика експериментального дослідження. Матриця \mathbb{X}_1 для планованого експерименту може бути записана в наступному вигляді:

Експеримент №:	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0

$$\mathbb{X}_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Для розробки моделі першого порядку для шорсткості поверхні планувалося проведення 12 експериментів [4, 35, 88]. Вісім експериментів представляють собою багатофакторний комплекс 2^3 і можуть бути зображені у вигляді вершин куба. Чотири експерименти відносяться до центральної точки куба, яка повторюється чотири рази для оцінки частоті помилки. Планування експерименту передбачало три рівні для кожної незалежної змінної: закодовані «-1» для низького рівня, «0» – для основного (центрального) рівня і «+1» для високого рівня.

Експерименти необхідно провести двома блоками по 6 дослідів. У першому блоці будуть досліді 1, 4, 6, 7, 11 і 12, а в другому – досліді 2, 3, 5, 8, 9 і 10.

Для розробки моделі другого порядку необхідно провести 12 додаткових дослідів, що утворюють композиційний центральний комплекс. Додаткові 12 дослідів проводяться також двома блоками, причому перший блок включає досліді 13, 14, 15, 16, 17 і 18, а другий – всі інші. Досліді, включені в кожен з нових блоків, аналогічні один одному, з тим щоб підвищити точність оцінки параметрів. Заплановані 24 експерименти охоплюють по 5 рівнів для кожної незалежної змінної, як це показано в табл. 2.18.

Таблиця 2.18.

Рівень	Швидкість різання, м/хв	Колова подача, мм/подв.хід	Глибина різання, мм	Кодування
Нижчий	92	0,12	0,336	$-\sqrt{2}$
Низький	103	0,16	0,533	-1
Основний	133	0,23	0,736	0
Високий	173	0,358	1,015	1
Вищий	192	0,435	1,154	$\sqrt{2}$

Експериментальні умови кодуються для зручності ідентифікації і для полегшення розрахунків. Зразок кодування для швидкості різання приведено в табл. 2.19.

Таблиця 2.19.

Змінна	Ln103	Ln133	Ln173
Код	-1	0	1

Приклад кодування швидкості різання дає формула:

$$x_1 = \frac{(\ln V - \ln 133)}{(\ln 173 - \ln 133)} \quad (2.35)$$

Аналогічно подача та глибина різання кодуються по формулах:

$$x_2 = \frac{(\ln f - \ln 0,23)}{(\ln 0,358 - \ln 0,23)} \quad (2.36)$$

$$x_3 = \frac{(\ln d - \ln 0,736)}{(\ln 1,015 - \ln 0,736)} \quad (2.37)$$

Вхідні параметри дослідження. Закодована матриця експерименту приведена в табл. 2.20.

Таблиця 2.20

Експериментальні умови

Експеримент №	Швидкість різання, м/хв	Подача, мм/подв. хід	Глибина різання, мм	Кодування		
				x_1	x_2	x_3
1	106	0,16	0,533	-1	-1	-1
2	173	0,16	0,533	1	-1	-1
3	106	0,358	0,533	-1	1	-1
4	173	0,358	0,533	1	1	-1
5	106	0,16	1,015	-1	-1	1
6	173	0,16	1,015	1	-1	1
7	106	0,358	1,015	-1	1	1
8	173	0,358	1,015	1	1	1
9	133	0,23	0,736	0	0	0
10	133	0,23	0,736	0	0	0
11	133	0,23	0,736	0	0	0
12	133	0,23	0,736	0	0	0
13	92	0,23	0,736	$-\sqrt{2}$	0	0
14	192	0,23	0,736	$\sqrt{2}$	0	0
15	133	0,12	0,736	0	$-\sqrt{2}$	0
16	133	0,435	0,736	0	$\sqrt{2}$	0
17	133	0,23	0,336	0	0	$-\sqrt{2}$
18	133	0,23	1,154	0	0	$\sqrt{2}$
19	92	0,23	0,736	$-\sqrt{2}$	0	0
20	192	0,23	0,736	$\sqrt{2}$	0	0
21	133	0,12	0,736	0	$-\sqrt{2}$	0
22	133	0,435	0,736	0	$\sqrt{2}$	0
23	133	0,23	0,336	0	0	$-\sqrt{2}$
24	133	0,23	0,154	0	0	$\sqrt{2}$

Оброблятимуться заготовки з холоднокатаної сталі 20 ГОСТ 1050-80, ескіз приведено на рис. 2.19.

Вихідні параметри дослідження:

- 1) математична модель шорсткості обробленої поверхні;
- 2) графіки поверхні відгуку створеної математичної моделі.

2.4.3 Методика експериментального дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування

Об'єкт дослідження – процес формоутворення при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні.

Мета дослідження – перевірка схеми формоутворення евольвентних профілів черв'ячно-контурною фрезою. Перевірка доцільності обраної конструкції інструменту і геометрії РК.

Для проведення досліду використовувалося описане нижче обладнання.

Верстат. Обробка велась на зубофрезерному верстаті моделі 53А30П інв. №05459 на підприємстві АТ «Гідросила».

Різальний інструмент. Обробка велась черв'ячно-контурною фрезою $m = 5$, креслення якої представлено на рис. 2.21, а, зовнішній вигляд виготовленого зразка на рис. 2.21, б.

Вимірювальне обладнання. Вимірювання деталі проводилось на координатно-вимірювальній машині Mahr GMX 275.

Методика експериментального дослідження. Заготовки для проведення експерименту виготовлялися з алюмінієвого сплаву АК5М2 ГОСТ 1583-93. Рішення по вибору матеріалу було прийнято з огляду легкої оброблюваності і пластичності алюмінієвих сплавів (що може бути важливо для вивчення процесів різання по стружкоутворенню).

Креслення заготовки, напівфабрикату (заготовка після першого проходу) та готової деталі приведено на рис. 2.22.

Налагодження черв'ячно-контурної фрези виконувалося по готовій деталі (еталону), методику процесу приведено у додатку А.

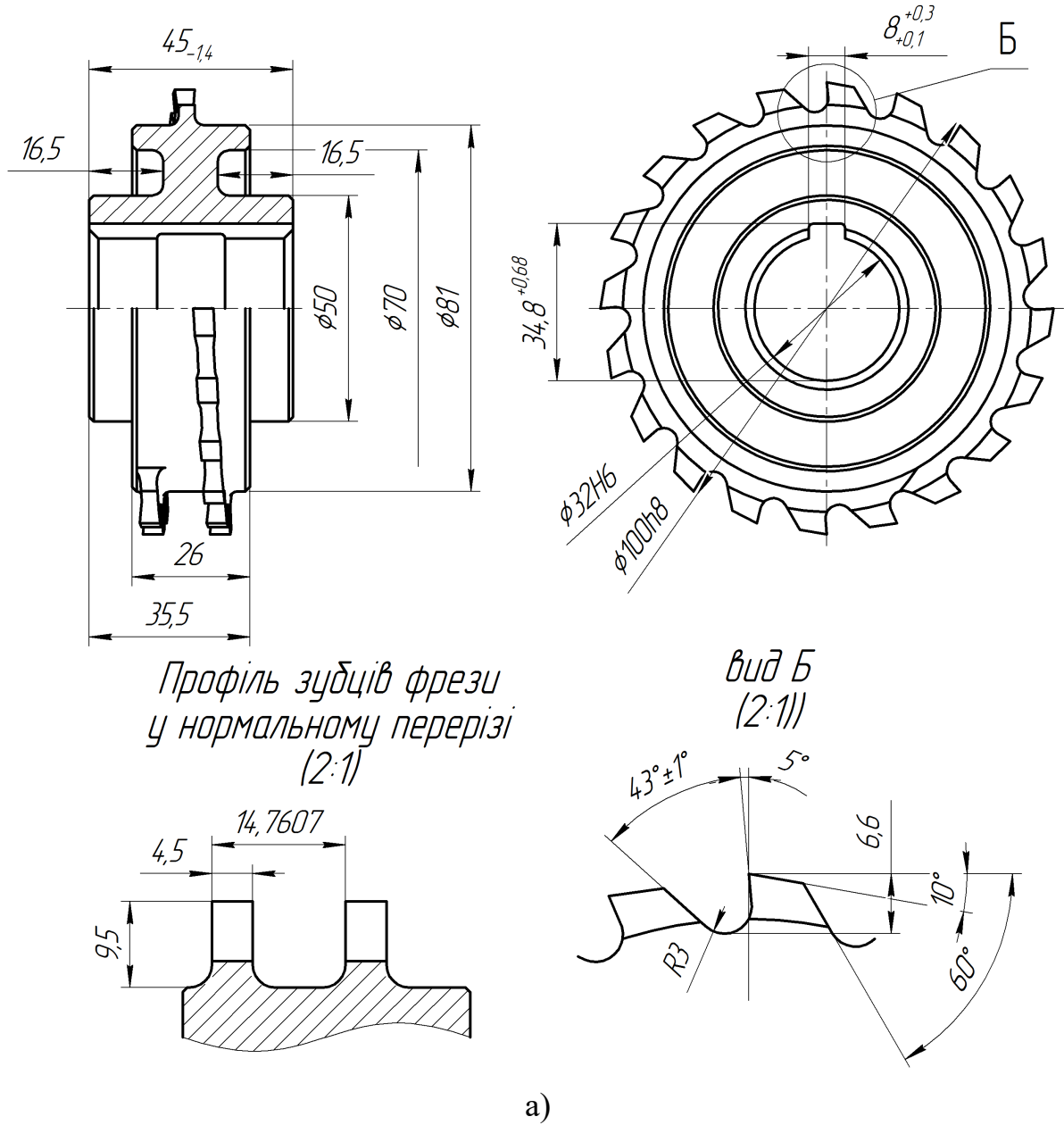


Рис. 2.21 Черв'ячно-контурна фреза

а) креслення черв'ячно-контурної фрези; б) експериментальний зразок.

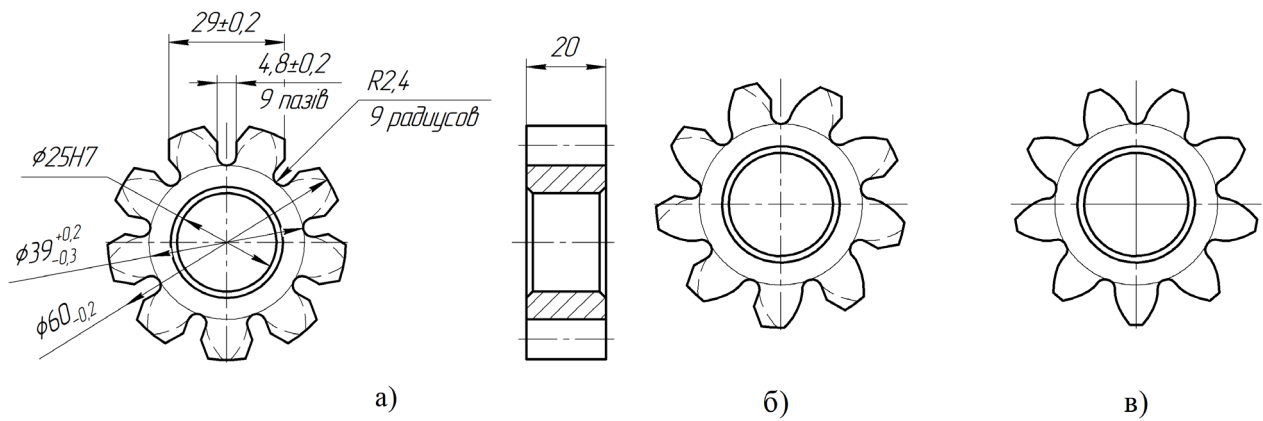


Рис. 2.22 Робочі креслення заготовки

а) заготовка; б) заготовка після першого проходу; в) готова деталь

Вхідні параметри дослідження, режими різання, параметри заготовки та параметри фрези зведено до таблиць 2.21...2.24.

Таблиця 2.21

Загальні параметри процесу

Найменування	Позначення відповідно документації	Кількість	Примітки
Фреза черв'ячно-контурна	ЧК5	1	Рис. 2.21
Верстат	53А30П	1	інв. № 05459
Оправка для закріплення заготовки	-	1	-
Заготовка	-	2	Рис. 2.22, а
Фіксатор	-	1	Додаток А

Таблиця 2.22

Параметри заготовки

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
Матеріал деталі	АК5М2 ГОСТ 1583-93	-	-	-
Твердість деталі	НВ	-	68	-
Число зубців деталі	z_d	шт	9	-
Модуль	m	мм	5	-
Припуск на товщину зубця	ΔS	мм	2	-

Таблиця 2.23

Режими різання

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
Швидкість різання	V	м/хв	19,78	-
Частота обертів шпинделя	$n_{ш}$	хв ⁻¹	63	-
Осьова подача	S_o	мм/об. дет	0,63	-
Довжина загальної нормалі	W_n	мм	27,85 ^{-0,07}	-

Таблиця 2.24

Параметри фрези

Найменування	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	Примітки
1	2	3	4	5
Матеріал	P6M5 ГОСТ 19265-73	-	-	-
Твердість	HRC	-	62-64	-
Діаметр	D_f	мм	100	-
Число зубців	z_f	шт	20	-
Модуль	m	мм	5	-
Число заходів	k	-	1	-
Напрямок витків	правий	-	-	-
Кут підйому витків	ϕ	град	2°41"	-
Осьовий крок	P_o	мм	14,7607	-
Головний задній кут	α	град	10	-
Головний передній кут	γ	град	5	-

Вихідні параметри дослідження зведено до таблиці 2.25.

Таблиця 2.25

Найменування		Позначення	Одиниця виміру	Засіб контролю
Шорсткість оброблених поверхонь по ISO P468	Повздож твірної	R_a	мкм	Профілограф MahrSurf PS1
	Повздож напрямної	R_a	мкм	
По DIN 3962	Похибка профілю	f_{fa}	мкм	Координатно-вимірвальна машина MAHR GMX 275
	Похибка напрямку профілю	f_{Ha}		
	Похибка напрямку зубця	F_β		
	Накоплена похибка кроків	F_p		
	Радіальне биття зубчатого вінця	F_r		

2.5 Висновки по розділу

1. Описано методики теоретичного дослідження енергоємності традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування та черв'ячно-контурного зубофрезерування. Введено та обґрунтовано поняття твірної позиції, коефіцієнту рівня ефективності сили різання та коефіцієнту відносних енергозатрат.

2. Наводиться методика теоретичного дослідження шляхів зменшення спотворень геометричної форми обробленої поверхні шляхом зміни схеми різання. Методика заснована на визначенні поверхонь різання по характеру взаємодії їх з різальною кромкою інструмента та оперує поняттями теорії опору матеріалів.

3. Представлена методика теоретичного дослідження впливу зазорів на кінематичну точність ділильних ланцюгів столів зубофрезерних верстатів.

4. Визначені загальні вимоги до процесів моделювання, які забезпечують адекватність процесів моделювання реальним процесам зубофрезерування з наведенням схем різання в умовах довбання різцем.

5. В умовах моделювання розглянута методика визначення впливу похибок інструменту на точність обробки при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні. Використані відомі математичні моделі процесу нарізання зубчастих коліс.

6. Наведена методика експериментального дослідження формоутворення евольвентного профілю при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні. Описано конструкцію експериментального зразка фрези, вхідні та вихідні параметри дослідження та методика налагодження фрези по попередньо обробленій деталі.

7. Описано методику експериментального дослідження впливу схеми різання на напруження у поверхневому шарі обробленої поверхні. Методика теоретичного дослідження впливу схеми різання приведена у р. 2.2.2.3.

8. Розглянута методика експериментального дослідження впливу характеру взаємодії ГРК інструменту з оброблюваною поверхнею на точність в умовах фізичного моделювання процесів (довбання різцем).

9. Наводиться методика дослідження впливу елементів режимів різання на величину шорсткості поверхні в умовах моделювання. Описані умови багатофакторного експерименту, рівні незалежних змінних та приведена матриця експерименту.

2.6 Рекомендації

Провести теоретичні та експериментальні дослідження процесів зубофрезерування згідно наведених методик.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

3.1 Визначення можливих варіантів системи взаємодії різальної кромки і оброблюваної поверхні

Утворення евольвентної поверхні на зубчатому колесі, будь яким способом, має один загальний для всіх видів обробки признак – реальна поверхня являється наближенням до геометричної поверхні. Таким чином, для утворення поверхні, насамперед, необхідні геометричні твірні лінії [91].

Традиційне черв'ячне зубофрезерування відбувається в умовах утворення ОП як множини дотичних до теоретичного евольвентного профілю. Обумовлені дотичні мають різну довжину контакту з оброблюваним профілем, яка залежить від значень припуску на обробку при формоутворюючих проходах.

Альтернативою способу утворення профілю шляхом суми дотичних може бути спосіб, при якому профіль утворюється множиною геометричних точок, які є проекціями нормалей до теоретичного евольвентного профілю.

Отже, розглянемо випадки коли РК інструменту розміщена дотично до оброблюваної поверхні, або по нормалі до неї, як показано на рис. 3.1. Обидва способи можуть бути принципово різними по впливу на оціночні показники процесу формоутворення евольвентного профілю.

Як видно з рис. 3.1, а, традиційне чистове черв'ячне зубофрезерування являє собою спосіб, при якому дві суміжні РК зубця інструмента розміщені дотично до оброблюваної поверхні, а ПР співпадає з оброблюваною поверхнею.

На рис. 3.1, б приведено приклад взаємодії, при якій РК розташована по нормалі до ОП.

На основі цих положень, задаємося визначеннями взаємодії РК і ОП:

- **профільна взаємодія** – взаємодія, при якій РК інструменту дотична до оброблюваної поверхні;
- **контурна взаємодія** – взаємодія, при якій РК інструменту розташована по нормалі до оброблюваної поверхні.

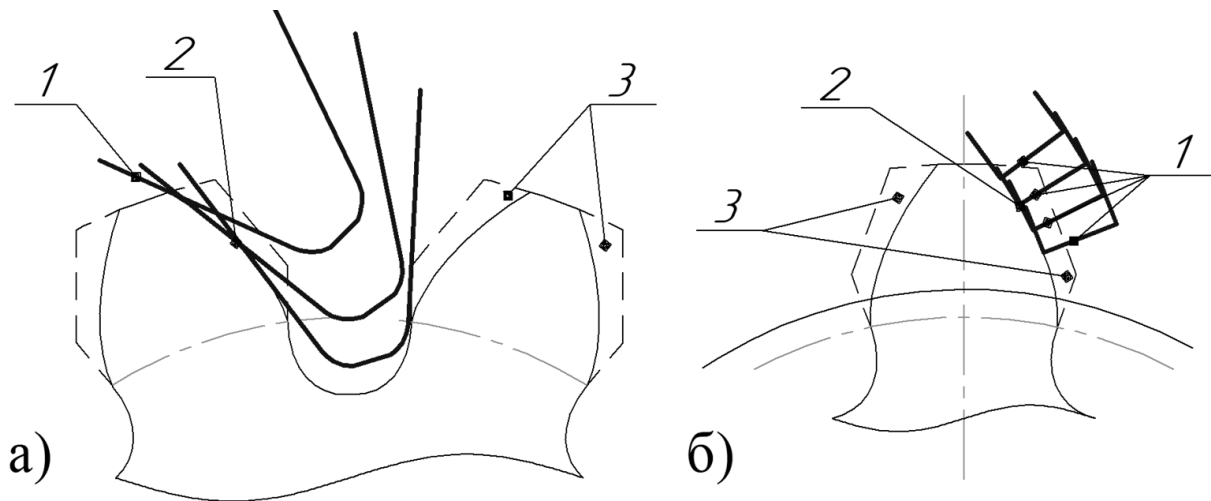


Рис. 3.1 Можлива взаємодія РК інструменту та ОП

а) РК інструмента дотична до ОП; б) РК розташована по нормалі до ОП.
1 – РК інструменту; 2 – оброблюваний евольвентний профіль; 3 – припуск на обробку.

Рівняння евольвенти в параметричній формі має вигляд [14]:

$$y = r \cdot \sin \varphi - r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi \quad (3.1)$$

$$x = r \cdot \cos \varphi + r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi,$$

де r – радіус основного кола;

φ – кут розгорнутості евольвенти.

Визначення дотичних та нормалей здійснюється шляхом диференціювання даного рівняння. Після диференціювання отримуємо:

- рівняння дотичної до евольвенти:

$$\frac{y - (r \cdot \sin \varphi - r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi)}{r \cdot \cos \varphi + r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi} - \frac{x - (r \cdot \cos \varphi + r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi)}{-r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi} = 0, \quad (3.2)$$

- рівняння нормалі до евольвенти:

$$\begin{aligned} &(-r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi) \cdot (X - r \cdot \cos \varphi - r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi) + \\ &+(r \cdot \cos \varphi + r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi) \cdot (Y - r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi) = 0, \end{aligned} \quad (3.3)$$

де X, Y – поточні координати точки дотичних чи нормалей, які визначають розміри поверхні різання.

На рис. 3.2 наведені схеми утворення дотичних та нормалей.

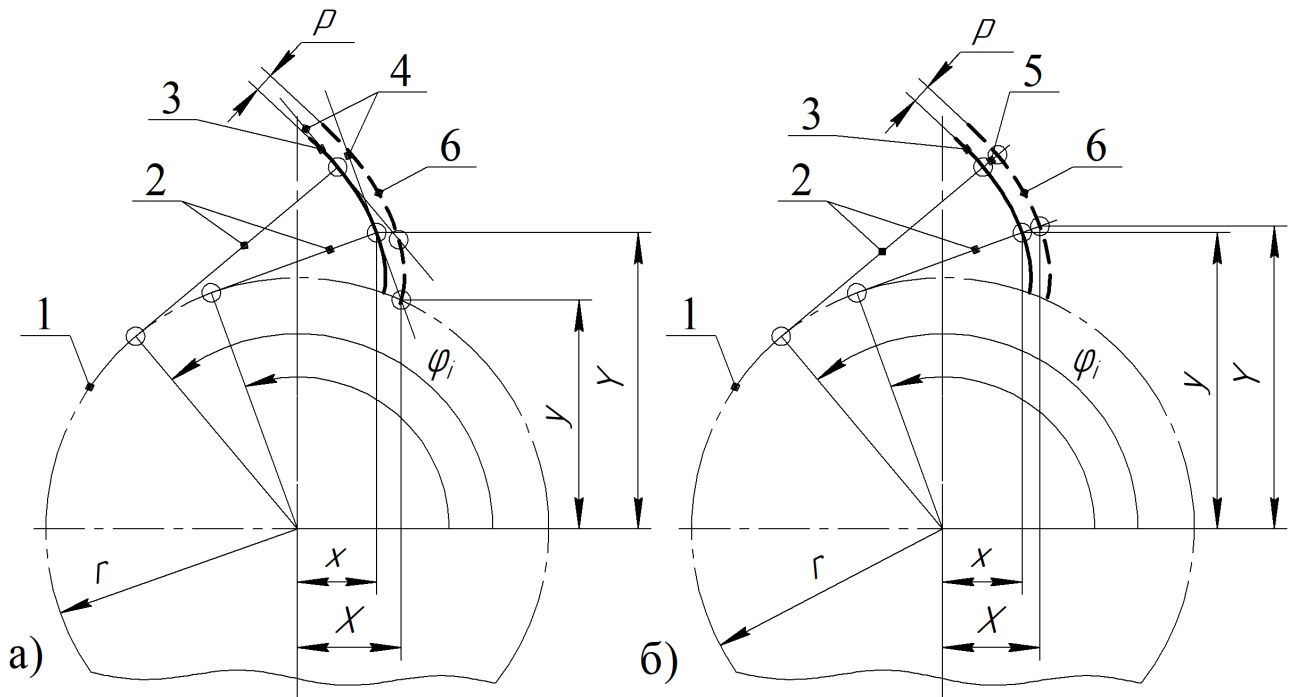


Рис. 3.2 Схема утворення евольвентного профілю

а) методом дотичних; б) методом нормалей;

1 – основне коло; 2 – нормалі до евольвентного контуру; 3 – теоретична евольвента;
4 – дотичні до теоретичного контуру, які формують оброблену поверхню, що співпадає з
поверхнею різання; 5 – нормалі до теоретичного контуру, які формують поверхню різання;
6 – контур до обробки;

X, Y – координати точок, які лежать на продовженнях дотичних 2 до основного кола 1;
 x, y – координати точок евольвенти; r – радіус основного кола; p – припуск на обробку.

Визначення довжини дотичної поз. 4 відповідно до формули (3.2):

$$Y - y \approx \frac{[X - (r \cdot \cos \varphi - r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi)] \cdot (r \cdot \cos \varphi - r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi)}{r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi} - r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi, \quad (3.4)$$

де φ змінюється від значень $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = \varphi_{max}$.

Визначення довжини нормалі поз. 5 не потребує математичних перетворень, тому що вона дорівнює припуску на обробку p .

При використанні в якості РК дотичної поз. 4, значення її довжини $Y - y$, а також зміна цього значення мають суттєвий вплив на силу різання F_z , та коливання цієї сили в межах кута $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = \varphi_{max}$.

При використанні в якості РК продовження нормалі поз. 5, зміни її довжини відбуваються в межах коливання припуску на обробку p , тобто в

незначних межах. Таке положення РК може сприяти стабілізації сил різання, і як результат підвищити геометричну точність обробленої поверхні.

3.2 Аналіз взаємодії різальної кромки та оброблюваної евольвентної поверхні при черв'ячному зубофрезеруванні

Для аналізу взаємодії приймаємо ряд припущень:

- 1) РК може бути розміщена дотично до оброблюваної евольвентної поверхні і переміщується огинаючи вищезгадану поверхню;
- 2) РК може бути розміщена нормально до оброблюваної поверхні і являє собою подовження радіусів кривизни евольвенти, та переміщується огинаючи вищезгадану поверхню;
- 3) вектори переміщення РК, в обох випадках, розміщені перпендикулярно до неї;
- 4) оброблювана поверхня переміщується одночасно в напрямку двох взаємно перпендикулярних векторів, тобто:
 - в напрямку обертання оброблюваної евольвентної поверхні навколо власної геометричної вісі – тангенціальне переміщення S_t ;
 - в напрямку перпендикулярному до обертання оброблюваної евольвентної поверхні навколо власної геометричної вісі – радіальне переміщення S_r ;
- 5) вектори п. 3) та п. 4) взаємодіють (складаються) лише при їх взаємній паралельності, або близькості до неї;
- 6) вектори п. 3) та п. 4) не можуть взаємодіяти (складатись) при їх взаємній перпендикулярності, або близькості до неї;
- 7) при співпадінні напрямлень векторів п. 5), їх взаємодія визначається як попутна;
- 8) при не співпадінні напрямлень векторів п. 5), їх взаємодія визначається як зустрічна.

Відповідно до прийнятих припущень розглядаємо схеми взаємодії РК інструменту та оброблюваної евольвентної поверхні, рис. 3.3...3.5.

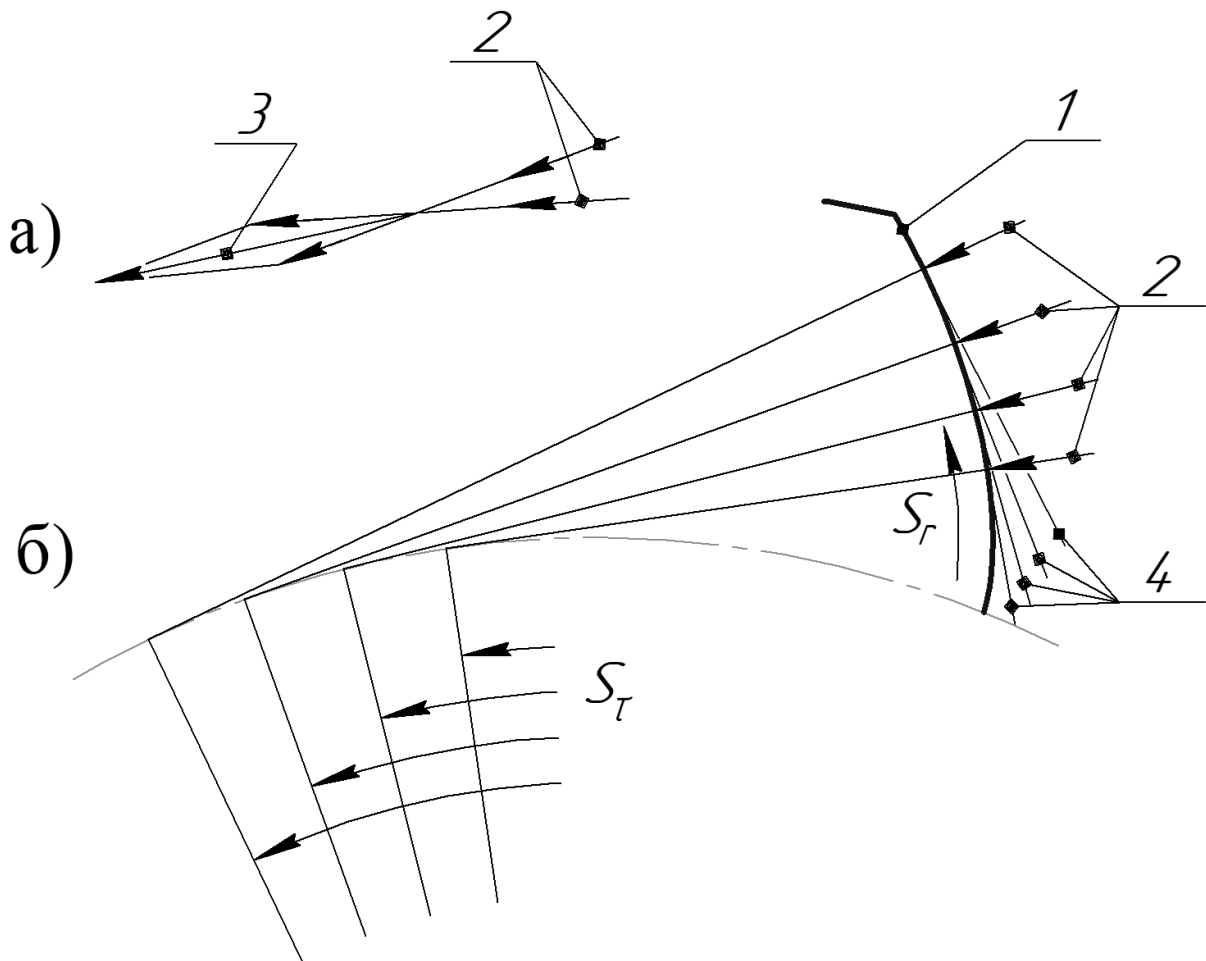


Рис. 3.3 Схема взаємодії дотичної різальної кромки та оброблюваного евольвентного профілю, наприклад лівого

- а) векторний багатокутник; б) схема розміщення векторів;
 1 – оброблюваний евольвентний профіль; 2 – вектори переміщення різальної кромки;
 3 – рівнодіюча векторів переміщення різальної кромки; 4 – послідовні положення різальної кромки;
 S_t – вектор тангенціального переміщення оброблюваної поверхні;
 S_r – вектор радіального переміщення оброблюваної поверхні.

Як видно зі схеми рис. 3.3, взаємодіючими векторами є S_t та рівнодіюча векторів переміщення РК поз. 3. Напрямки їх співпадають, внаслідок чого можна зробити висновок, що вони утворюють попутну взаємодію.

На схемі рис. 3.4 взаємодіючими векторами є S_t та рівнодіюча векторів переміщення РК поз. 3. Напрямки їх не співпадають, внаслідок чого можна зробити висновок, що вони утворюють зустрічну взаємодію.

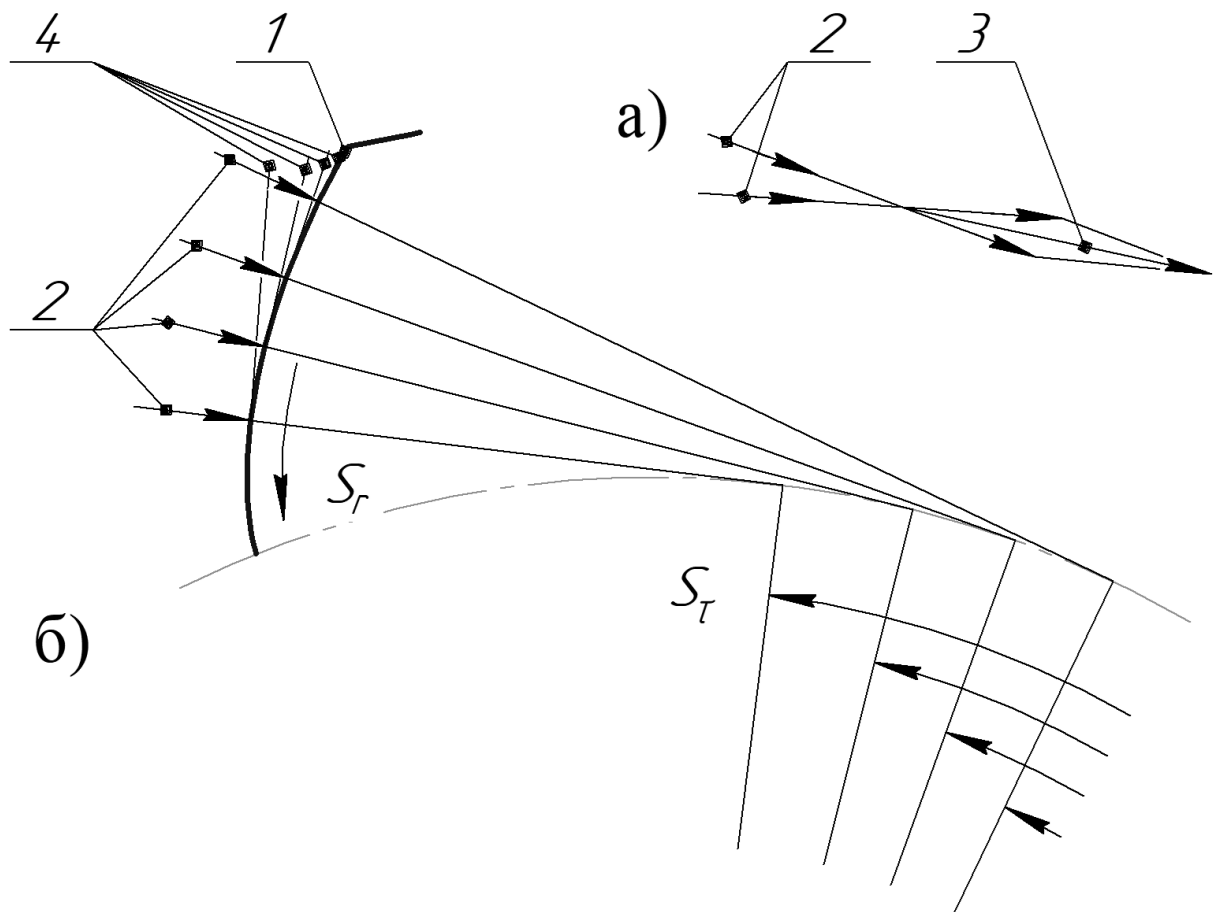


Рис. 3.4 Схема взаємодії дотичної різальної кромки та оброблюваного евольвентного профілю, наприклад правого

- а) векторний багатокутник; б) схема розміщення векторів;
 1 – оброблюваний евольвентний профіль; 2 – вектори переміщення різальної кромки;
 3 – рівнодіюча векторів переміщення різальної кромки; 4 – послідовні положення різальної кромки;
 S_T – вектор тангенціального переміщення оброблюваної поверхні;
 S_r – вектор радіального переміщення оброблюваної поверхні.

На схемі рис. 3.5 взаємодіючим вектором є вектор переміщення РК поз. 1 та вектор радіальної подачі S_r .

Наявність різновидів взаємодії по різнойменним профілям (див. рис. 3.3, рис. 3.4), вірогідно може утворювати різні умови стружкоутворення і, як наслідок, різні відхилення геометричної форми обробленої поверхні.

Схема, представлена на рис. 3.5, позбавлена недоліків попередніх схем взаємодії, забезпечує ідентичні умови взаємодії РК інструменту та оброблюваної поверхні, що дає можливість зробити припущення про ідентичність геометричної форми обох профілів.

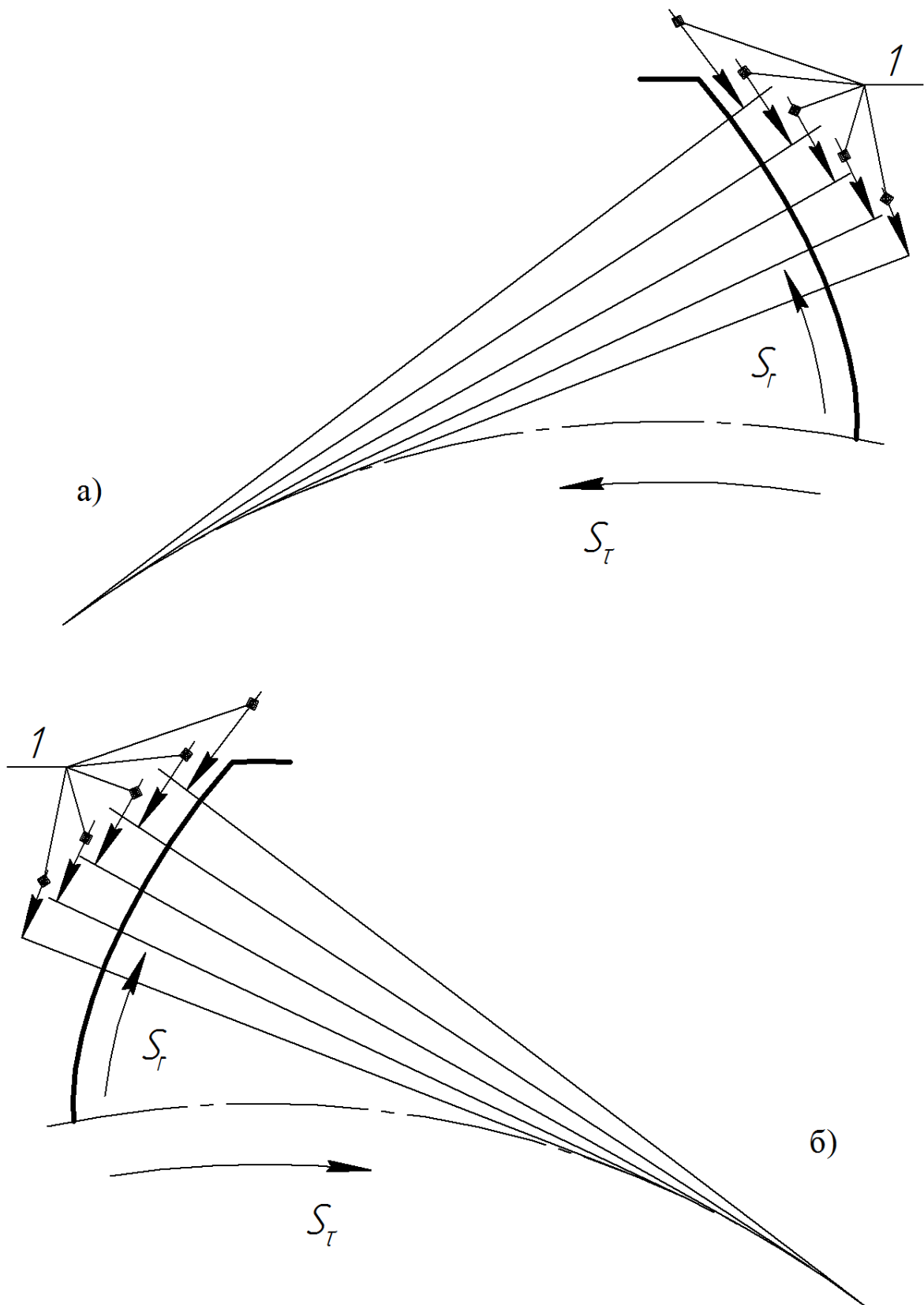


Рис. 3.5 Схема взаємодії нормально розміщеної різальної кромки

та евольвентної оброблюваної поверхні

а) лівий профіль; б) правий профіль

1 – вектори переміщення різальної кромки

3.2.1 Аналіз можливостей зменшення напружень в поверхневому шарі обробленої поверхні внаслідок зміни схеми різання

Методика дослідження описана у р. 2.2.3.1.

Для визначення відносної різниці в напруженнях які виникають на НПР та ДПР достатньо в формули (2.2) та (2.3) підставити значення граничних напружень $\sigma_{ст}$ та $\tau_{зс}$.

Визначаємо загальні напруження, які виникають на НПР і ДПР:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{300^2 + 4 \times 120^2} = 384,187 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{120^2 + 120^2} = 169,706 \text{ МПа}.$$

Як видно із розрахунків, відносна різниця в напруженнях на НПР та ДПР може досягати 2,25 разів.

Відносно до виникаючих напружень в поверхневому шарі НПР, при термічній обробці відбувається зняття вищезгаданих напружень. Зняття напружень супроводжується пластичною деформацією поверхні, що змінює її геометричну форму і розміри.

Якщо НПР суміщена з функційною поверхнею, то виникаюча зміна геометричної форми і розмірів є неприйнятна для умов експлуатації.

Наприклад, відомі факти про зміну геометричної точності функційної поверхні на 2...3 квалітети зняттям напружень при термічній обробці [18, 39].

Таким чином, можна зробити висновок про необхідність відокремлення НПР та функційної поверхні і при можливості суміщення функційної поверхні з ДПР. Якщо перенести зроблені висновки до аналізу методів обробки евольвентних зубчастих поверхонь, то виникає можливість розгляду принципово нових схем.

Як відомо, обробка евольвентної поверхні деталей типу зубчасте колесо методами черв'ячного зубофрезерування та довбання дисковими довбачами ведеться при відносно значних силах різання [2, 9, 27, 48, 83, 85, 86, 103, 122, 130]. РК інструменту, в обох випадках, дотична до евольвентної поверхні яка являється НПР, що викликає нормальні напруження в поверхневому шарі. При

подальшій термообробці має місце зняття напружень та спотворення геометричної форми евольвентної поверхні.

Враховуючи сказане вище, доцільно розглянути можливість створення способу обробки евольвентних поверхонь зубців зубчастих коліс, при якому функційна евольвентна поверхня буде суміщена з ДПР, що виключить виникнення нормальних напружень в поверхневому шарі. Схема можливої реалізації такого способу представлена на рис.3.6, б.

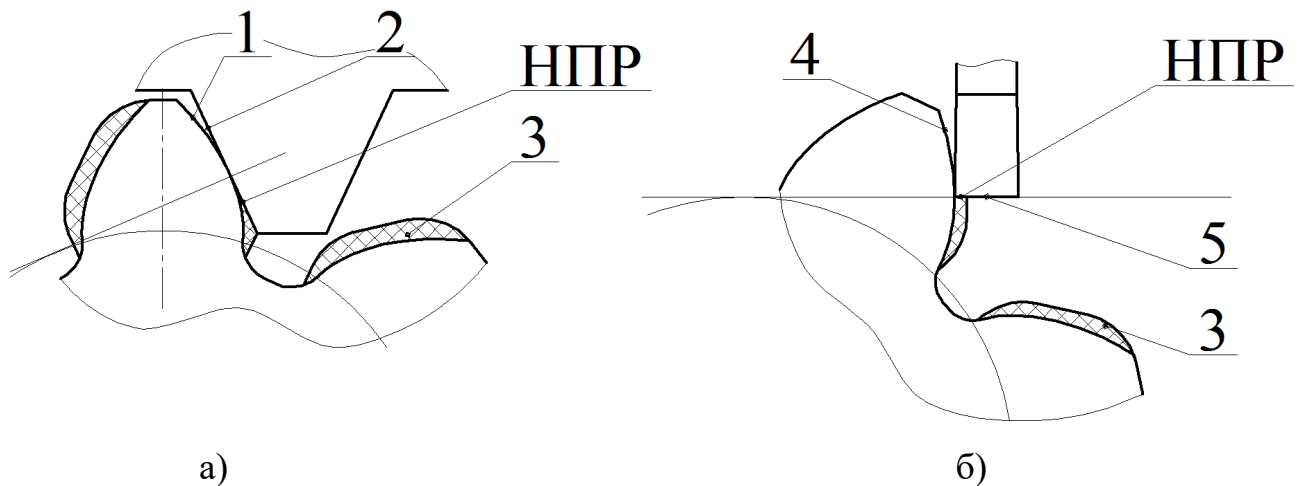


Рис. 3.6 Схеми взаємодії РК та ОП при зубофрезеруванні

- а) схема обробки при якій НПР суміщена з функційною поверхнею;
 б) схема обробки при відокремленні функційної поверхні від НПР.

1 – функційна евольвентна поверхня яка суміщена з НПР; 2 – контур ГРК інструмента який взаємодіє з НПР; 3 – припуск; 4 – функційна евольвентна поверхня яка суміщена з ДПР; 5 – контур ГРК інструмента який взаємодіє з НПР

На рис. 3.6, а показано традиційне чистове черв'ячне зубофрезерування. Як видно, НПР суміщена з функційною поверхнею, що є причиною описаних вище недоліків.

На схемі рис. 3.6, б представлено випадок, в якому обробка евольвентної поверхні здійснюється інструментом, РК якого переміщується повздовж оброблюваної поверхні по еквідістантному контуру. ГРК інструменту розташована по нормалі до оброблюваної поверхні, внаслідок чого відбувається розділення обробленої поверхні та поверхні різання.

3.2.2 Аналіз можливостей підвищення точності за рахунок адекватності процесів різання по різнойменних профілях

Методика дослідження описана у р. 2.2.3.2.

Як видно з рис. 2.2, лівий профіль деталі обробляється в умовах силового розмикання (рис. 2.2, а), а правий – в умовах силового замикання (рис. 2.2, в). У момент, коли зубець черв'ячної фрези працює двома бічними РК, кінематична пара перебуває у невизначеному положенні (рис. 2.2, б).

Так як сила різання при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні діє по нормалі до РК, що розташована дотично до оброблюваної поверхні (профільна взаємодія), то при будь-якому положенні інструменту в процесі різання плече прикладення сил буде однакове.

Характерна для черв'ячного зубофрезерування перемінність сили різання по напрямку дії на привод верстату, що викликає, зокрема, силове розмикання черв'ячної пари (рис. 2.2, а), стає причиною накопиченої похибки кроку деталі. В умовах знакозмінних навантажень, що завжди мають місце при обробці замкнених контурів, наявність неконтрольованих зазорів має суттєвий вплив на точність обробки, приводить до нестійкості процесу та виникнення коливань.

Обробку евольвентної поверхні інструментом, РК якого переміщується повздовж оброблюваної поверхні по еквідістантному контуру та розташована по нормалі до оброблюваної поверхні показано на рис. 2.3.

Особливість методу зубофрезерування, а саме розташована по нормалі до оброблюваної поверхні РК (контурна взаємодія), змінює напрямок сили різання відносно деталі, у свою чергу, змінюючи розмір плеча. Для даного методу наявна перемінність сили різання по величині моменту, що діє на привод верстату, але відсутня зміна вектора сил при обробці різнойменних профілів, тобто не відбувається силового розмикання черв'ячної ділильної пари. Також, при обробці, черв'ячне ділильне колесо працює правими та лівими профілями послідовно.

Порівняння вищеописаних методів по відносному часу роботи при силовому замиканні приведено на рис. 3.7.

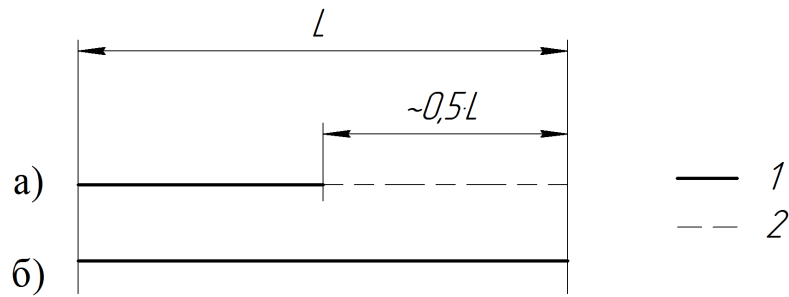


Рис. 3.7 Схема роботи черв'ячної ділильної пари при обробці однієї западини

- а) методом традиційного черв'ячного зубофрезерування;
 б) методом з розташованою по нормалі до оброблюваної поверхні різальною кромкою;
 1 – робота в умовах силового замикання; 2 – робота в умовах силового розмикання;
 L – довжина активної частини лінії зачеплення при чистовому зубофрезеруванні.

Як видно з схеми (рис. 3.7), при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні лише один профіль зубчастого вінця оброблюється в умовах силового замикання та не піддається супутнім похибкам (відхилення евольвентного профілю оброблюваного колеса), в той час як при методі з розташованою по нормалі до оброблюваної поверхні різальною кромкою обидва профілі обробляються в умовах силового замикання.

Для компенсації зазорів, що виникають при силовому розмиканні, у конструкції верстата використовують двохчерв'ячний привод ділильного стола: на шпинделі столу встановлено дві черв'ячні передачі з різним напрямком витків черв'яка [15]. Регулювання зазору здійснюється осьовим зміщенням одного з черв'яків за допомогою гідроприжиму, або пружини. Однак, гідроприжим може бути причиною підclinювання, а пружинний піджим має властивість інерційності.

Для чистової обробки зубчастих коліс методом, який відтворює контурну взаємодію, достатньо мати верстат з одночерв'ячним приводом, так як обробка профілів ведеться послідовно, та в умовах силового замикання. Це допоможе спростити конструкцію ділильної пари верстата та зменшити її собівартість.

3.3 Теоретичні дослідження процесів різання, які притаманні зубофрезеруванню, в умовах моделювання

3.3.1 Аналіз впливу похибок інструменту та верстата на точність обробки при зубофрезеруванні

Всю множину вихідних похибок, що впливають на точність зубообробки, можна привести до двох груп похибок – ті, що вносяться зі сторони різального інструмента, та ті, що виходять із заготовки [26].

По характеру виникнення та прояву при контролі, всі похибки поділяються на:

- радіальні, викликані зміною міжцентрової відстані верстатного зачеплення);
- тангенціальні, що виникають внаслідок нерівномірності кругової подачі;
- вісеві, що діють вздовж вісі верстата.

Розглянемо вплив радіальних похибок.

Радіальне биття фрези викликає надлишкове переміщення на лінії верстатного зачеплення. З метою моделювання процесу утворення похибки, у відповідності з вимогами, висунутими у р. 2.2.4.1, розроблено схеми утворення похибки, рис. 3.8.

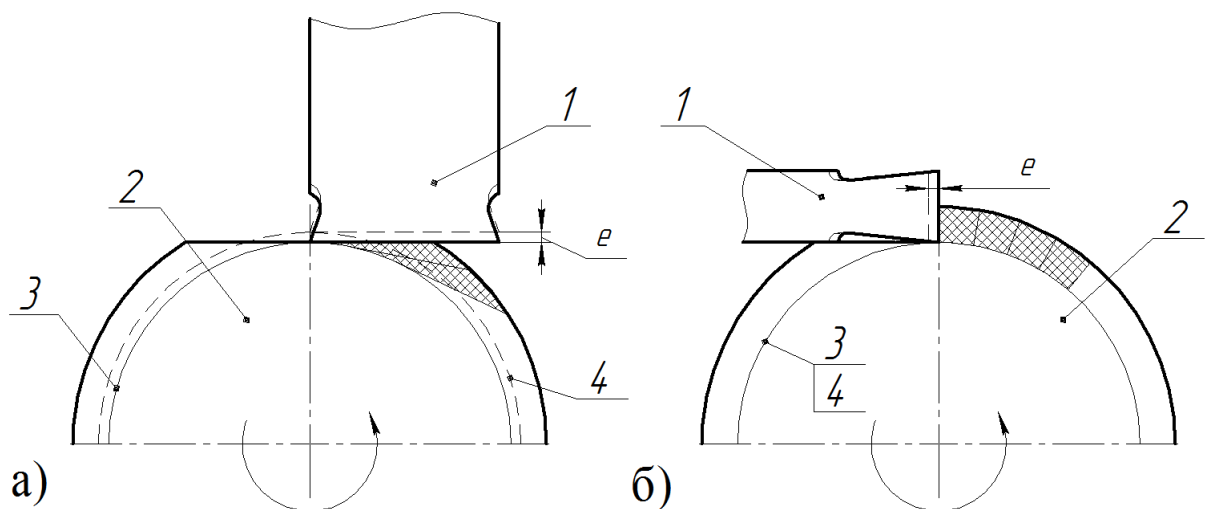


Рис. 3.8 Схема утворення похибки оброблюваного профілю

а) модель традиційного черв'ячного зубофрезерування; б) модель способу зубофрезерування з розташованою по нормалі до оброблюваної поверхні різальною кромкою.

1 – різальний інструмент; 2 – заготовка; 3 – теоретичний профіль деталі; 4 – реальний профіль деталі; e – зміщення інструменту, що імітує встановлену з ексцентриситетом фрезу.

У даній моделі вісєве биття фрези представлене періодичним зміщенням контуру інструмента e в торцевій площині заготовки.

Як видно з моделі традиційного черв'ячного зубофрезерування (рис. 3.8, а), дотична до оброблюваної поверхні РК інструменту в повній мірі переносить похибку зміщення контуру на оброблюваний профіль деталі.

В свою чергу, при розміщенні РК інструменту по нормалі до оброблюваної поверхні (рис. 3.8, б), за рахунок розділення поверхні різання та оброблюваної поверхні, вплив похибки зміщення контуру на оброблюваний профіль деталі відсутній.

3.3.2 Аналіз впливу схеми різання на відхилення профілю при зубофрезеруванні

Дослідження проводиться в умовах моделювання згідно вимог р. 2.2.4.1, та методики р. 2.2.4.2. Розроблені моделі утворення залишкових гребінців для методів що розглядаються приведено на рис. 3.9.

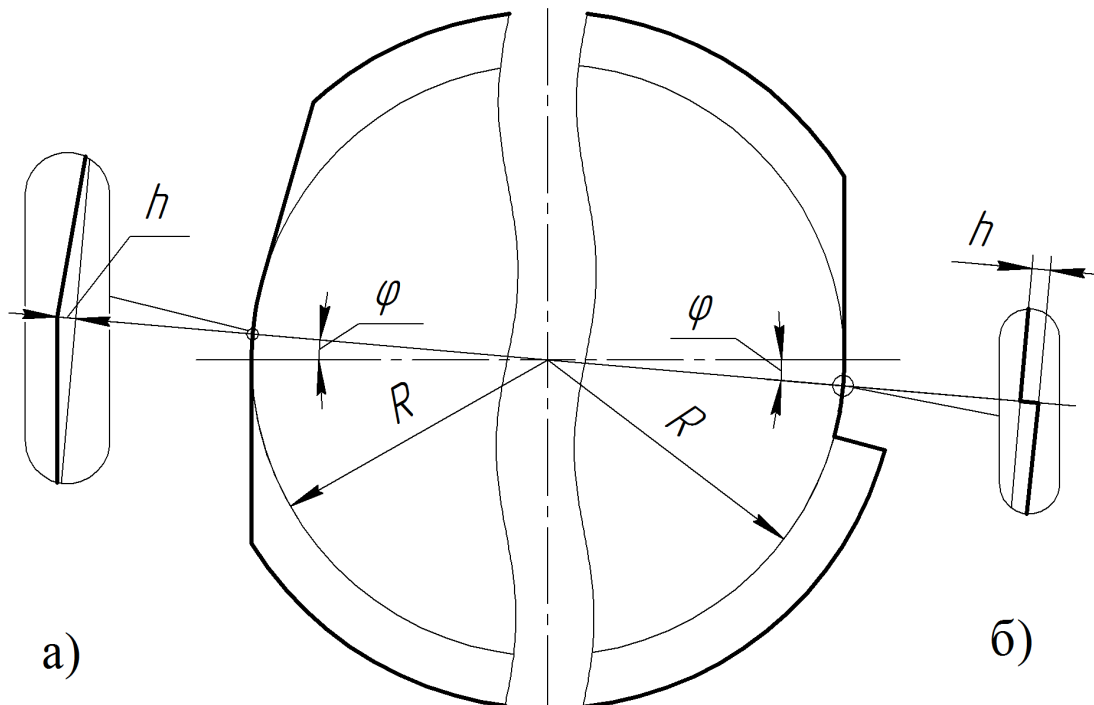


Рис. 3.9 Характер залишкових гребінців

а) модель традиційного черв'ячного зубофрезерування;

б) модель способу зубофрезерування з РК розташованою по нормалі до ОП.

R – радіус оброблюваної деталі; h – висота залишкових гребінців; φ – кут повороту столу верстату з оброблюваною заготовкою.

Відхилення профілю від номінального для моделі традиційного черв'ячного зубофрезерування розраховується за формулою:

$$h_{\text{тч}} = \frac{R}{\cos \frac{\varphi}{2}} - R, \text{ мм.} \quad (3.5)$$

Відхилення профілю від номінального для моделі способу зубофрезерування з розташованою по нормалі до оброблюваної поверхні РК розраховується за формулою:

$$h_{\text{нр}} = \frac{R}{\cos \varphi} - R, \text{ мм.} \quad (3.6)$$

Як видно з формул (3.5) та (3.6), при черв'ячному зубофрезеруванні вплив на точність профілю величини кругової подачі (кута повороту столу верстату з оброблюваною заготовкою) зменшується в два рази.

Це створює передумови для прогнозування однакової величини залишкових гребінців, для обох методів, лише за умови зменшення колової подачі вдвічі [118] (див. табл. 2.1).

3.3.3 Визначення рівня сталості процесів різання при профільній та контурній взаємодії в умовах комп'ютерного моделювання. Динамічний синтез системи черв'ячно-контурного зубофрезерування

Резерви підвищення ефективності традиційних способів лезової обробки обмежені величинами швидкостей різання і подач, що визначаються зносостійкістю інструмента та якістю обробки [53]. Подальше підвищення ефективності лезової обробки можливе за рахунок зміни кінематики різання та використання нових, раціональних схем різання з кінематичним перерозподіленням зрізів [32].

До системи черв'ячно-контурного зубофрезерування, що синтезується, висунуто наступні вимоги:

- збільшення точності обробки;
- зниження енергоємності процесу;
- підвищення сталості процесу.

Збільшення точності можливо здійснити за рахунок зменшення сили різання, і як наслідок – пружних деформацій [54, 56]. Критерієм для оцінки величини сили різання можуть слугувати площини зрізів, що знімаються зубцями фрези під час роботи [26]. Зниження енергоємності, в свою чергу, може бути також результатом зменшення сили різання [125].

На етапі синтезу необхідно задатися критеріями оцінки методу що розглядається. Такими критеріями оцінки системи взаємодії РК та ОП будуть:

- коефіцієнт перемінності сили різання;
- коефіцієнт номіналу сили різання;
- астатизм системи.

Астатизм системи, як властивість полягає в тому, що при будь-якій постійній дії (збуренню), похибка системи наближається до нуля [11].

Дослідження проводиться згідно з описаною у р. 2.2.4.4 методикою.

Система коливань, яка моделюється, являється одномасовою (рис. 3.10), складається з супорту і інструменту, масою m , власної жорсткості c та демпфера λ (тертя між станиною та супортом).

Визначимо збуренні коливання системи ВПД через роботу сили різання A_{Fy} , та роботу по демпфуванню коливань A_d .

Амплітуда коливань припуску описується формулою (3.7) і є адекватною амплітуді коливання системи від впливу сили різання F_y :

$$y = a \cdot \cos \omega t, \quad (3.7)$$

де a – амплітуда коливань;

ω – частота;

t – час.

Робота A_{Fy} по відокремленню припуску та збудження коливань утворюється лінійною величиною X_{ex} :

$$A_{Py} = X_{вх} = F_y \cdot t = \int_0^t F_y(t) dt, \quad (3.8)$$

де F_y – сила різання;

t – час.

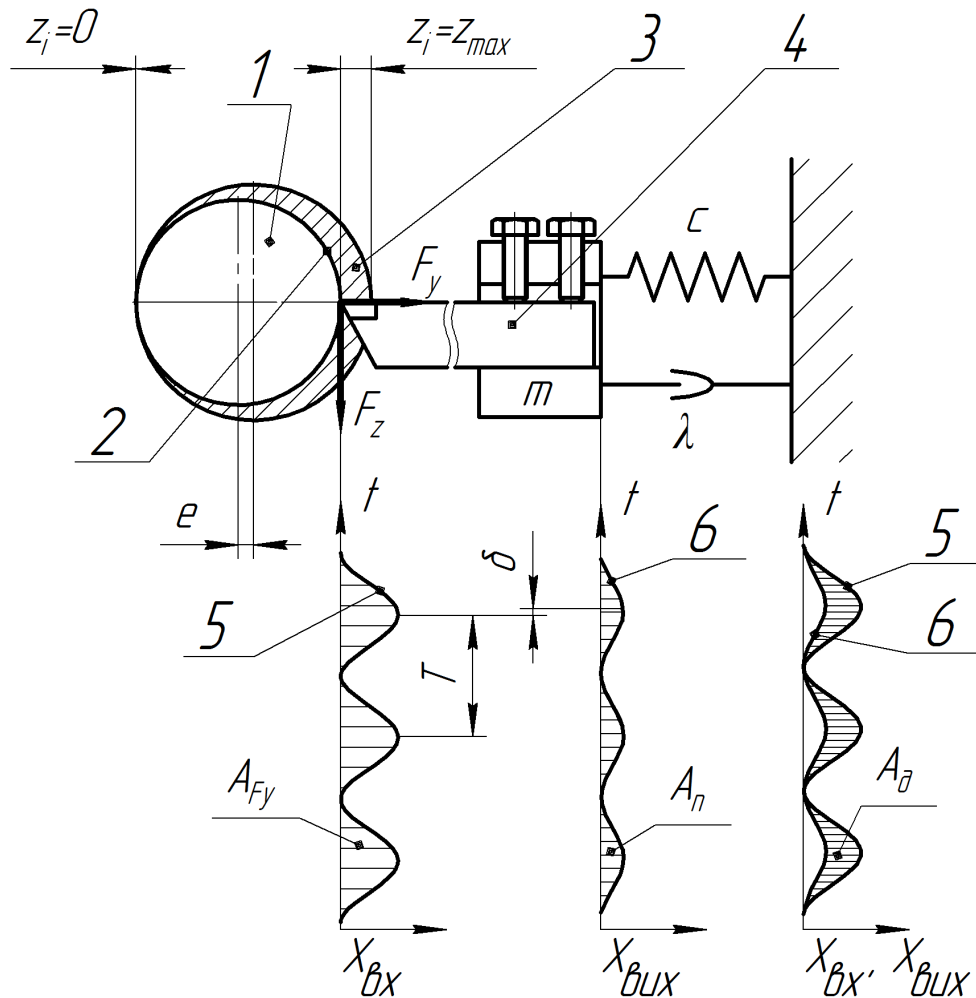


Рис. 3.10 Динамічна модель процесу

- 1 – заготовка з ексцентриситетом; 2 – оброблювана поверхня; 3 – поверхня різання;
 4 – система ВПД; 5 – графік коливань, викликаних перемінним припуском z_i ;
 6 – графік пружних деформацій системи ВПД.
 c – коефіцієнт пружності системи; λ – коефіцієнт демпфування; F_z, F_y – сили різання;
 z_i – припуск на обробку; T – частота коливань; δ – величина запізнення коливань;
 A_{F_y} – робота сили різання; A_n – робота пружних переміщень системи ВПД;
 A_d – робота системи, направлена на демпфування коливань;
 $X_{вх}, X_{вих}$ – величина вхідних та вихідних коливань; t – час.

Таким чином коливання сили різання F_y викличе шкідливу роботу пружних переміщень A_n системи ВПД, яку доцільно було б нейтралізувати відомими засобами, наприклад введенням в систему інтегруючої ланки, або відтворення її умовного функціонування.

Приймаємо ряд умовностей:

$$A_n = X_{вих};$$

$$X_{вх} = F_y \cdot \cos \omega t.$$

З урахуванням умовностей, рівняння роботи пружних переміщень A_n прийме вигляд рівняння яке характеризує інтегруючу ланку, тобто:

$$A_{\Pi} = X_{\text{вих}} = k \int_0^t F_y \cdot \cos\omega(t) dt. \quad (3.9)$$

Відповідно до формули (3.9) необхідно розглянути результати комп'ютерного моделювання впливу геометрії процесу різання на рівень астатизму системи що розглядається і визначити обсяг необхідної роботи демпфування A_d яка може частково, або повністю нейтралізувати шкідливу роботу з пружних переміщень системи ВПД A_n .

Величину роботи сил демпфування A_d можна визначити за формулою:

$$A_d = A_{F_y} - A_{\Pi} = \int_0^t (F_y(t) - kF_y \cdot \cos\omega(t)) dt. \quad (3.10)$$

Побудуємо математичну модель процесу різання [73].

Фактичне значення припуску z_i визначається по формулі:

$$z_i = z_0 + y, \quad (3.11)$$

де y – амплітуда коливань припуску.

Сила різання пов'язана з фактичним значенням припуску z_i :

$$F_y = Cp_y \cdot z_i \cdot S^v \cdot V^n.$$

Враховуючи умовно незначний вплив параметрів Cp_y , S^v , V^n цю залежність можна лінеаризувати:

$$F_y = K_p \cdot z_i, \quad (3.12)$$

де K_p – коефіцієнт лінеаризації:

$$K_p = Cp_y \cdot S^v \cdot V^n.$$

Окреме рівняння руху системи ВПД, яке відповідає вимушеним коливанням внаслідок перемінності припуску z :

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + c = F_y. \quad (3.13)$$

Отримана система рівнянь (3.11...3.13) являє собою математичну модель процесу різання в замкненій технологічній системі з одним ступенем вільності. Заміною проміжних змінних система зводиться до рівняння:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + c = K_p \cdot z_i,$$

що в стандартній формі запису виглядає наступним чином:

$$T_1^2 s^2 y + T_2 s y + y = K_1 \cdot z_i, \quad (3.14)$$

де $T_1^2 = m/(c + K_p)$; $T_2 = \lambda/(c + K_p)$ – постійні часу системи;

$K_1 = K_p/(c + K_p)$ – коефіцієнт передачі.

Оскільки рівняння зв'язує вхідну величину (перемінність припуску) з вихідною (деформація системи), з нього може бути отримана відповідна передаточна функція, котра відображає зміну пружної деформації при зміні величини припуску:

$$W_2(s) = \frac{Y(s)}{z_i(s)} = \frac{K_1}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1}.$$

Для отримання інших передаточних функцій системи слід знову звернутися до її математичної моделі. Так, щоб знайти передаточну функцію, що відображає залежність складової сили різання від заданої глибини різання, необхідно у з рівняння (3.11) та z_i з рівняння (3.12) підставити в (3.13). Після перетворень отримуємо рівняння в стандартній формі запису та переходячи до зображень по Лапласу, знаходимо:

$$W_2(s) = \frac{F_y(s)}{z_i(s)} = \frac{K_2}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1},$$

де $K_2 = cK_p/(c + K_p)$ – коефіцієнт передачі.

Побудуємо осцилограми по заданим схемам різання, використовуючи прикладну програму «Моделювання технологічної спадковості» [73], та визначимо пружну деформацію системи. Інтерфейс програми та вихідні дані до моделювання показано на рис. 3.11.

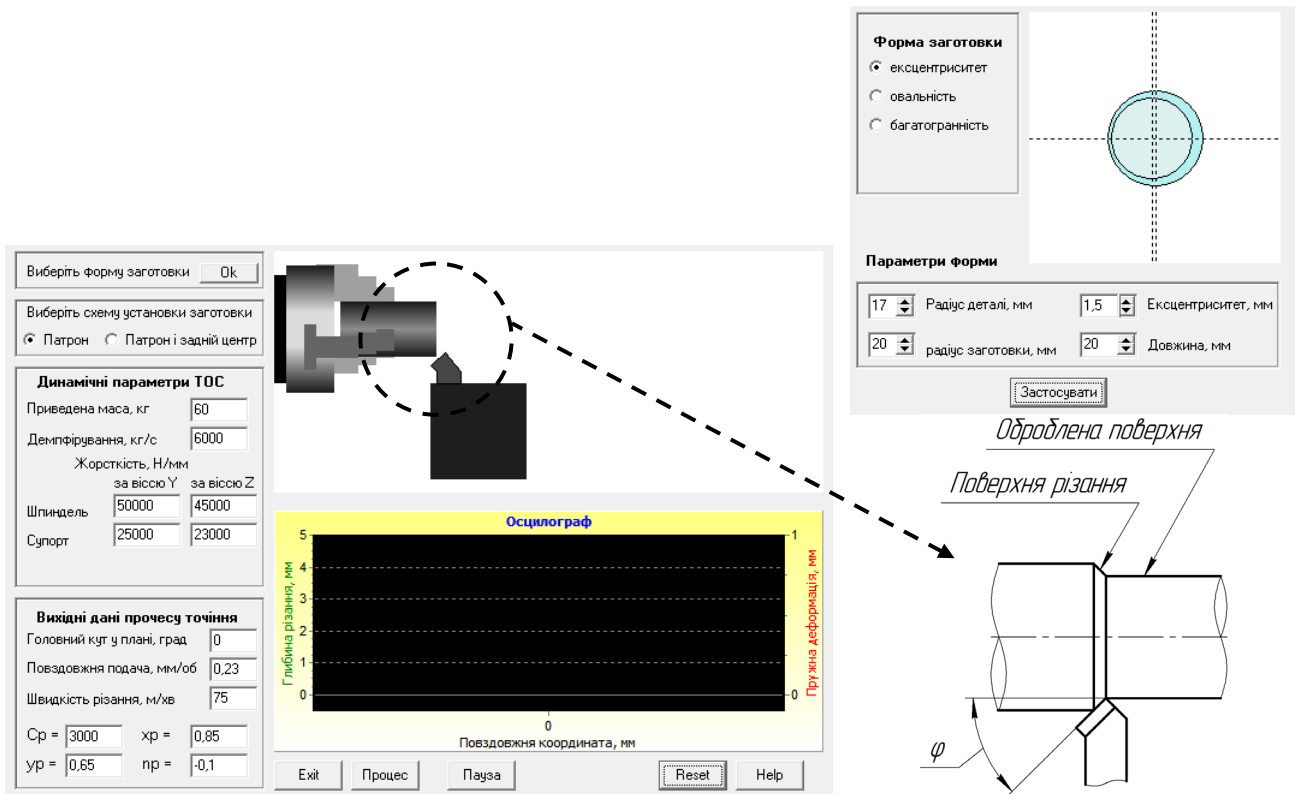


Рис. 3.11 Інтерфейс програми

Отримані при моделюванні осцилограми приведено на рис. 3.12. Головний кут в плані $\varphi = 0^\circ$ відповідає профільній взаємодії (поверхня різання являється оброблюваною поверхнею), а $\varphi = 90^\circ$ - контурній взаємодії (поверхня різання не співпадає з оброблюваною поверхнею).

Як видно із побудованих осцилограм (рис. 3.12), профільна взаємодія проявляє себе як типова коливальна консервативна статична ланка [11], з передаточною функцією:

$$W(p) = \frac{k}{1 + T^2 p^2}.$$

В свою чергу, при контурній взаємодії підвищується порядок рівня астатизму системи за рахунок зміни характеру (геометрії) взаємодії різальної кромки з оброблюваною поверхнею, що адекватно введенню в систему інтегруючої ланки [12], передаточна функція якої:

$$W(p) = \frac{k}{p}.$$

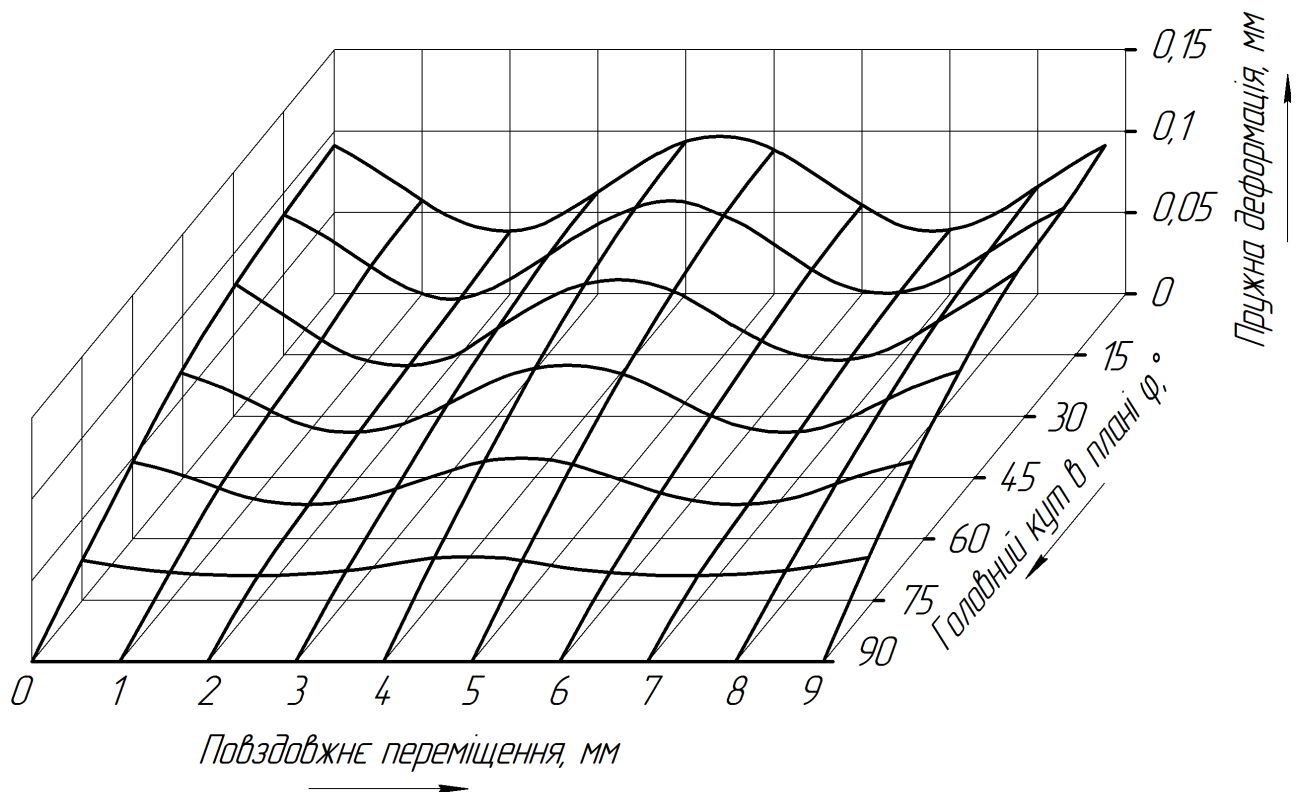


Рис. 3.12 Результати комп'ютерного моделювання

При цьому необхідно розглядати функційну ланку як результат взаємодії вхідного і вихідного сигналу. Найбільш зручно розглядати у вигляді роботи, яку виконує вхідна величина і реакції вихідної величини. Як відомо робота завжди визначається інтегралом, тому доцільно розглядати дану систему як систему з інтегруючою ланкою.

3.4 Теоретичні дослідження процесів традиційного черв'ячного чистового зубофрезерування

3.4.1 Аналіз енергоємності традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування на базі відомих досліджень

Згідно з описаною в р. 2.2.5.1 методикою, задаємось значенням сили F_z з джерела [130]. Наближене значення складової сили різання F_x розраховуємо через масштабний коефіцієнт, взятий з відношення складових сил різання в роботах [27, 92, 122]. Отримані осцилограмні епюри приведено на рис. 3.13.

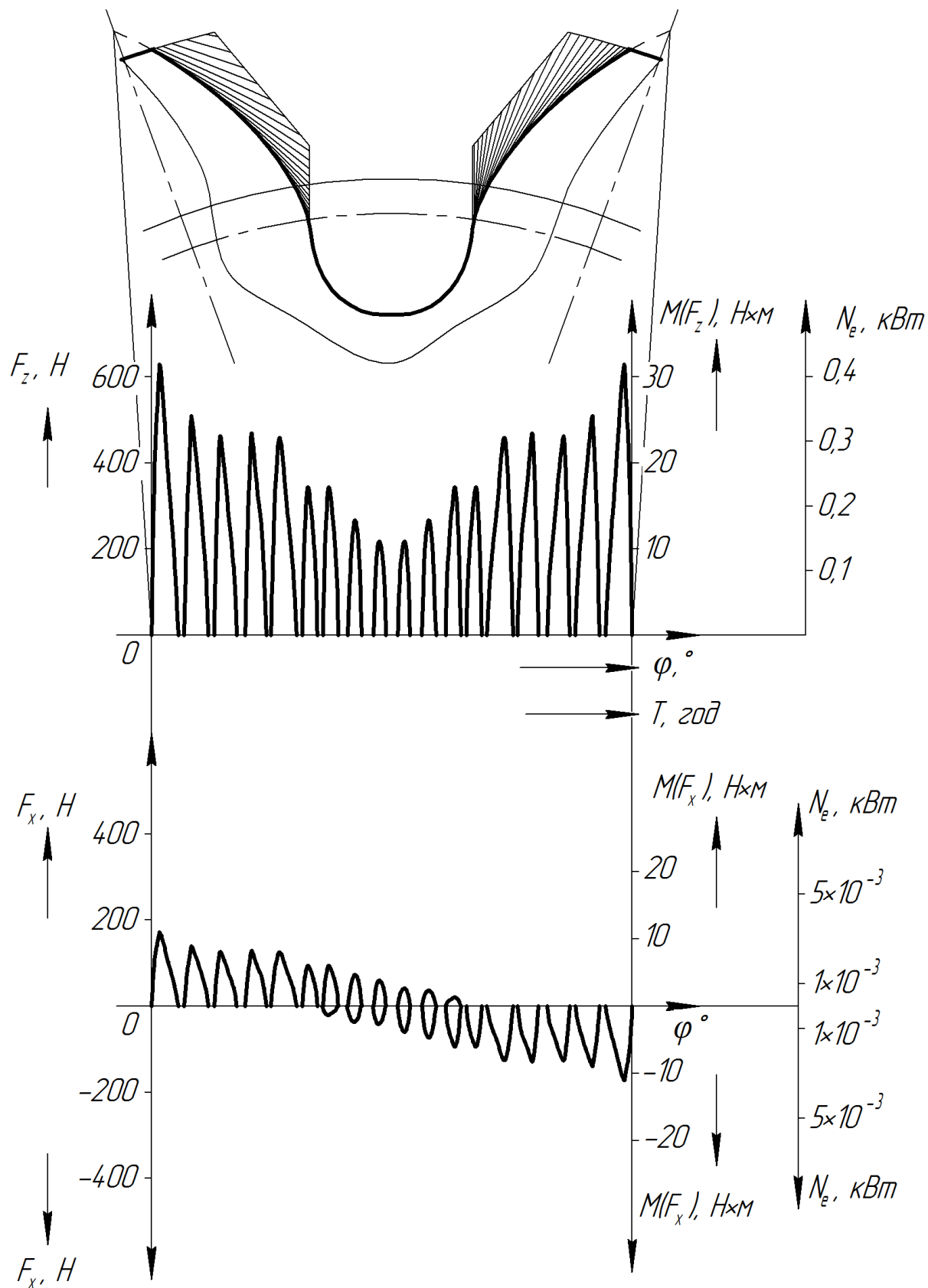


Рис. 3.13 Осцилограмні епюри складових сили різання та крутних моментів при обробці западини зубчастого колеса методом черв'ячного зубофрезерування

Моменти різання на шпінделі інструменту $M(F_z)$ та на шпінделі виробу $M(F_x)$ розраховуються по формулам (2.4) та (2.5).

Потужність на інструментальному шпінделі та шпінделі виробу розраховується за формулами (2.7) та (2.8) відповідно.

По формулам (2.12...2.17) розраховуємо енергоємність процесу традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування по інструментальному шпінделю і по шпінделю виробу.

Вихідні дані дослідження зведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Найменування визначених параметрів	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	
			Інструментальний шпіндель	Шпіндель виробу
Діапазон сил різання	F_z	Н	166...634	-
	F_x		-	45...173
Площа активної частини осцилограмних епюр	S	мм ²	722,25	197,81
Діапазон крутних моментів	$M(F_z)$	Н·м	11...31,4	-
	$M(F_x)$		-	-11...11
Діапазон потужностей	$N(F_z)$	кВт	0,145...0,42	-
	$N(F_x)$		-	$0,972 \cdot 10^{-3} \dots 3,3 \cdot 10^{-3}$
Енергоємність	$E(F_z)$	кВт·год	0,65937	-
	$E(F_x)$		-	0,0052

Як видно з отриманих даних, обробка традиційним чистовим черв'ячним зубофрезеруванням характеризується значними величинами сил різання, наявністю перемінності складової сили різання F_x по напрямку та у 12 разів більшу енергоємність інструментального шпінделя, ніж шпінделя виробу.

3.4.2 Аналіз процесу формоутворення традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування на базі комп'ютерної моделі кінематики зубофрезерування

Для дослідження процесу формоутворення при нарізанні номінального зубчастого колеса, виміряємо площину зрізаемого шару, товщину та ширину зрізів що знімаються кожним окремим зубцем фрези у твірних положеннях. Дослідження виконується в умовах комп'ютерного моделювання по методиці,

описаній у р. 2.2.5.2, при цьому моделюється обробка однієї міжзубової западини для черв'ячного зубофрезерування, як показано на рис. 3.14.

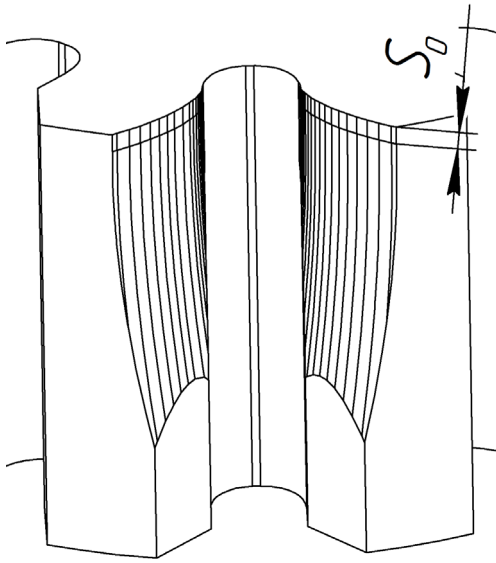


Рис. 3.14 Схема розподілу
одиничних зрізів при моделюванні
традиційного чистового
черв'ячного зубофрезерування

S_0 – вісева подача

Геометрична форма одиничних зрізів та відокремлюваних елементів

На рисунках представлені геометричні форми одиничних зрізів на твірних позиціях, що належать вхідній (рис. 3.15) та вихідній (рис. 3.16) РК. Як видно з рисунків, зубець черв'ячної фрези зрізає шар в 20...30 разів більшою шириною, ніж товщиною, що згідно досліджень проведених у роботі [32], може являтися джерелом підвищення сили різання.

Повний комплект масштабних схем площин перерізів у межах обробки однієї міжзубової западини приведено у додатку Б.

Особливо слід відмітити не однакове навантаження різних ділянок РК. Так, обробка частини евольвентного профілю деталі, наближеного до зовнішнього діаметру зубчастого колеса, ведеться зі зняттям шару матеріалу значно більшого об'єму.

Позитивним моментом чистової обробки зубчастих коліс черв'ячним зубофрезеруванням слід вважати відсутність припуску у міжзубовій впадині, а як наслідок – повне розвантаження вершинної різальної кромки, яка характеризується найскрутнішими умовами різання при обробці суцільної заготовки [26, 107, 130].

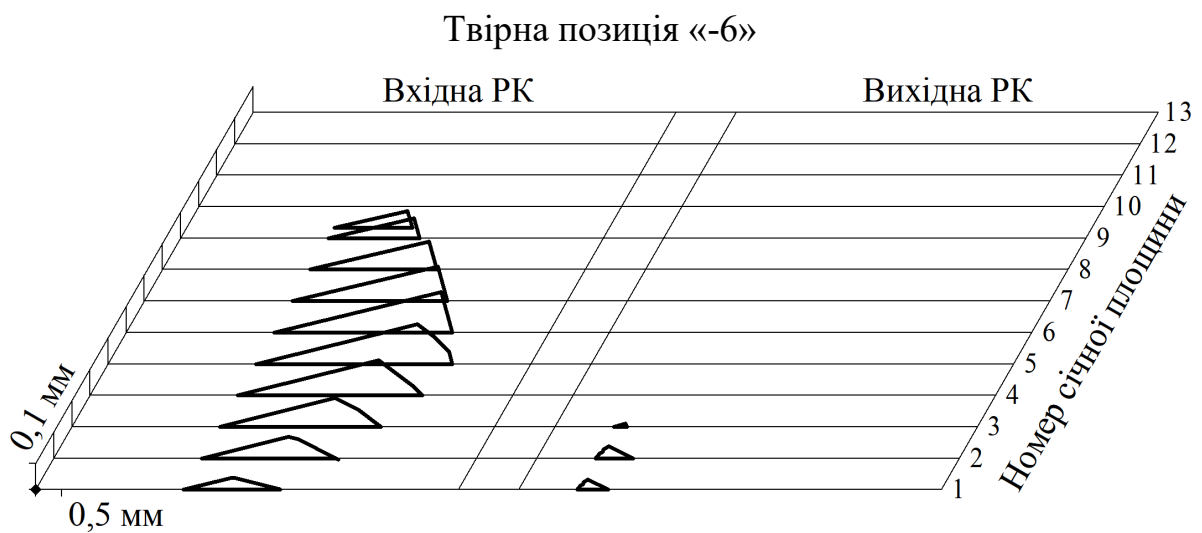
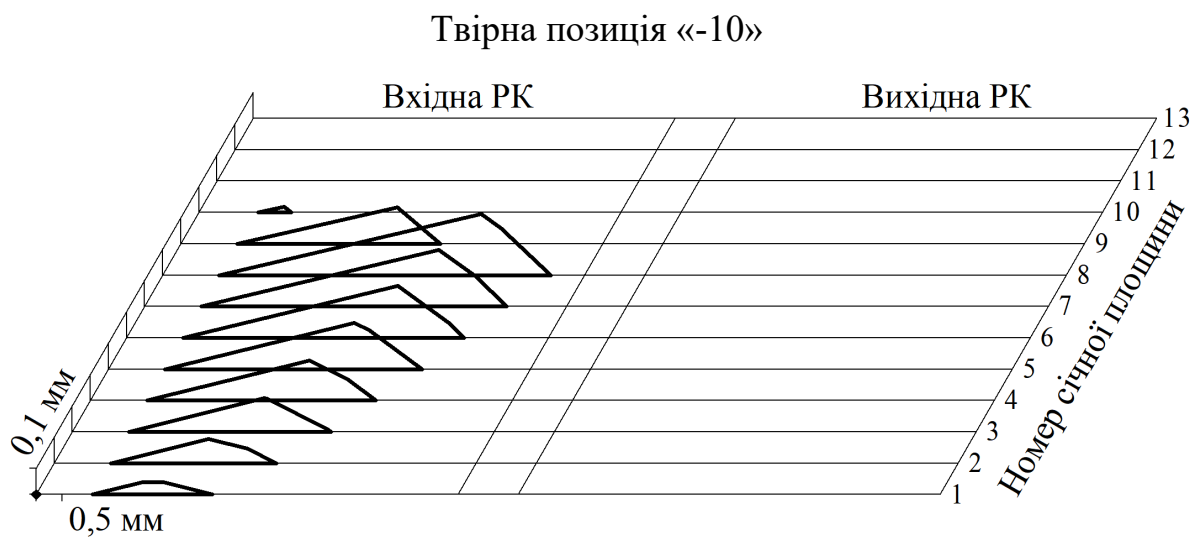
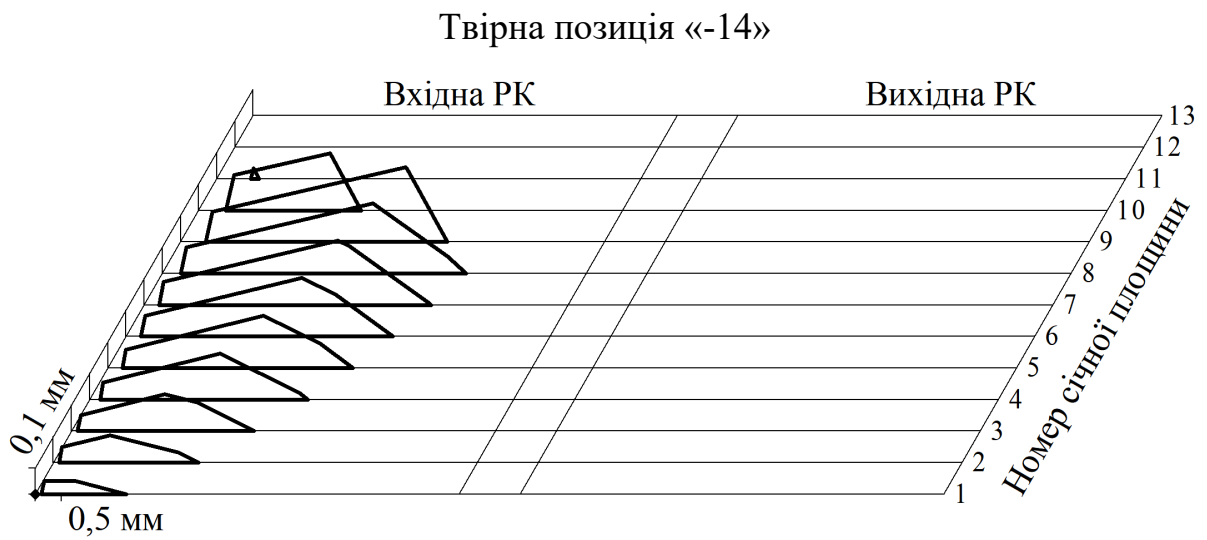


Рис. 3.15 Масштабна схема розміщення окремих площин перерізів в межах вхідної різальної кромки по траєкторії руху зубця черв'ячної фрези

Форми отриманих моделюванням недеформованих відокремлюваних елементів представлені на рис. 3.17. Відокремлювані елементи мають стрічкоподібну форму, яка потовщується на кінці, а деякі твірні позиції характеризуються одночасною обробкою двома РК, тобто має місце перекриття обробки вхідною і вихідною РК.

Чисельні значення розмірів одиничних зрізів

По отриманим під час моделювання чисельним значенням розмірів одиничних зрізів (додаток В) побудовано графіки залежностей, які приведені на рис. 3.18...3.20. Як видно з графіків, перетини зрізів розподіляються відповідно по двом бічним РК зубця черв'ячної фрези. З твірного положення «-7» і до положення «4» бічні кромки працюють одночасно.

Евольвентний профіль при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні утворюється як огинаюча послідовних положень зубців черв'ячної фрези при безперервному обкаті. Така схема формоутворення характеризується значною шириною різання, що і підтверджується рис. 3.19; ширина зрізу сягає $a = 7,06$ мм на вхідній та $a = 6,93$ мм на вихідній РК. Більші значення товщин зрізів, згідно графіка рис. 3.20, припадають на вхідну кромку $b = 0,29$ мм, порівняно з $b = 0,26$ мм на вихідній РК. В результаті кромки навантажені неоднаково (рис. 3.18).

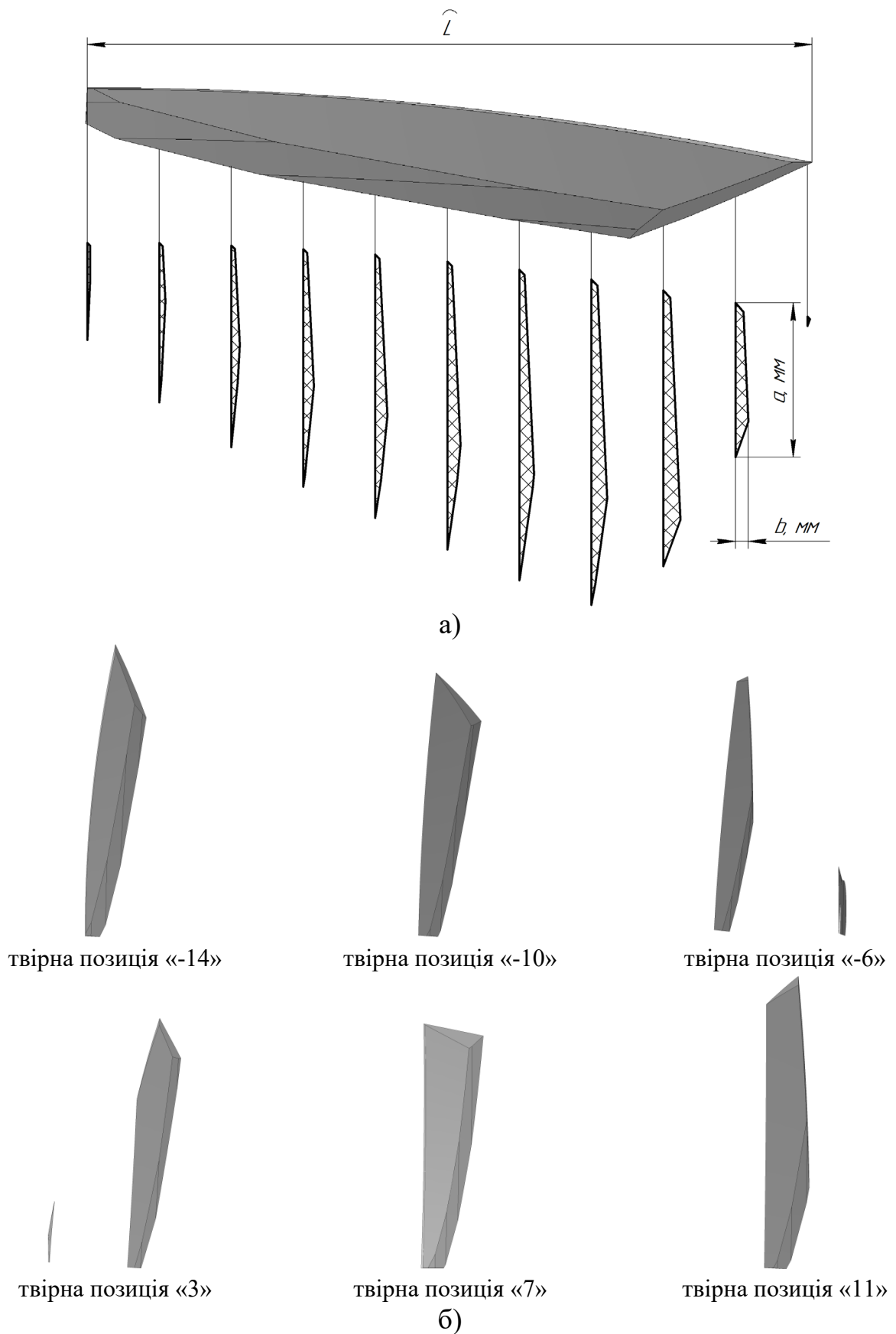
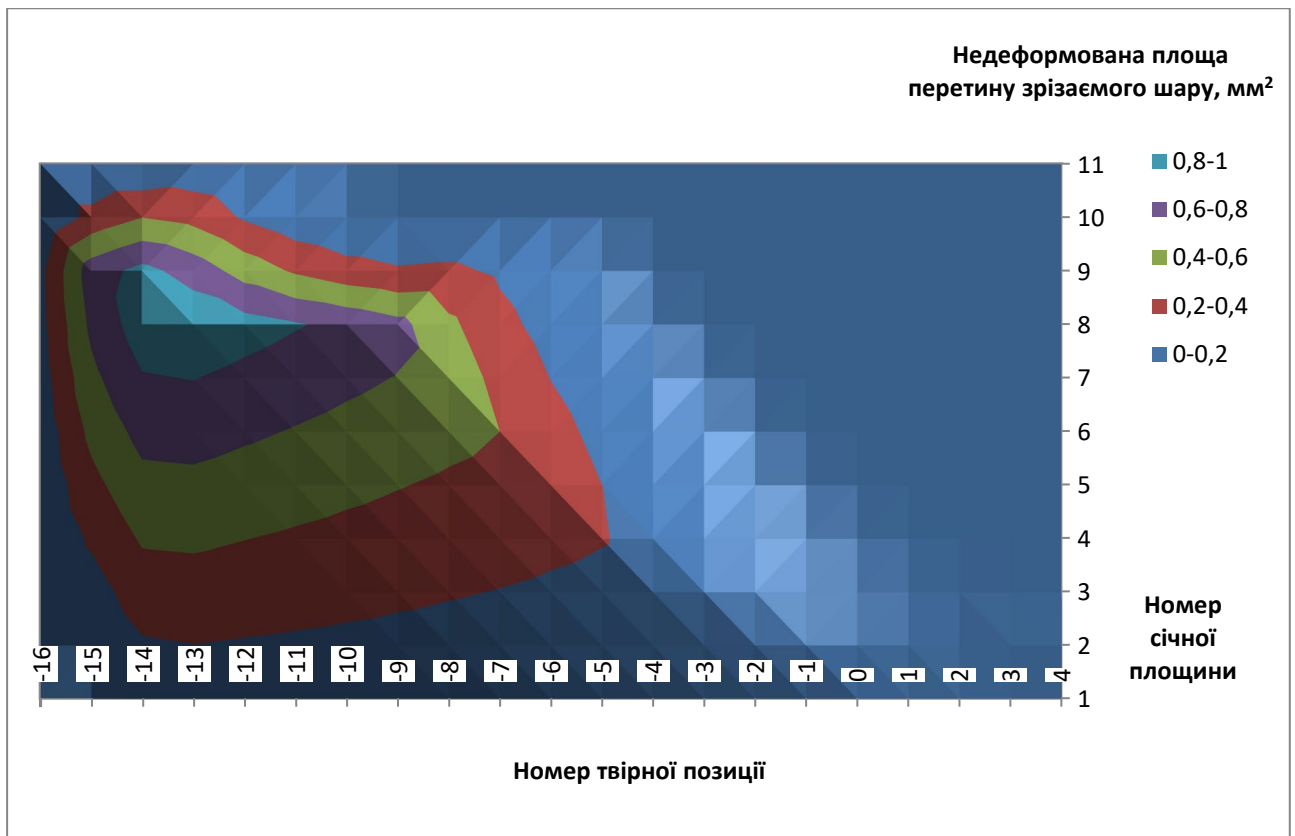
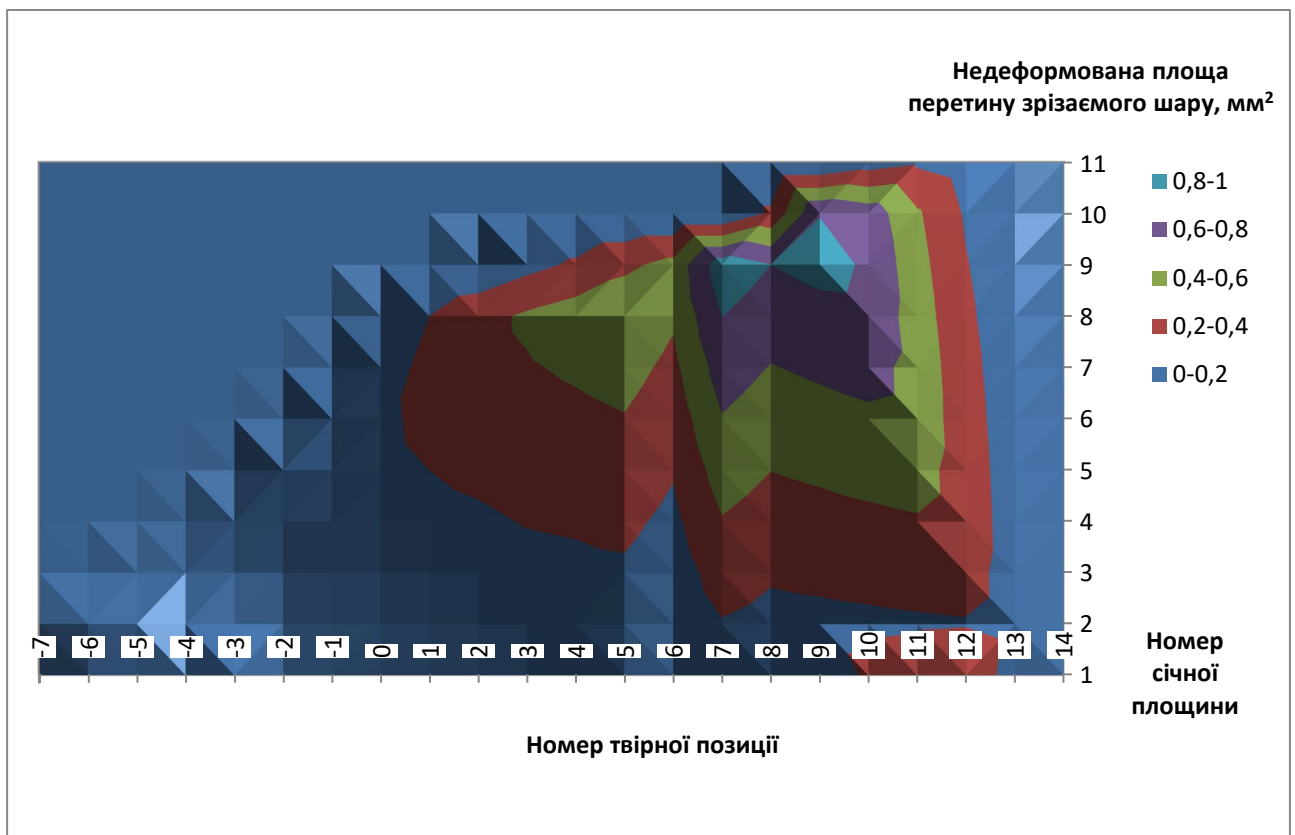


Рис. 3.17 Форми відокремлюваних елементів, отриманих моделюванням традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування

- а) схема перерізів відокремлюваних елементів;
 б) форми відокремлюваних елементів на твірних позиціях.



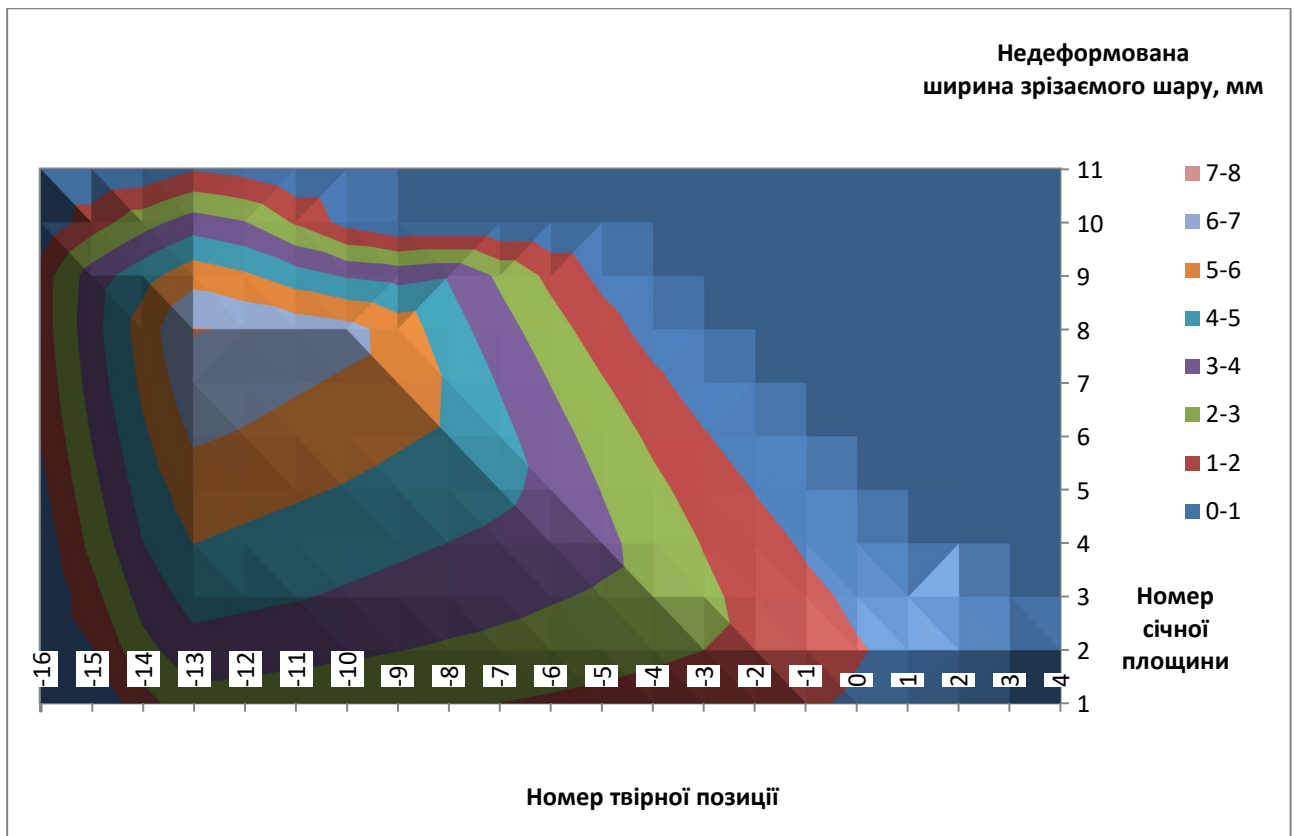
а)



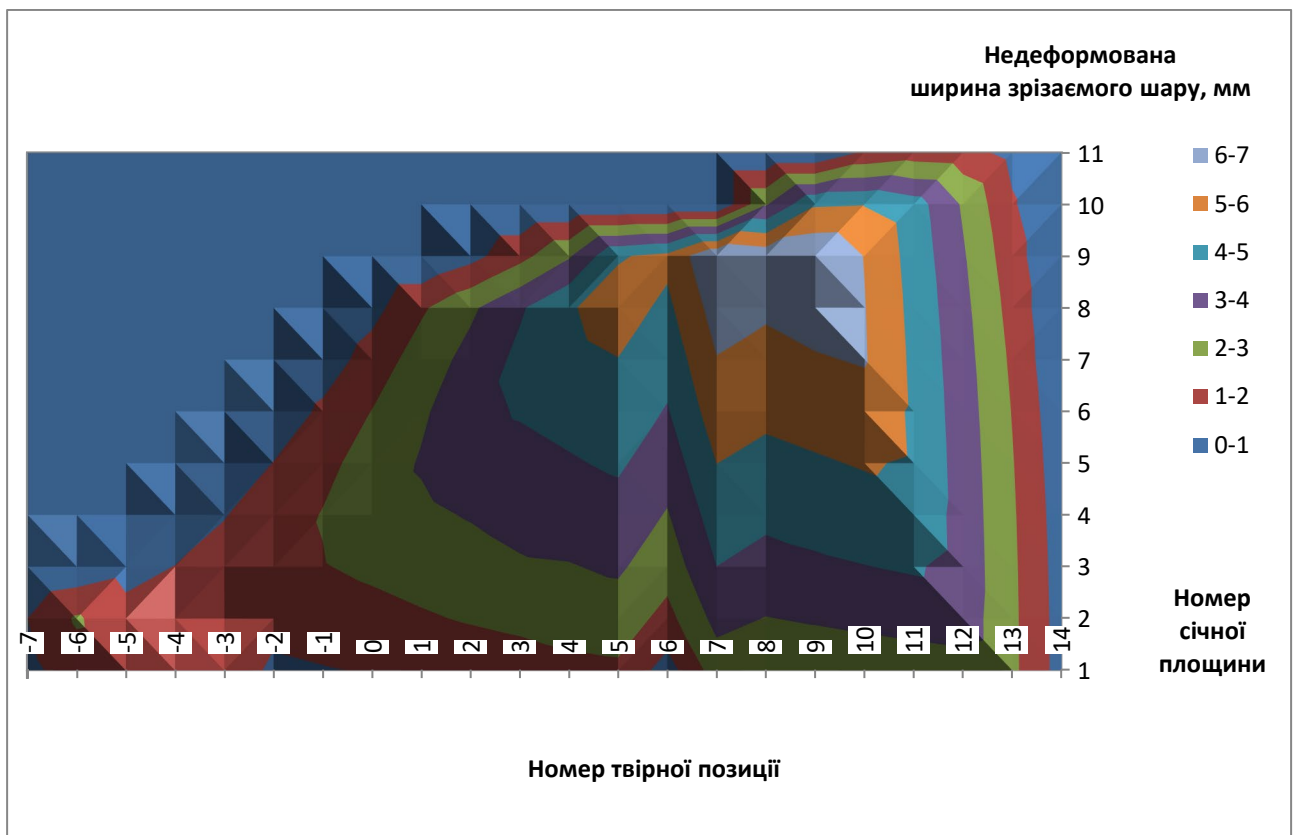
б)

Рис. 3.18 Недеформована площа перетину зрізаного шару

а) робота вхідною різальною кромкою; б) робота вихідною різальною кромкою.



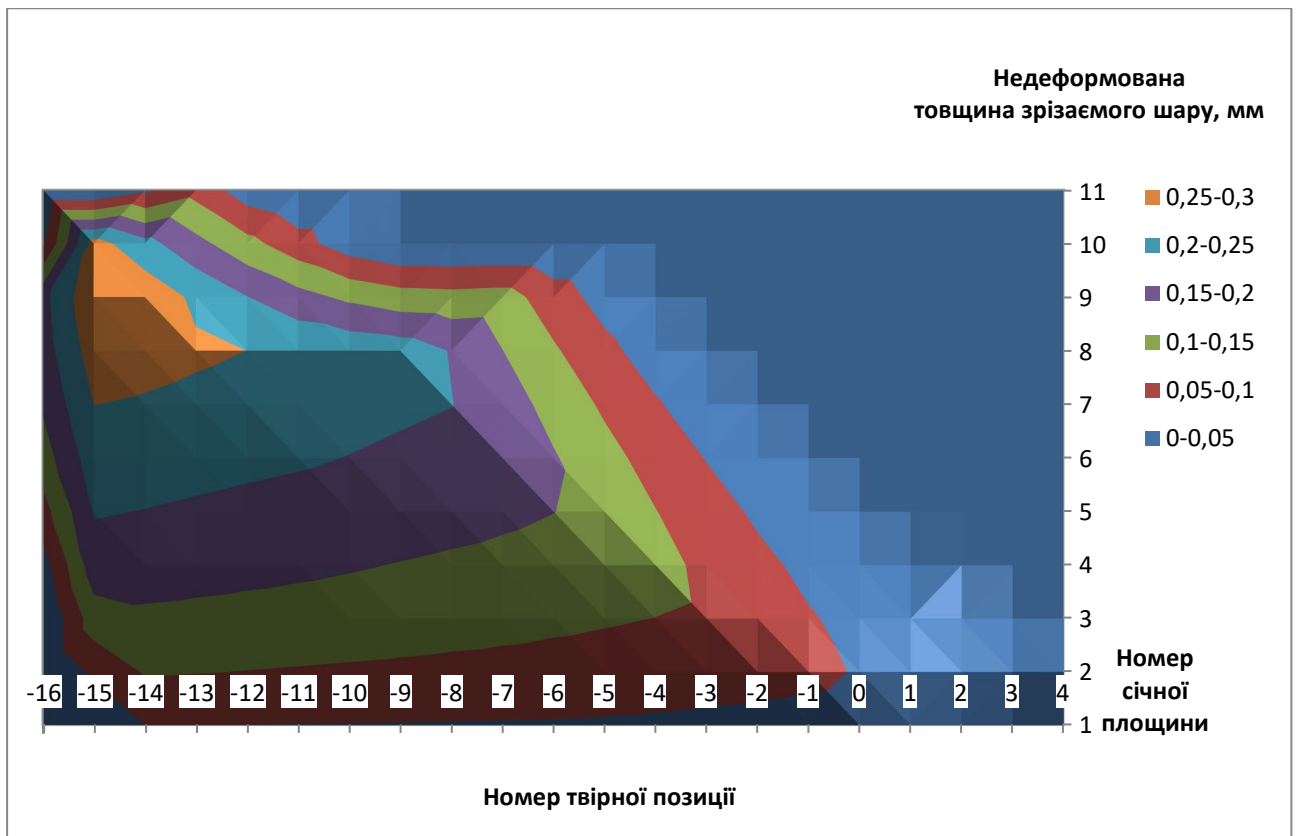
а)



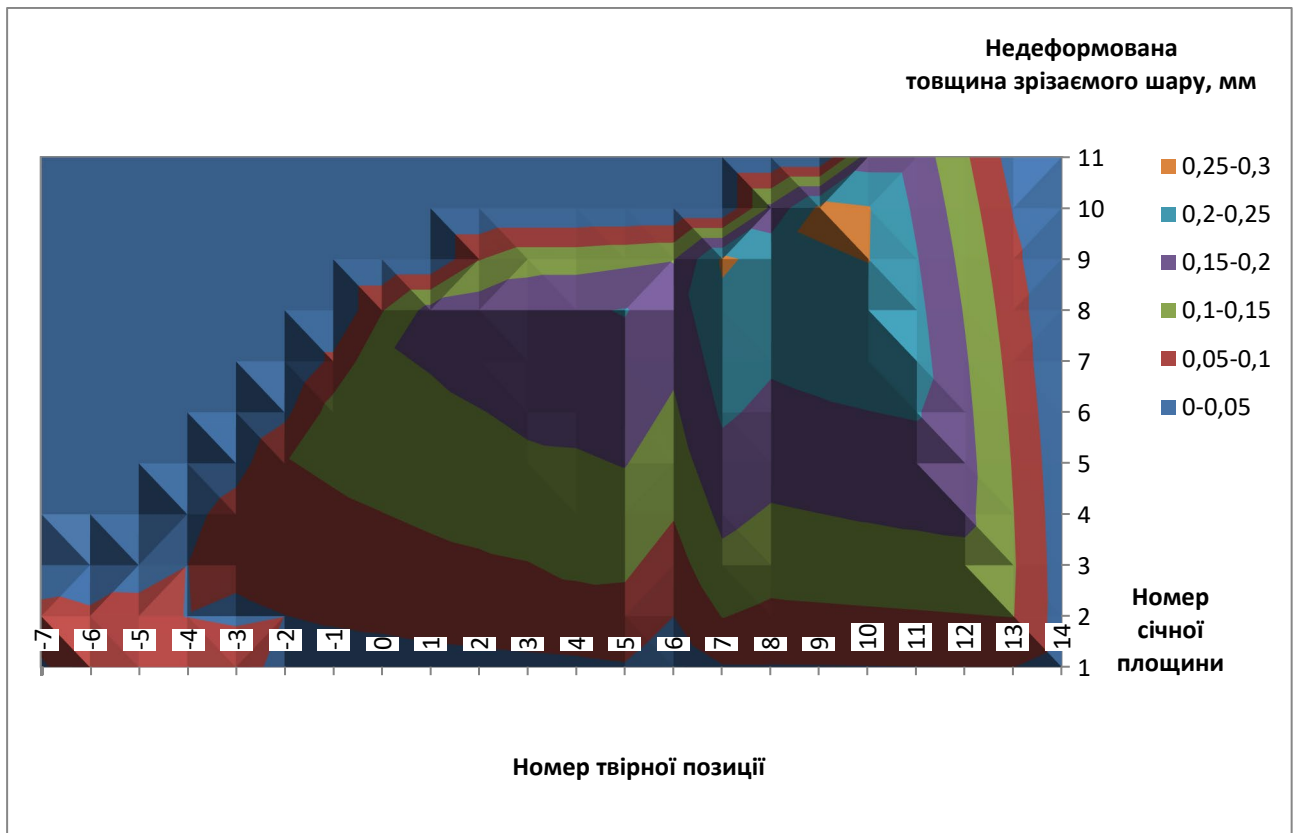
б)

Рис. 3.19 Недеформована ширина зрізаемого шару

а) робота вхідною різальною кромкою; б) робота вихідною різальною кромкою.



а)



б)

Рис. 3.20 Недеформована товщина зрізаемого шару

а) робота вхідною різальною кромкою; б) робота вихідною різальною кромкою.

3.4.3 Аналіз енергоємності традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування на базі дослідження процесів формоутворення

Згідно результатів дослідження сил різання при зубофрезеруванні [26], встановлено, що значення сил різання, які виникають на кожній РК зубця фрези, можна розрахувати, виходячи з перетину зрізу що знімається нею. Найважливіше значення набуває в цьому випадку визначення перетину зрізів, що знімаються окремими зубцями. Їх визначення дозволяє також прогнозувати очікувані пружні деформації технологічної системи ВПД та їх можливий вплив на точність профілю деталі що отримується. На товщини зрізів і довжини дуг зрізів при зубофрезеруванні роблять дуже незначний вплив швидкість різання і подача; вони визначаються переважно геометричними параметрами фрези і оброблюваного колеса. Дослідження проводиться згідно з методикою, описаною у р. 2.2.5.3.

Отримані значення відносного модуля сили різання $|F_z|$, шляхом підстановки значення глибини (товщини) різання і ширини різку у формулу (2.21), наближене значення відносного модуля сили різання $|F_x|$ розрахованого через масштабний коефіцієнт, взятий з відношення складових сил різання в роботах [27, 92, 122], представлено у вигляді графіка на рис. 3.21.

Відносні крутні моменти $M(F_z)$ та $M(F_x)$ визначені по формулам (2.22) та (2.23) також представлені на рис. 3.21.

Кожний пік осцилограми відповідає оберту фрези на один зубець, під час якого крутний момент змінюється з мінімального свого значення до максимального, і назад. Мінімальне значення крутного моменту залежить від відношення дуги контакту зубця фрези з заготовкою до окружного кроку фрези.

При вивченні осцилограм (рис. 3.21) видно, що черв'ячному чистовому зубофрезеруванню характерні ділянки з крутним моментом, що не знижується до нуля, та ділянки на яких крутний момент деякий час продовжує залишатися рівним нулю [2]. Це вказує на нерівномірність роботи черв'ячної фрези.

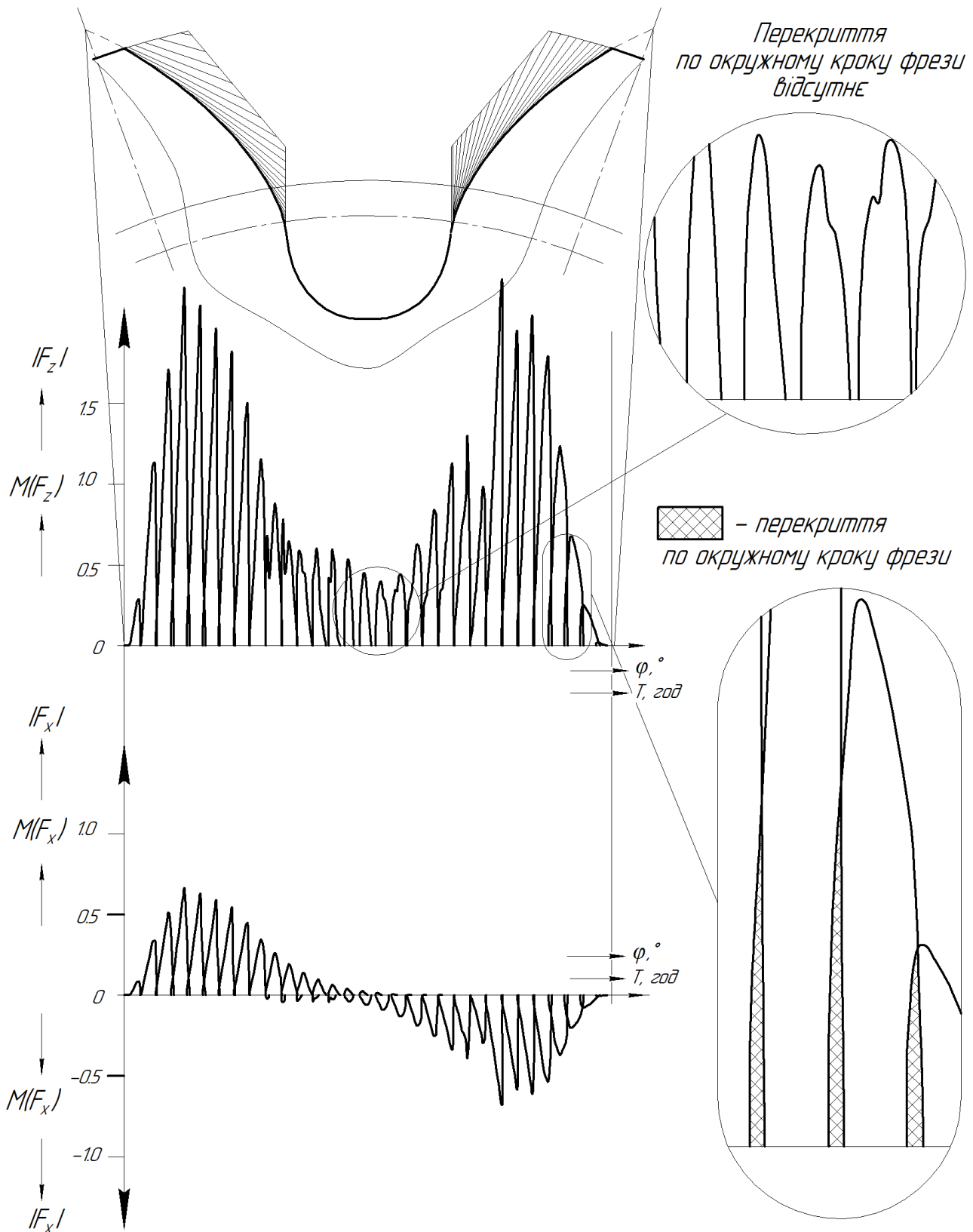


Рис. 3.21 Комп'ютерні осцилограмні епюри в межах однієї западини під час чистового черв'ячного зубофрезерування

Розраховані значення відносного модулю енергоємності $|E|$, по формулі (2.25) на шпінделі інструменту та шпінделі виробу для традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування дорівнюють, відповідно, $|E_{Mz}| = 17,25$ та $|E_{Mx}| = 1,12$, в умовних одиницях енергії.

Вихідні дані дослідження зведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Найменування визначених параметрів	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	
			Інструментальний шпіндель	Шпіндель виробу
Діапазон відносного модуля сили $ F $	$ F_z $	відносні одиниці сили	0,016...2,214	-
	$ F_x $		-	0,004...0,6
Діапазон крутних моментів	$M(F_z)$	відносні одиниці моменту	0,016...2,214	-
	$M(F_x)$		-	0,004...0,6
Відносний модуль енергозатрат	$ E(M_z) $	відносні одиниці енергоємності	17,25	-
	$ E(M_x) $		-	1,12

3.5 Кінематичний синтез та реалізація схеми черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі контурної взаємодії різальної кромки та оброблюваної поверхні

Черв'ячно-контурне зубофрезерування подібне традиційному черв'ячному зубофрезеруванню, але і вміщує в своїй суті значні відмінності.

Черв'ячно-контурне зубофрезерування – спосіб чистового зубофрезерування, при якому РК зубця інструмента розміщена по нормалі до оброблюваної евольвентної поверхні та є продовженням радіусів кривизни останньої, а поверхня різання не співпадає з оброблюваною поверхнею.

Сутність черв'ячно-контурного зубофрезерування полягає в тому, що воно застосовується лише як метод чистової обробки евольвентних профілів зубців зі сформованою впадиною. При цьому інструмент працює єдиною РК, яка розміщена на гвинтовій лінії з кроком, який дорівнює кроку оброблюваного колеса, по дузі основного кола, та визначається по формулі, мм:

$$P = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha, \quad (3.15)$$

де m – модуль оброблюваного колеса, мм;

α – кут зачеплення, град.

Кінематично, процес нарізання зубців при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні слід розглядати як зачеплення черв'яка і черв'ячного колеса. Обертальний рух черв'ячно-контурної фрези та оброблюваного колеса пов'язані між собою, та визначаються відношенням числа заходів фрези до числа зубців оброблюваного колеса. За один оберт однозаходної черв'ячної фрези оброблюване колесо повинне повернутись на один зубець:

$$i = \frac{k}{z}, \quad (3.16)$$

де k – число заходів черв'ячно-контурної фрези;

z – число зубців оброблюваного колеса.

Черв'ячно-контурне зубофрезерування реалізується за умови, що формоутворююча РК інструмента знаходиться на продовженні радіусів кривизни номінального евольвентного профілю зубців оброблюваного колеса так, що її початкова точка описує при русі формоутворення обумовлений номінальний евольвентний профіль зубця (рис. 3.22, б). При моделюванні в умовах обертового руху показати процес формоутворення евольвентної поверхні початковою точкою РК графічно складно, тому необхідно розробити адекватну схему заміщення обертового руху обкату на прямолінійний рух обкату.

При обробці черв'ячно-контурними фрезами, вісь інструментального шпінделя верстата розташовується під кутом θ до повздовжньої осі оброблюваного зуба, що визначається виразом:

$$\theta = 90^\circ - \omega, \quad (3.17)$$

де ω - кут нахилу гвинтової лінії фрези, град.

Схема установки фрези показана на рис. 3.23.

Обробка зубчатих коліс ведеться комплектом черв'ячно-контурних фрез, що складається з двох штук (при цьому передні грані обумовлених фрез розташовані опозитно одна до одної). Обробка ведеться за два проходи.

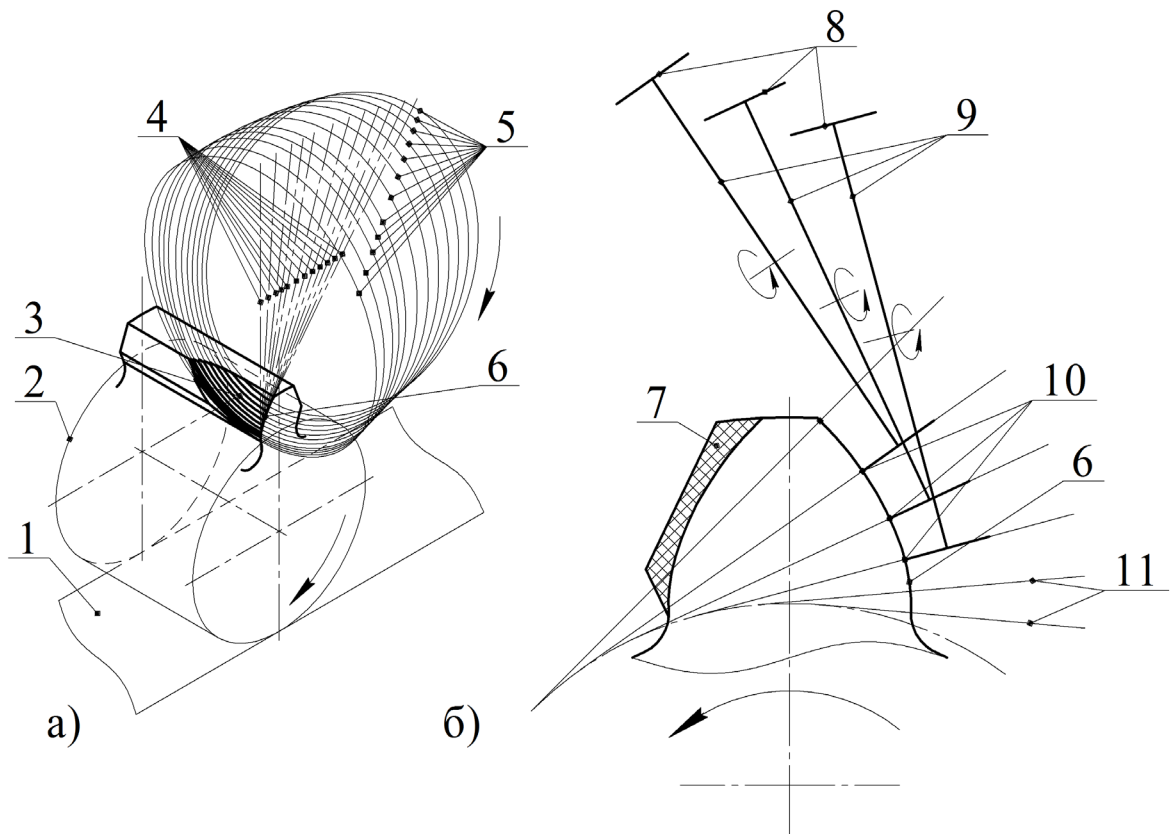


Рис. 3.22 Утворення евольвентного профілю при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні

а) схема руху точки різальної кромки, яка описує оброблювану евольвентну поверхню в умовах заміщення обертового руху обкату на прямолінійний; б) діаметральний переріз схеми;

1 – дотична до основного циліндра площина; 2 – основний циліндр оброблюваного зубчастого колеса; 3 – оброблювана поверхня; 4 – множина осей, які утворюють площину діаметрального перерізу; 5 – множина окружностей, які повторюють траєкторію руху початкової точки формуючої різальної кромки інструменту; 6 – номінальний евольвентний профіль зубця; 7 – припуск на чистову обробку; 8 – формуючі різальні кромки інструменту; 9 – інструмент; 10 – початкові точки формуючої різальної кромки інструменту; 11 – продовження радіусів кривизни евольвентного профілю.

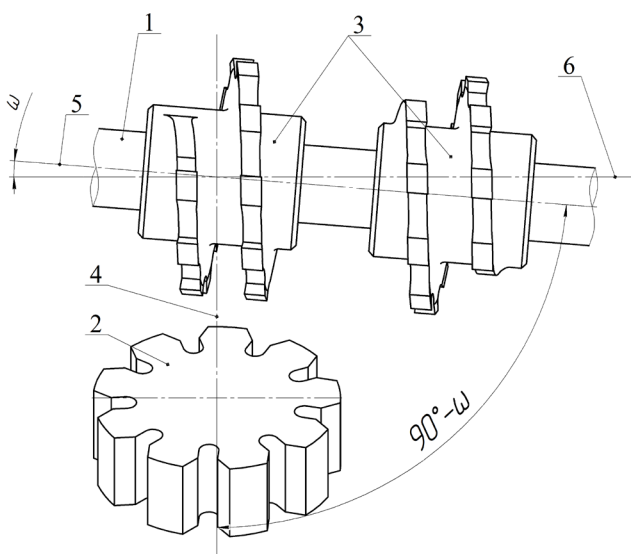


Рис. 3.23 Схема установки фрези на кут підйому гвинтової лінії

1 – інструментальна оправка; 2 – заготовка; 3 – комплект черв'ячно-контурних фрез; 4 – геометрична вісь обертання деталі; 5 – геометрична вісь обертання фрези; 6 – номінальне положення вісі; ω – кут нахилу гвинтової лінії фрези.

На першому проході з повздовжнім переміщенням, наприклад, вниз, працює одна з комплекту черв'ячно-контурних фрез, при цьому обробляються праві чи ліві профілі на всіх зубцях, як показано на рис. 3.24.

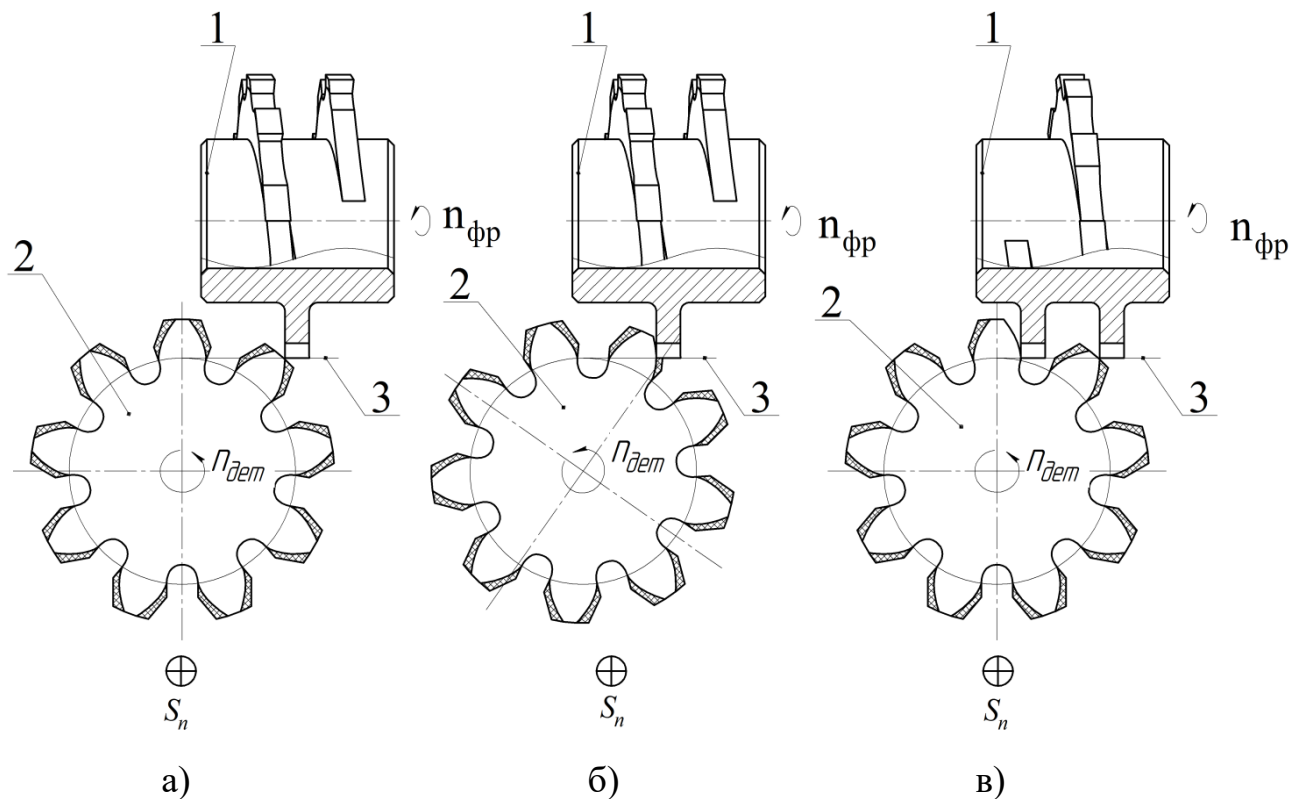


Рис. 3.24 Обробка зубчастого колеса на першій позиції

а) початок процесу формоутворення профілю; б) формоутворення профілю; в) закінчення процесу формоутворення профілю

1 – інструментальна оправка; 2 – заготовка; 3 – комплект черв'ячно-контурних фрез;
 $n_{фр}$ – обертання фрези; $n_{дет}$ – обертання деталі; S_n – повздовжня подача.

Після закінчення проходу «зверху вниз» відбувається переміщення інструментального шпінделя на другу позицію, на довжину L , і в роботу вступає друга фреза, яка здійснює обробку опозитного профілю, при ході фрезерного супорта «знизу вгору». Напрямок обертання деталі при обробці опозитних профілів протилежний напрямку обертання при першому переході, аналогічно для фрези (рис. 3.25).

Здійснення запропонованого методу обробки можливе на існуючих зубофрезерних верстатах з ЧПУ.

На описаний спосіб обробки евольвентних профілів зубчастих коліс було отримано два патенти України, які наведені у додатку Г [60] та додатку Д [61]).

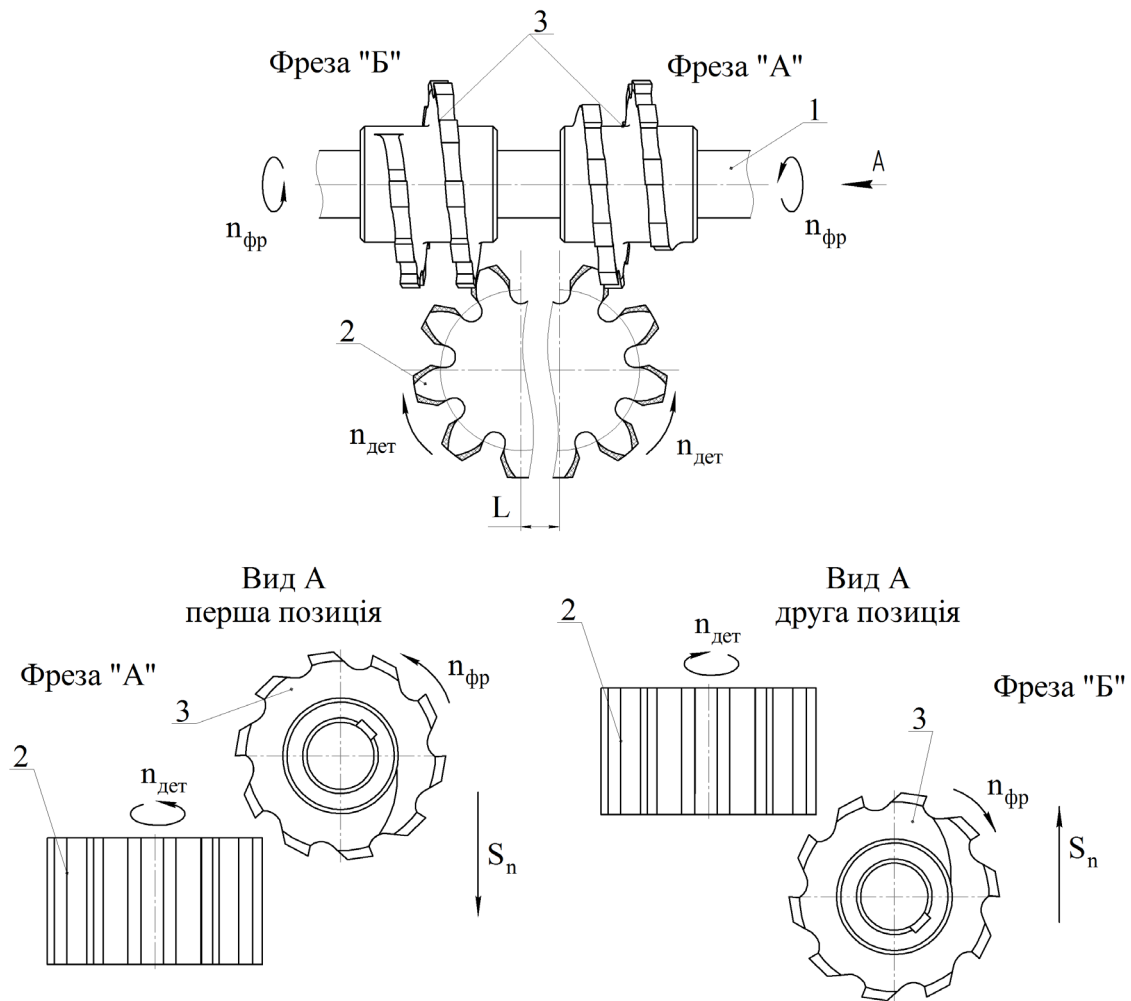


Рис. 3.25 Робочі рухи та переміщення
при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні

1 – інструментальна оправка; 2 – заготовка; 3 – комплект черв'ячно-контурних фрез;
 $n_{фр}$ – обертання фрези; $n_{дет}$ – обертання деталі; S_n – повздовжня подача;
 L – переміщення заготовки на другу позицію.

3.6 Теоретичні дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування

3.6.1 Аналіз енергоємності черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі відомих досліджень контурного зубофрезерування

Згідно з описаною в розділі 2.2.6.1 методикою, задаємось значеннями сил F_z та F_y з джерела [30]. Момент різання на шпінделі виробу $M(F_y)$ розраховується згідно схеми рис. 2.11 по формулам (2.4, 2.26). Потужність на інструментальному шпінделі та шпінделі виробу розраховується за формулами (2.7, 2.8), відповідно. Отримані осцилограмні епюри приведено на рис. 3.26.

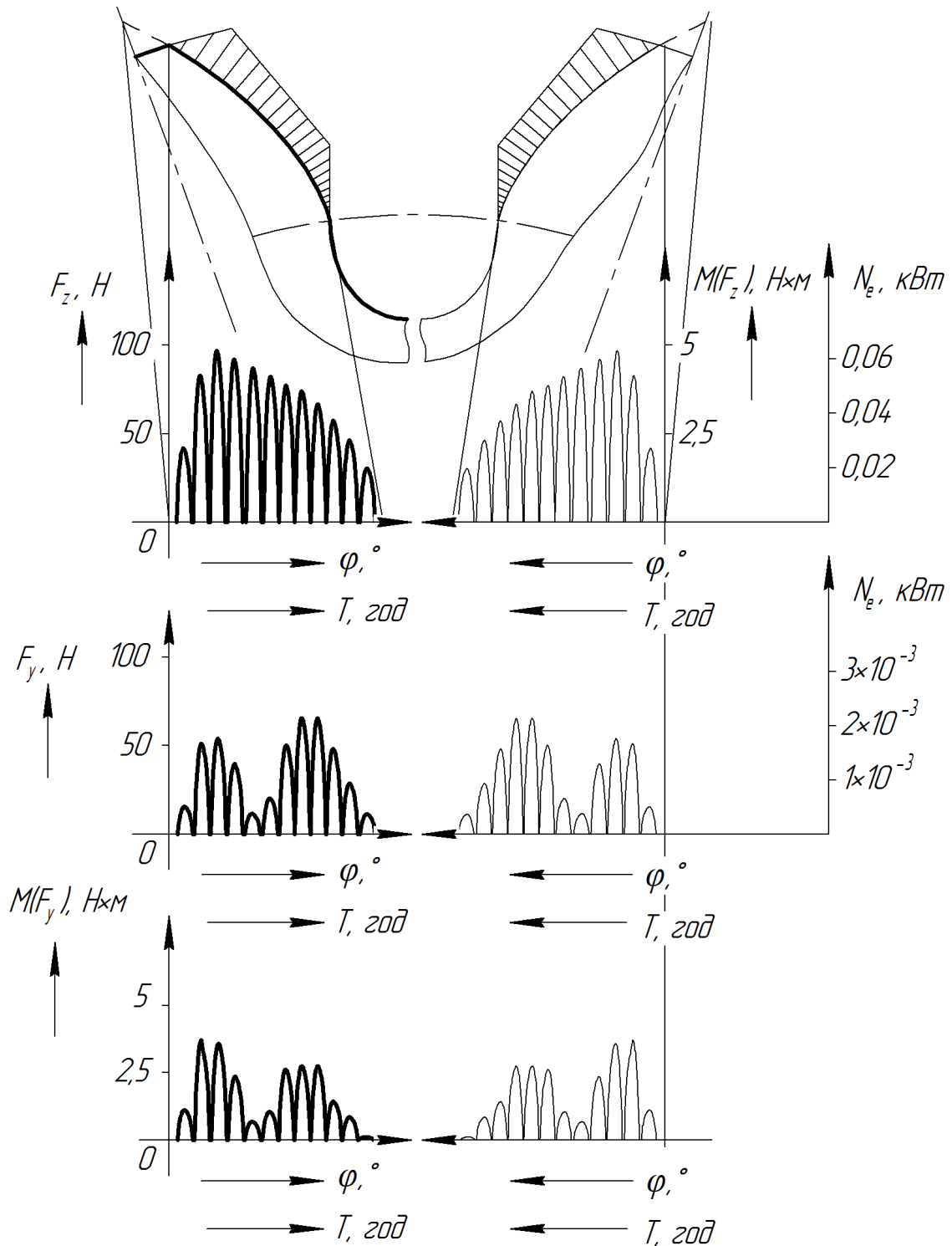


Рис. 3.26 Осцилограмні епюри складових сили різання та крутних моментів при обробці западини зубчастого колеса методом контурного зубофрезерування

Енергоємність процесу контурного зубофрезерування розраховуємо по формулам (2.12...2.17) для інструментального шпінделя і шпінделя виробу.

Вихідні дані дослідження зведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3

Найменування визначених параметрів	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	
			Інструментальний шпіндель	Шпіндель виробу
Діапазон сил різання	F_z	Н	63...106	-
	F_y		-	32...65
Площа активної частини осцилограмних епюр	S	мм ²	82,02	40,03
Діапазон крутних моментів	$M(F_z)$	Н·м	4,7...5,3	-
	$M(F_y)$		-	1,2...3,7
Діапазон потужностей	$N(F_z)$	кВт	0,03...0,0628	-
	$N(F_y)$		-	$0,816 \cdot 10^{-3} \dots 2,1 \cdot 10^{-3}$
Енергоємність	$E(F_z)$	кВт·год	0,07301	-
	$E(F_y)$		-	0,001836

Як видно з отриманих даних, обробка контурним зубофрезеруванням характеризується помірними величинами сил різання, відсутністю перемінності складової сили різання F_z по напрямку та у 40 разів більшу енергоємність інструментального шпінделя, ніж шпінделя виробу.

3.6.2 Аналіз процесів формоутворення черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі комп'ютерної моделі кінематики зубофрезерування

Для дослідження процесів формоутворення при нарізанні номінального зубчастого колеса методом черв'ячно-контурного зубофрезерування, виміряємо площу зрізаємого шару, товщину та ширину зрізів, що знімається кожним окремим зубцем черв'ячно-контурної фрези. Дослідження виконується в умовах комп'ютерного моделювання згідно з методикою, описаною у р. 2.2.6.2, при цьому моделюється обробка одного евольвентного профілю, рис. 3.27.

Геометрична форма одиничних зрізів та відокремлюваних елементів

На рис. 3.28 представлені геометричні форми одиничних зрізів на твірних позиціях при обробці одного евольвентного профілю.

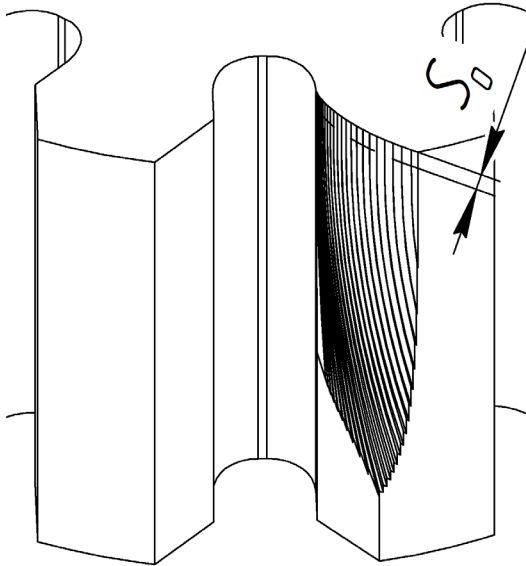


Рис. 3.27 Схема розподілу зрізів при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні

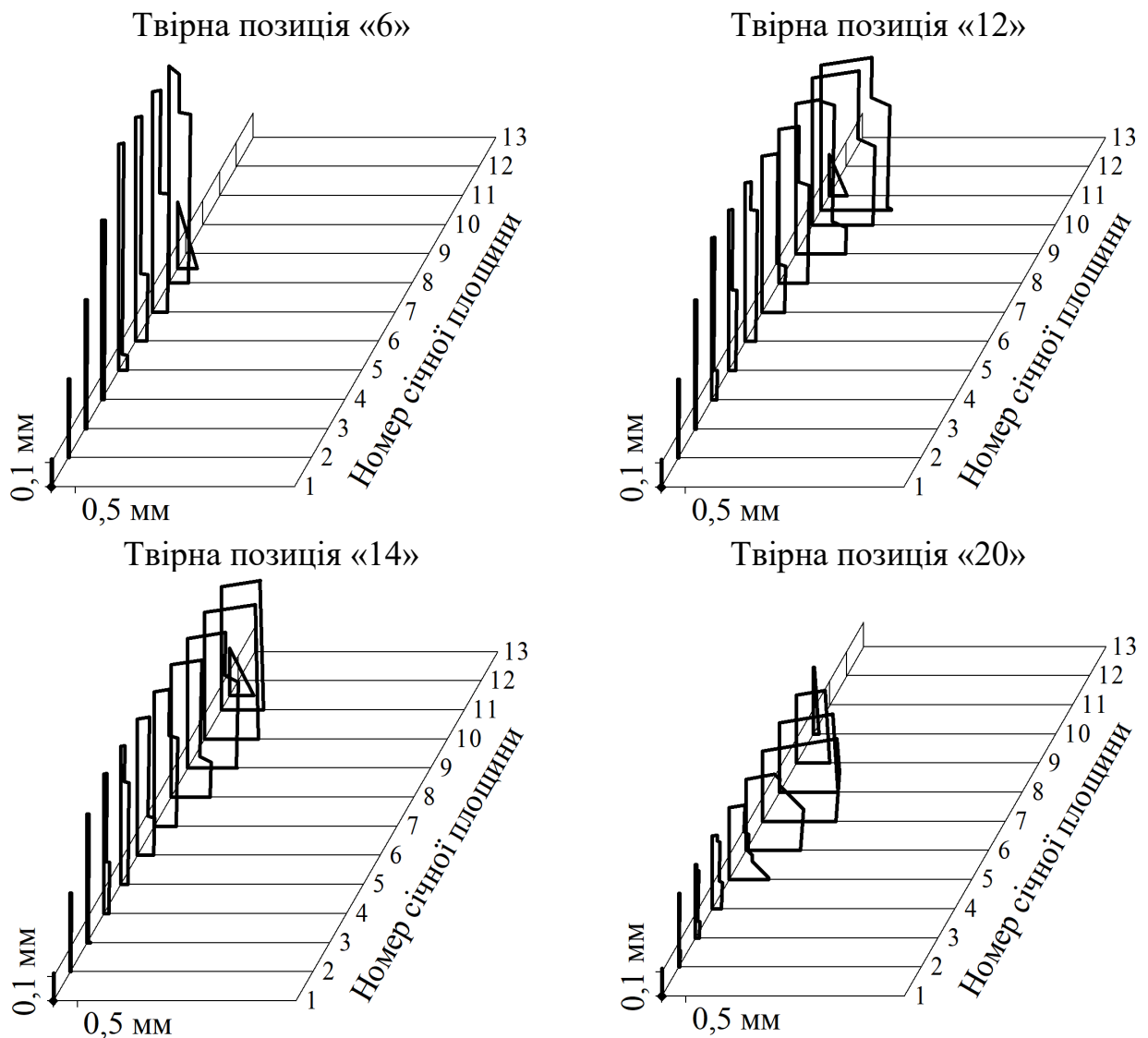


Рис. 3.28 Масштабна схема розміщення окремих площин перерізів в межах евольвентного профілю по траєкторії руху зубця черв'ячно-контурної фрези

Повний комплект масштабних схем площин перерізів у межах обробки одного евольвентного профілю приведено у додатку Е.

Як видно з рисунків, зубець черв'ячно-контурної фрези переважно зрізає шар в 3...10 разів більшою товщиною, ніж шириною, що, згідно досліджень [32], може являтися джерелом зменшення питомих енергозатрат.

Відносно подібні зрізаємі шари на всіх твірних позиціях, створюють передумови для набуття астатичності процесу різання, та можливості керування процесом різання.

Як видно з рис. 3.28, під час обробки зубець фрези стабільно навантажений на вершині РК. Це спрощує прогнозування зносу інструменту та його ресурс.

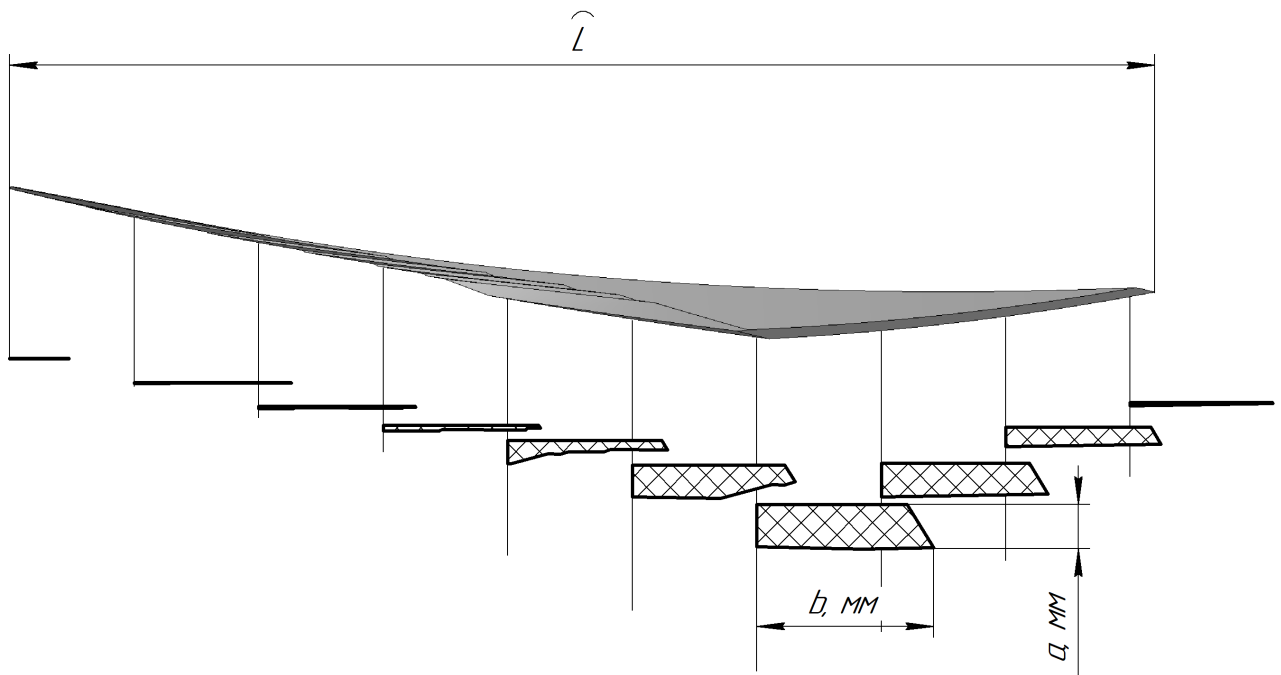
Форми отриманих моделюванням недеформованих відокремлюваних елементів представлені на рис. 3.29.

Відокремлювані елементи мають просту, відносно рівнобічну форму, яка характеризується симетричним потовщенням на кінці.

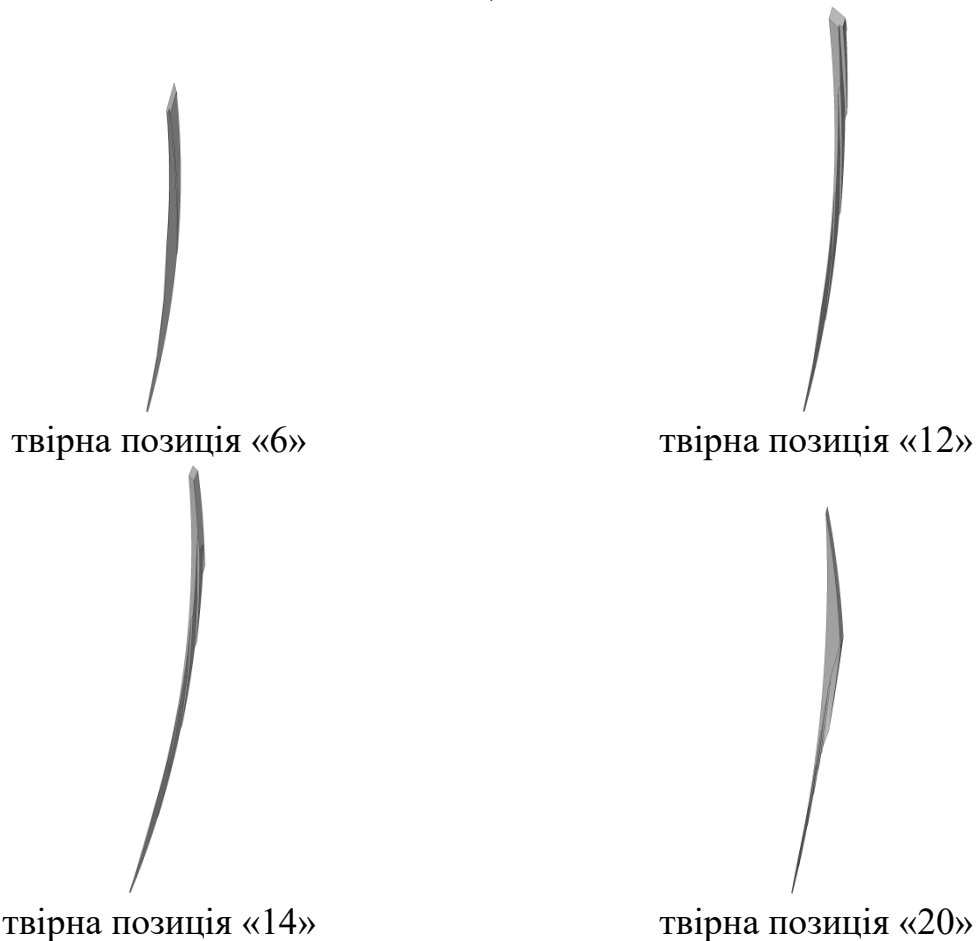
Чисельні значення розмірів одиничних зрізів

По отриманим під час моделювання чисельним значенням розмірів одиничних зрізів (наведено у додатку Ж) побудовано графіки залежностей, рис. 3.30...3.32.

При контурній взаємодії різальної кромки і оброблюваної поверхні евольвентний профіль утворюється як огинаюча послідовних положень матеріальних точок (вершини різальної кромки) зубців черв'ячно-контурної фрези при безперервному обкаті. Ширина різу сягає $a = 1,0113$ мм (рис. 3.31). Значення товщини різу, згідно графіка рис. 3.32, сягає $b = 1,644$ мм. Розподіл величин площ одиничних зрізів рівномірний, з піком у «11...13» твірних положеннях, рис. 3.30.



а)



б)

Рис. 3.29 Форми відокремлюваних елементів, отриманих моделюванням черв'ячно-контурного зубофрезерування

- а) схема перерізів відокремлюваних елементів;
 б) форми відокремлюваних елементів на твірних позиціях.

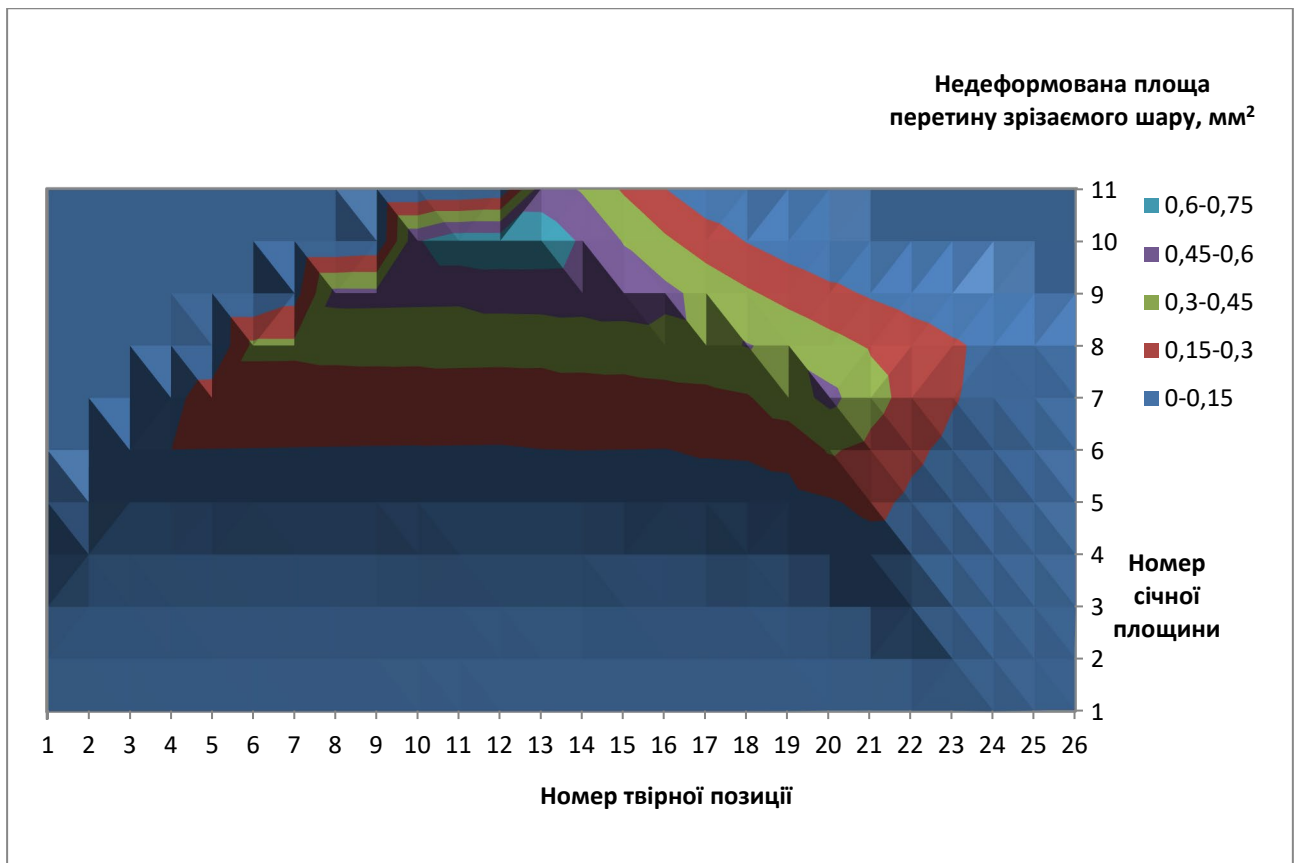


Рис. 3.30 Недеформована площа перетину зрізаємого шару

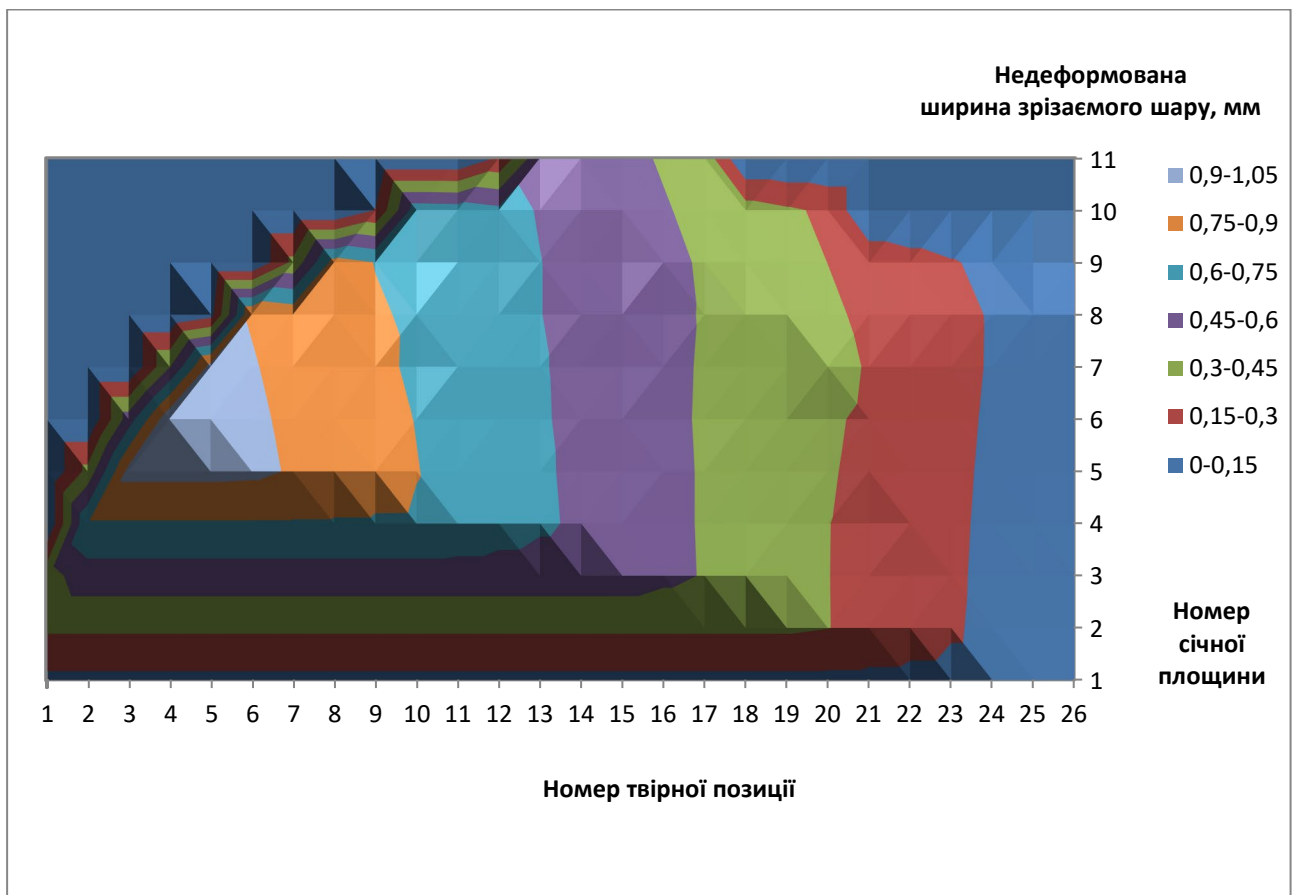


Рис. 3.31 Недеформована ширина зрізаємого шару

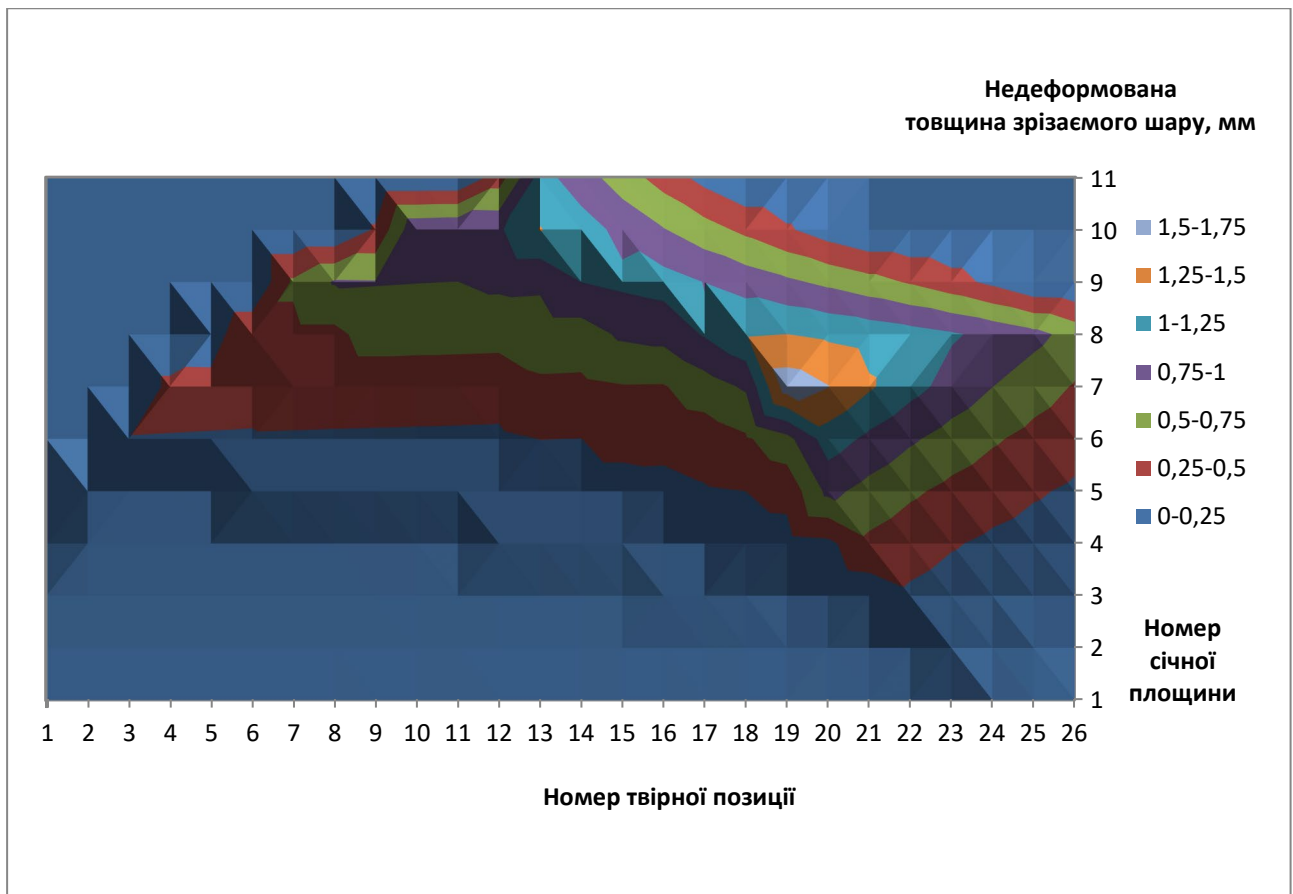


Рис. 3.32 Недеформована товщина зрізаємого шару

3.6.3 Аналіз енергоємності черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі дослідження процесів формоутворення

Дослідження проводиться згідно з методикою, описаною у р. 2.2.6.3.

Отримані значення відносного модуля сили різання $|F_z|$ шляхом підстановки значення глибини (товщини) різання і ширини різку у формулу (2.21) та наближене значення відносного модуля сили різання $|F_y|$ розрахованого через масштабний коефіцієнт, взятий з відношення складових сил різання в роботах [27, 92, 122], представлено у вигляді графіка рис. 3.33.

Відносний крутний момент $M(F_z)$ тотожний відповідному відносному модулю сили різання $|F_z|$, а $M(F_y)$ визначається за формулою (2.26). Комп'ютерна осцилограма крутного моменту $M(F_y)$ представлена на рис. 3.33.

На осцилограмах (рис. 3.33) видно, що при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні, на протязі всієї обробки евольвентного профілю, крутний

момент не знижується до нуля [2]. Черв'ячно-контурна фреза працює рівномірно завдяки зменшеному окружному кроку.

Розраховані значення відносних модулів енергозатрат $|E|$ по формулі (2.25) на шпінделі інструменту та шпінделі виробу для черв'ячно-контурного зубофрезерування рівні, відповідно, $|E_{Mz}| = 6,92$ та $|E_{My}| = 0,251$.

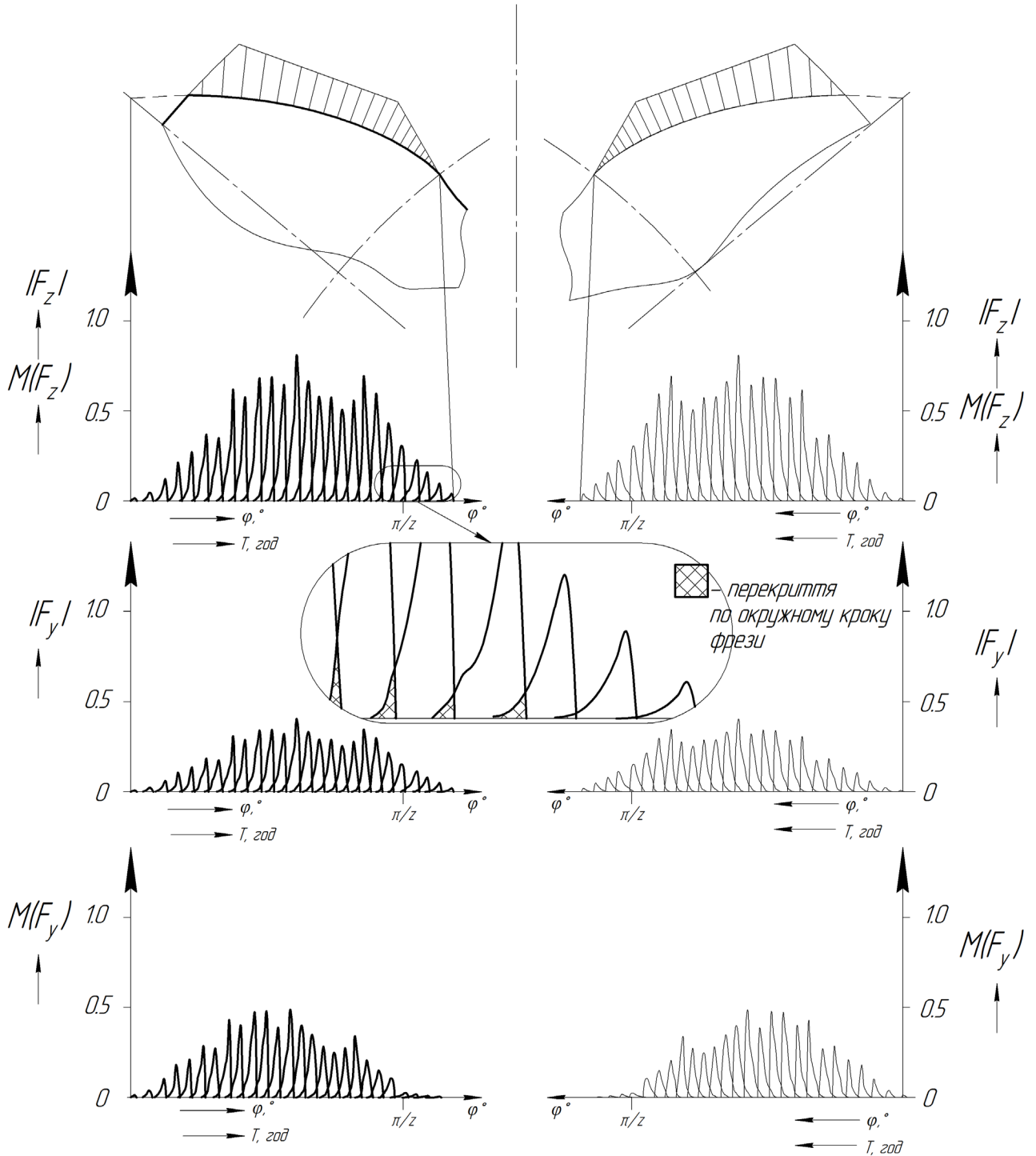


Рис. 3.33 Комп'ютерні осцилограмні епюри в межах однієї западини під час черв'ячно-контурного зубофрезерування

Вихідні дані дослідження зведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4

Найменування визначених параметрів	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення	
			Інструментальний шпіндель	Шпіндель виробу
Діапазон відносного модуля сили $ F $	$ F_z $	відносні одиниці сили	0,001...0,807	-
	$ F_y $		-	0,0003...0,371
Діапазон крутних моментів	$M(F_z)$	відносні одиниці моменту	0,001...0,807	-
	$M(F_y)$		-	0,0002...0,218
Відносний модуль енергозатрат	$ E(M_z) $	відносні одиниці енергоємності	6,92	-
	$ E(M_y) $		-	0,251

3.7 Висновки по розділу

1. На основі прийнятих припущень, у розділі проведено аналіз взаємодії РК інструменту та оброблюваної поверхні. Виявлено, що застосування способів зубообробки, які засновані на контурній взаємодії РК з оброблюваною поверхнею, має ряд переваг, зокрема:

- з'являється можливість зменшити діючі напруження на оброблених поверхнях у 2,25 разів, що дасть змогу зменшити похибки геометричної форми і розмірів внаслідок зняття напружень при термічній обробці;
- за рахунок зміни плеча сили різання (і як наслідок зменшення моменту на шпінделі деталі), та послідовній роботі правими та лівими профілями черв'ячного ділильного колеса, вдається досягти силового замикання ділильних пар верстату зі збільшенням їх ресурсу, адекватності процесів різання по різнойменним профілям зубчатого колеса та зменшення похибок обробки;
- в умовах моделювання процесів різання було визначено, що вплив похибки зміщення контуру інструмента на оброблюваний профіль деталі відсутній при контурній взаємодії РК з оброблюваною поверхнею;
- забезпечення необхідної величини залишкових гребінців при обробці (якості поверхні), можливе за умови зменшення колової подачі для як мінімум вдвічі;

- результати комп'ютерного моделювання сталості процесів різання підтвердили підвищення порядку рівню астатизму верстатної системи.

2. Здійснено синтез методу черв'ячно-контурного фрезерування, та розглянуто схему обробки зубчастого колеса комплектом з двох черв'ячно-контурних фрез. Метод реалізується на основі контурної взаємодії РК інструменту та оброблюваної поверхні та позиціонується як чистовий.

3. Проведені дослідження процесу формоутворення в умовах тривимірного комп'ютерного моделювання дозволили зробити наступні висновки щодо черв'ячно-контурного зубофрезерування:

- переважні розміри поперечного перерізу відокремлюваних елементів мають співвідношення товщини до ширини в межах 3...10 разів, тому потребують набагато менших питомих енергозатрат для обробки, у порівнянні зі традиційним черв'ячним зубофрезеруванням, де відокремлювані елементи навпаки мають співвідношення ширини до товщини в межах 20...30 разів;
- відокремлювані елементи мають просту, відносно рівнобічну форму, яка характеризується симетричним потовщенням на кінці, на відміну від традиційного черв'ячного зубофрезерування, яке характеризується відокремлюваними елементами, які мають стрічкоподібну форму, та має місце обробка двома різальними кромками одночасно;
- величини перетинів одиничних зрізів при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні розташовані відносно рівномірно по всій довжині обробки евольвентного профілю, в той час як при черв'ячному чистовому зубофрезеруванні найбільші значення перетинів одиничних зрізів належать зоні обробки евольвентного профілю на вершині зубця заготовки.

4. На основі даних про перетини одиничних зрізів, були отримані комп'ютерні осцилограми відносних модулів сили різання та відносні крутні моменти різання. Осцилограми відтворюють навантаження від сили різання кожного зубця фрези. Аналіз осцилограм дав змогу зробити наступні висновки:

- черв'ячно-контурне зубофрезерування має кращі показники по рівномірності роботи внаслідок наявності перекриття по окружному кроку;
- розподіл сил різання рівномірний по всій довжині обробки профілю при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні, в той час як при черв'ячному чистовому зубофрезеруванні наявна перемінність складової сили різання F_x по напрямку, при переході від обробки вхідною різальною кромкою фрези, до роботи вихідною;
- використання черв'ячно-контурного зубофрезерування характеризується зниженням відносного модуля енергозатрат по інструментальному шпінделю в 2,5 рази, а по шпінделю виробу – у 4,5 рази.

Основні результати досліджень за розділом опубліковані у [60, 61, 74, 75, 76] та оприлюднені на конференціях.

3.8 Рекомендації

1. Виявлені під час аналізу залежності можуть бути корисні у подальших дослідженнях процесів зубофрезерування, при синтезуванні нових способів зубофрезерування, зуборізного інструменту та при аналізі шляхів підвищення точності обробки.

2. При розробці нових конструкцій вузлів зубообробних верстатів слід надавати перевагу сучасним сервоприводам та системам прямого приводу з огляду на недоліки черв'ячних ділильних пар.

3. Використання застосованих у розділі методик, зокрема по визначенню рівня астатизму або по дослідженню енергоємності в абсолютних або відносних одиницях, можливе для подальших досліджень процесів різання.

4. Переваги способу черв'ячно-контурного фрезерування слід розглядати як передумови для розробки технології зубообробки для умов гнучкого виробництва.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

ПРОЦЕСІВ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

4.1 Результати експериментальних досліджень процесів різання

Експеримент проводився для перевірки теорії, що описується в р. 3.3.3. Оброблені за схемами різання, що описані в розділі 2.4.1, поверхні представлені на рис. 4.1.

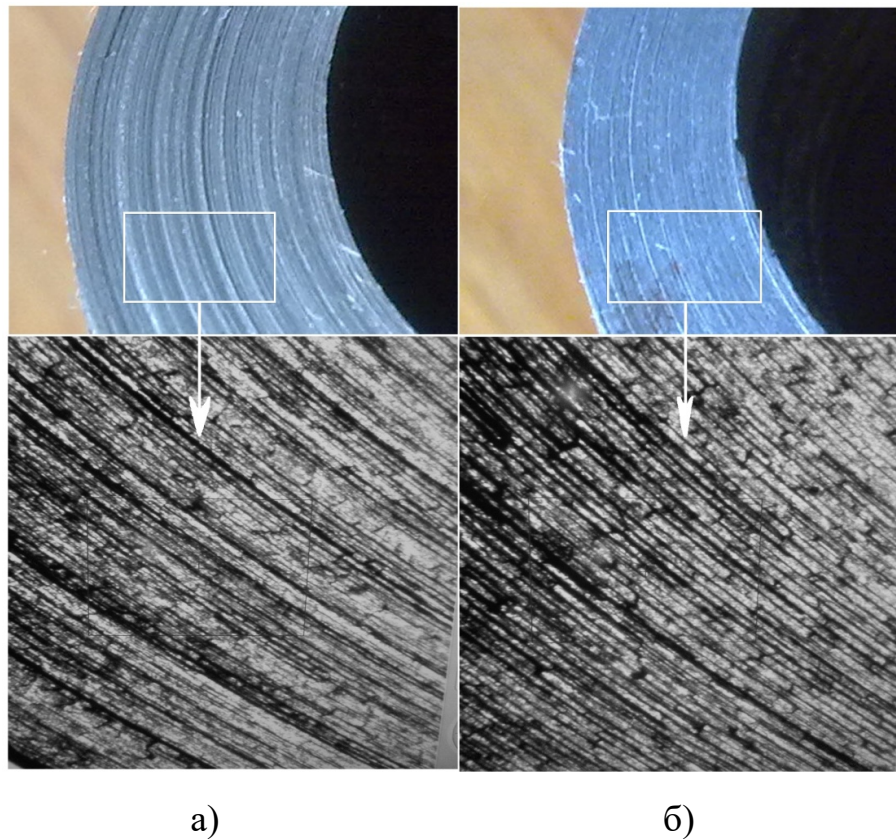


Рис. 4.1 Поверхні обробленого експериментального зразка

- а) поверхня, оброблена дотичною РК інструменту;
- б) поверхня, оброблена РК інструменту розташованою по нормалі.

При дослідженні отриманих поверхонь на мікроскопі було виявлено, що поверхня, оброблена дотичною РК (рис. 4.1, а) інструменту має значні макронерівності, хвилястість, шорсткість $Ra = 3,6$ мкм. Поверхня, оброблена РК інструменту розташованою по нормалі (рис. 4.1, б) має організовану та стабільну структуру нерівностей, шорсткість $Ra = 1,25$ мкм, не має значних перепадів.

За допомогою координатно-виміральної машини Carl-Zeiss Contura G2 була виміряна непрямолінійність оброблених різними методами поверхонь.

Результати у вигляді кривих представлено на рис. 4.2. Протоколи обміру приведені у додатку И.

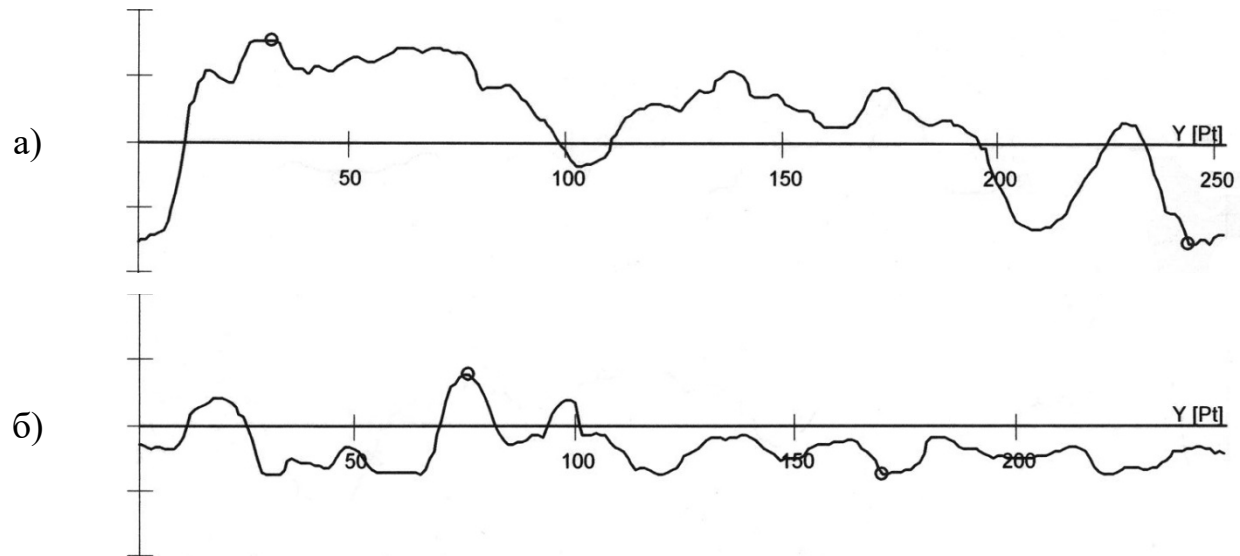


Рис. 4.2 Результати виміру непрямолінійності

- а) поверхня, оброблена дотичною РК інструменту;
 б) поверхня, оброблена РК інструменту розташованою по нормалі.

Непрямолінійність поверхні, обробленої дотичною РК інструменту становить 0,0622 мм, в той час як непрямолінійність поверхні, обробленої РК інструменту розташованою по нормалі рівна 0,0306 мм.

Результати експерименту зведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Назва параметру	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення
Обробка дотичною ГРК інструменту			
Шорсткість	Ra	мкм	3,6
Непрямолінійність	—	мм	0,0622
Глибина наклепу	h	мкм	30
Обробка ГРК інструменту розташованою по нормалі			
Шорсткість	Ra	мкм	1,25
Непрямолінійність	—	мм	0,0306
Глибина наклепу	h	мкм	6

4.2 Результати експериментальних досліджень процесів різання, які притаманні зубофрезеруванню, в умовах моделювання

4.2.1 Результати експериментального дослідження впливу характеру взаємодії ГРК інструменту з оброблюваною поверхнею на точність обробки при фізичному моделюванні процесів

Експеримент проводиться для підтвердження теоретичного дослідження, наведеного у р. 3.3.3. Методика проведення експерименту описана у р. 2.4.2.1.

На рис. 4.3 показано обробку заготовки на довбальному верстаті.

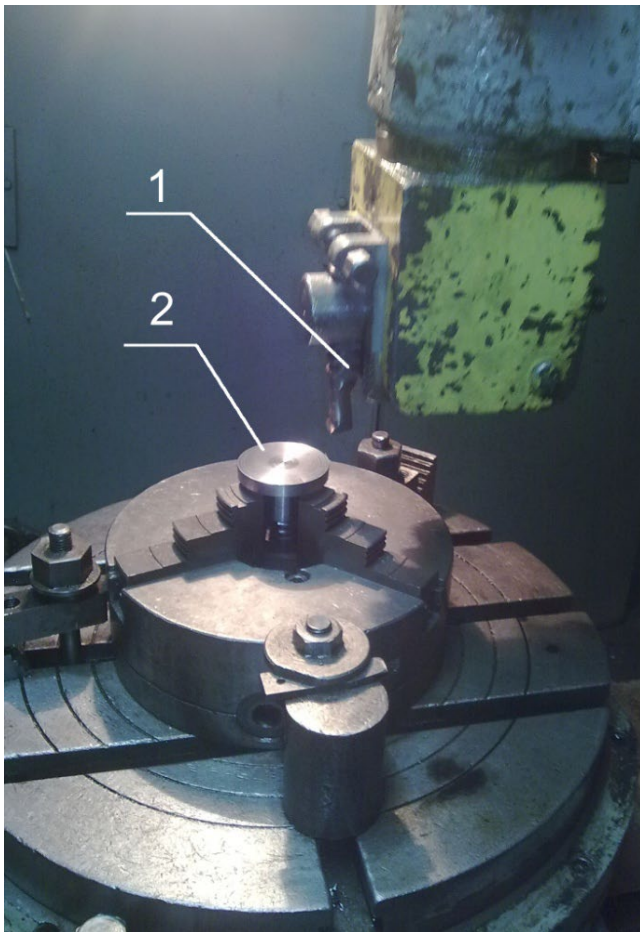
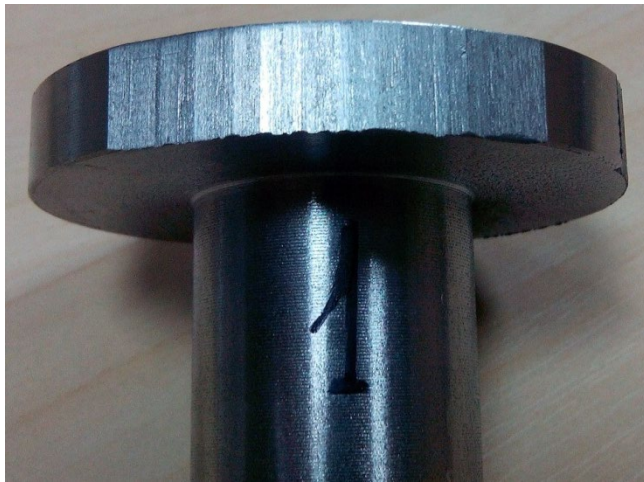


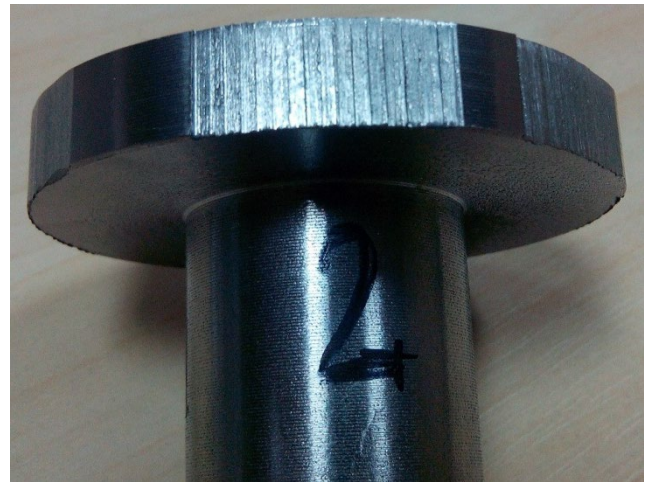
Рис. 4.3 Робоча зона верстата 7А420 під час обробки довбанням

1 – довбальний різець;
2 – заготовка.

На рис. 4.4 показані оброблені поверхні.



а)



б)



в)

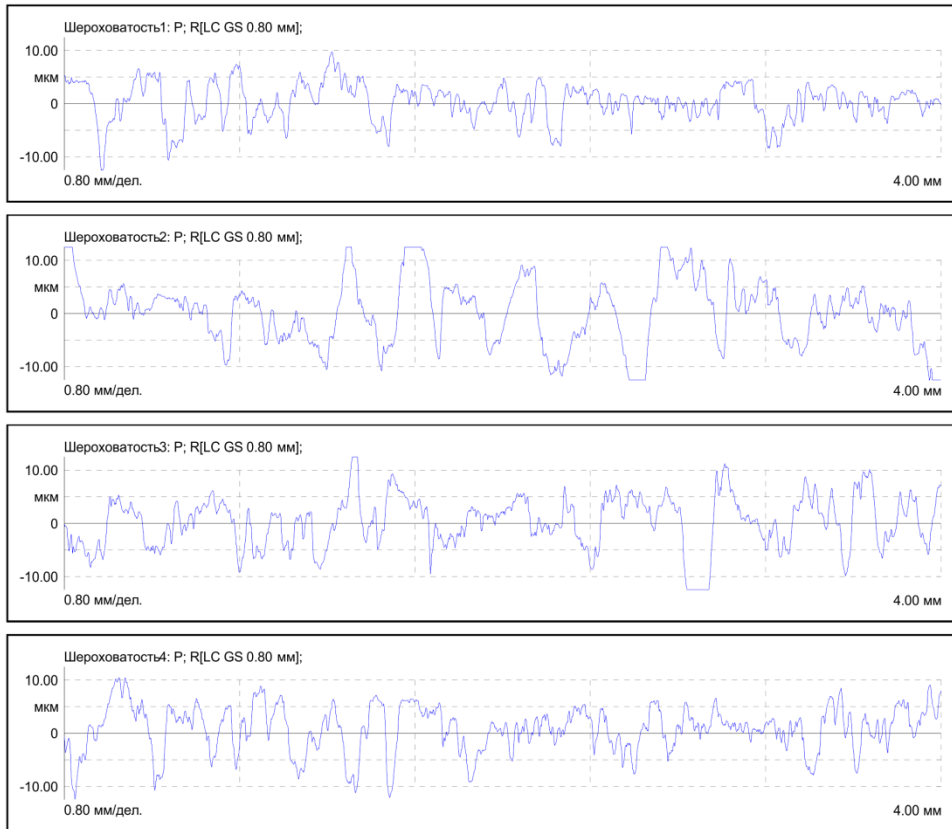


г)

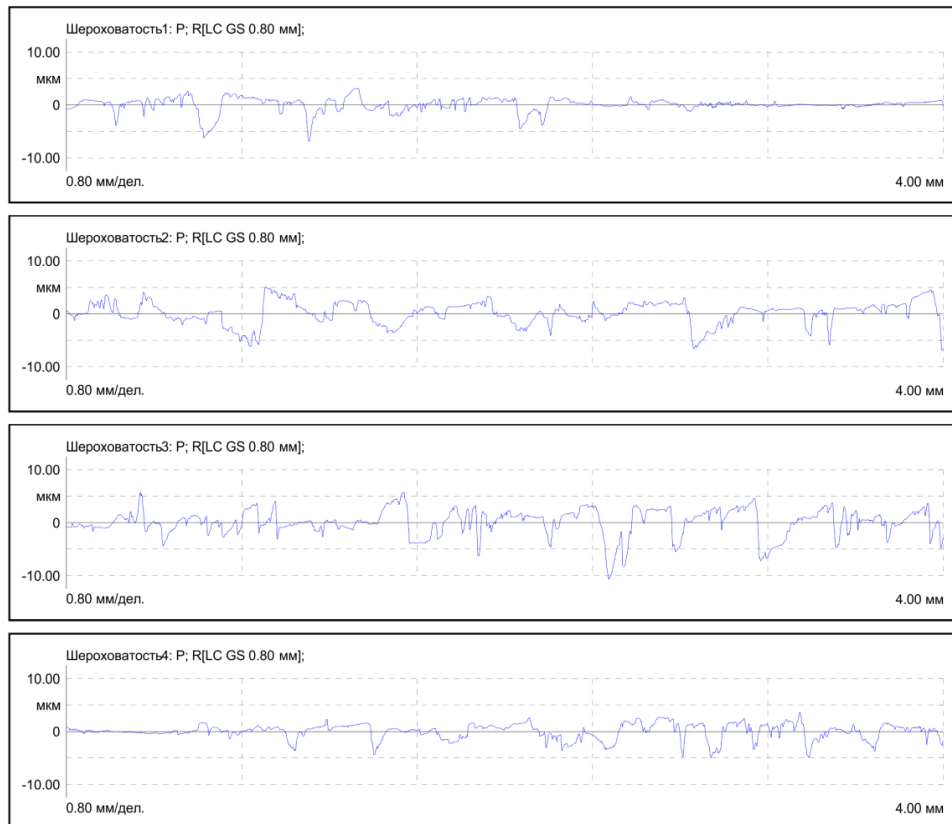
Рис. 4.4 Оброблені деталі

- а) $S_k = 5,5$ град/об, при дотичній ГРК різця до оброблюваної поверхні;
 б) $S_k = 2,5$ град/об, при нормальній ГРК різця до оброблюваної поверхні;
 в) $S_k = 1,5$ град/об, при нормальній ГРК різця до оброблюваної поверхні;
 г) $S_k = 1$ град/об, при нормальній ГРК різця до оброблюваної поверхні.

Деталі були обміряні на вимірювальній машині, отримані профілограми приведено на рис. 4.5. Протоколи обміру приведені у додатку К.



а)



б)

Рис. 4.5 Результати обміру дослідного зразка
 а) вимір повздовж твірної; б) вимір повздовж напрямної.

Результати експерименту зведено до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Шорсткість оброблених поверхонь по ISO P468

Характер взаємодії ГРК інструменту і оброблюваної поверхні	Колова подача S_k , град°/об	Чисельне значення шорсткості Ra , мкм	Примітки
ГРК різця дотична до оброблюваної поверхні	5,5	2,742	повздож твірної
		0,834	повздож напрямної
ГРК різця нормальна до оброблюваної поверхні	2,5	5,055	повздож твірної
		1,654	повздож напрямної
	1,5	3,080	повздож твірної
		1,851	повздож напрямної
	1	2,538	повздож твірної
		1,058	повздож напрямної

4.2.2 Результати експериментального дослідження впливу елементів режимів різання на величину шорсткості поверхні

Програма та методика експериментального дослідження наведена у р. 2.4.2.2.

Параметри моделі першого порядку отримані методом найменших квадратів за допомогою рівняння (2.34). На підставі результатів першого і другого блоків експериментів були отримані рівняння, що описують моделі для першого блоку виду:

$$\hat{y} = 4,902271 + (-0,100295)x_1 + (0,495556)x_2 + (0,064986)x_3, \quad (4.1)$$

та для другого блоку виду:

$$\hat{y} = 4,964631 + (-0,089649)x_1 + (0,523399)x_2 + (0,071965)x_3, \quad (4.2)$$

а також довірчі інтервали в 99%, що дають уявлення про точність і надійність оцінок шорсткості поверхні. Шляхом комбінації результатів, отриманих для двох блоків експериментів, і в результаті застосування методу найменших квадратів була отримана наступна модель першого порядку для шорсткості поверхні:

$$\hat{y} = 4,93 - 0,094x_1 + 0,509x_2 + 0,059x_3. \quad (4.3)$$

Рівняння (4.3) можна, користуючись формулами перетворення (2.35), (2.36) та (2.37), привести до наступного виду:

$$R_a = 842,467 \cdot V^{-0,366} \cdot S^{1,258} \cdot t^{0,185}, \quad (4.4)$$

де R_a – шорсткість поверхні, мкм;

V – швидкість різання, м/хв;

S – подача, мм/об;

t – глибина різання, мм.

Рівняння (4.4) показує, що зменшення шорсткості поверхні може бути досягнуто підвищенням швидкості різання, що збігається з даними інших досліджень. Зворотний результат досягається при збільшенні подачі або глибини різання, причому ефект впливу подачі є домінуючим.

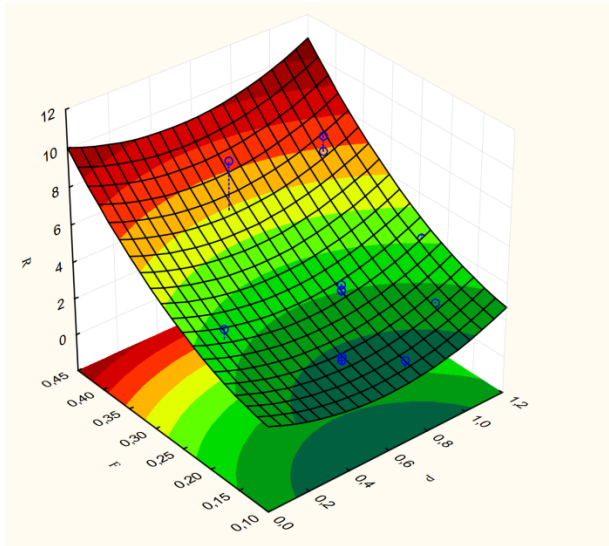
Аналіз дисперсій показав, що модель першого порядку адекватна для експериментів, як першого, так і другого блоків. Однак ретельне вивчення залишків ($y_i - \hat{y}_j$) показало, що великі залишки мають місце для вершинних точок, а малі залишки - для центральних точок схеми (плану) експериментів. Тому виявилось необхідним розширити експерименти з метою отримання математичної моделі другого порядку, яка може більш точно описати залежність між шорсткістю поверхні і факторами (змінними) процесу різання.

При використанні описаного вище центрального композиційного плану експериментів була отримана модель другого порядку для шорсткості поверхні, що описується рівнянням:

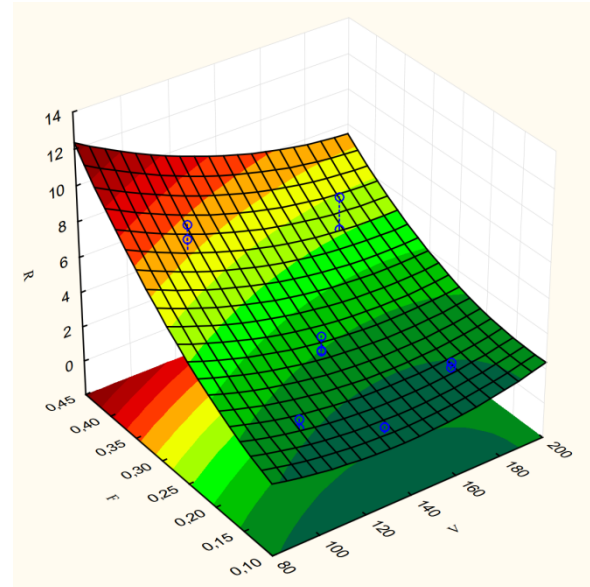
$$\begin{aligned} y = & (4,877269) + (-0,096004)x_1 + (0,533605)x_2 + (0,142880)x_3 + \\ & (-0,021547)x_1^2 + (0,054269)x_2^2 + (0,096922)x_3^2 + (0,003489)x_1x_2 + \\ & (0,013921)x_1x_3 + (0,005323)x_2x_3. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Проведений знову аналіз дисперсій показав, що ефекти першого порядку і квадратичні ефекти другого порядку є значущими. Ефекти взаємодії другого порядку не є значущими.

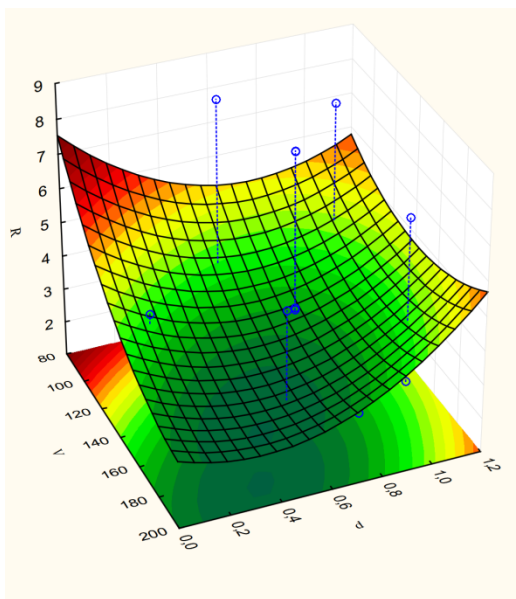
Значення шорсткості поверхні були отримані за допомогою моделі другого порядку та показані на рис. 4.6. Модель другого порядку для шорсткості поверхні, що складається з трьох змінних, була зведена до моделі з двома змінними шляхом фіксації на нульовому рівні третьої змінної.



а)



б)



в)

Рис.4.6 Поверхні відгуку

- а) шорсткість в залежності від подачі та глибини різання (при фіксованій на нульовому рівні швидкості різання);
- б) шорсткість в залежності від подачі та швидкості різання (при фіксованій на нульовому рівні глибини різання);
- в) шорсткість в залежності від швидкості різання і глибини різання (при фіксованій на нульовому рівні подачі).

Як видно на рис. 4.6, зі зростанням швидкості різання V шорсткість поверхні зменшується; збільшення ж подачі S тягне за собою збільшення шорсткості поверхні. Таким чином, найкраща чистота обробленої поверхні досягається при високих швидкостях різання і малих подачах. Але для

забезпечення мінімального часу обробки і швидкість різання, і подача повинні вибиратися можливо великими. За допомогою поверхонь відгуку, наведених на рис. 4.6, можливо вибрати таку комбінацію подачі і швидкості різання, яка забезпечить мінімальний час обробки при заданій шорсткості обробленої поверхні, так як число комбінацій цих факторів, що забезпечують однакову чистоту обробки, досить велике.

4.3 Результати експериментальних досліджень процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування

Після встановлення інструменту, заготовки, та налагодження верстату (методика описана у р. 2.4.3) було оброблено дві заготовки. На рис. 4.7 показано заготовку під час обробки.

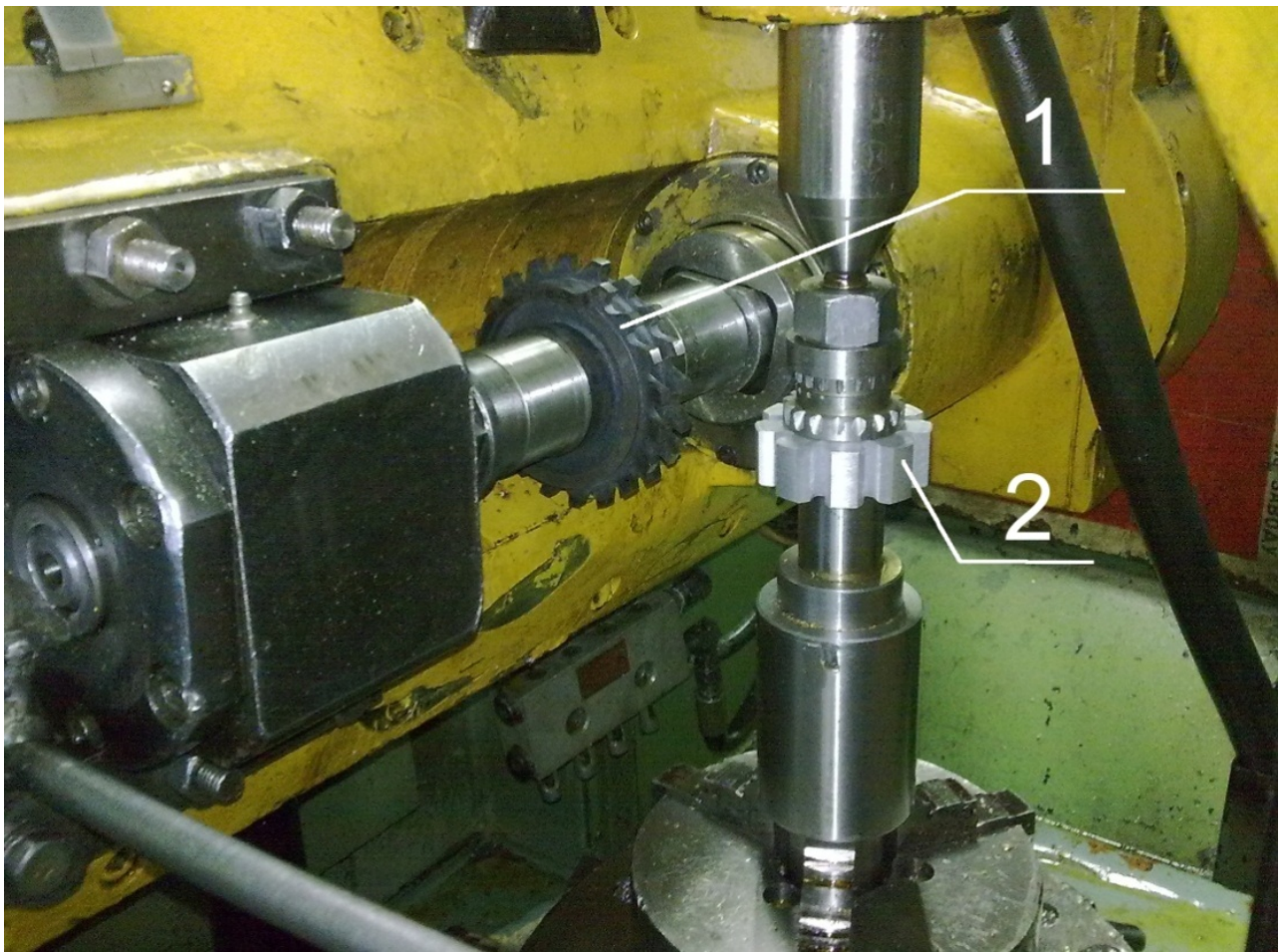


Рис. 4.7 Робоча зона верстата 53А30П під час обробки

1 – черв'ячно-контурна фреза; 2 – заготовка.

На рис. 4.8. показані оброблені деталі.

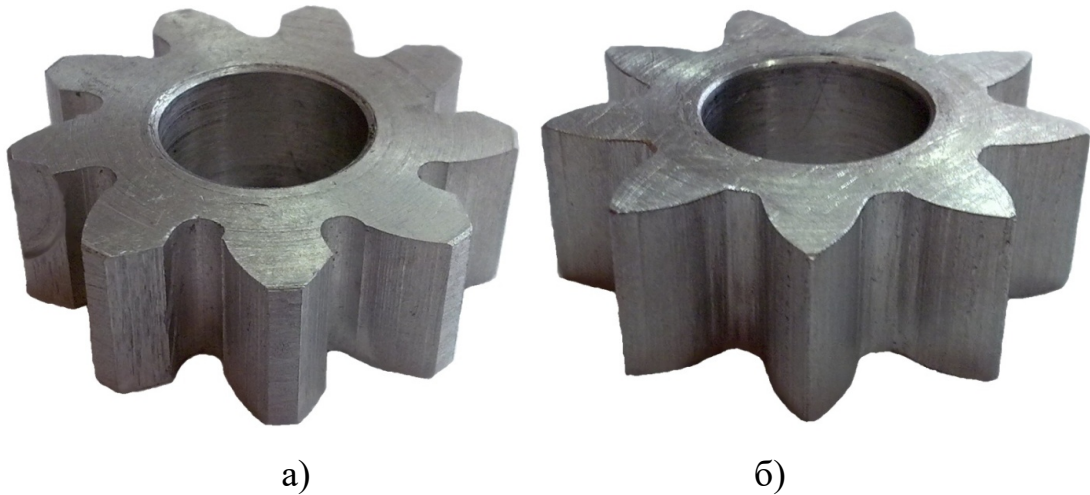


Рис. 4.8 Оброблені деталі

а) деталь після першого проходу; б) готова деталь.

Деталі були обміряні на координатно-вимірювальній машині (рис. 4.9). Отримані профілограми показано на рис. 4.10, у повному виді протокол на ведено у додатку Л.



Рис. 4.9 Обмір дослідного зразка

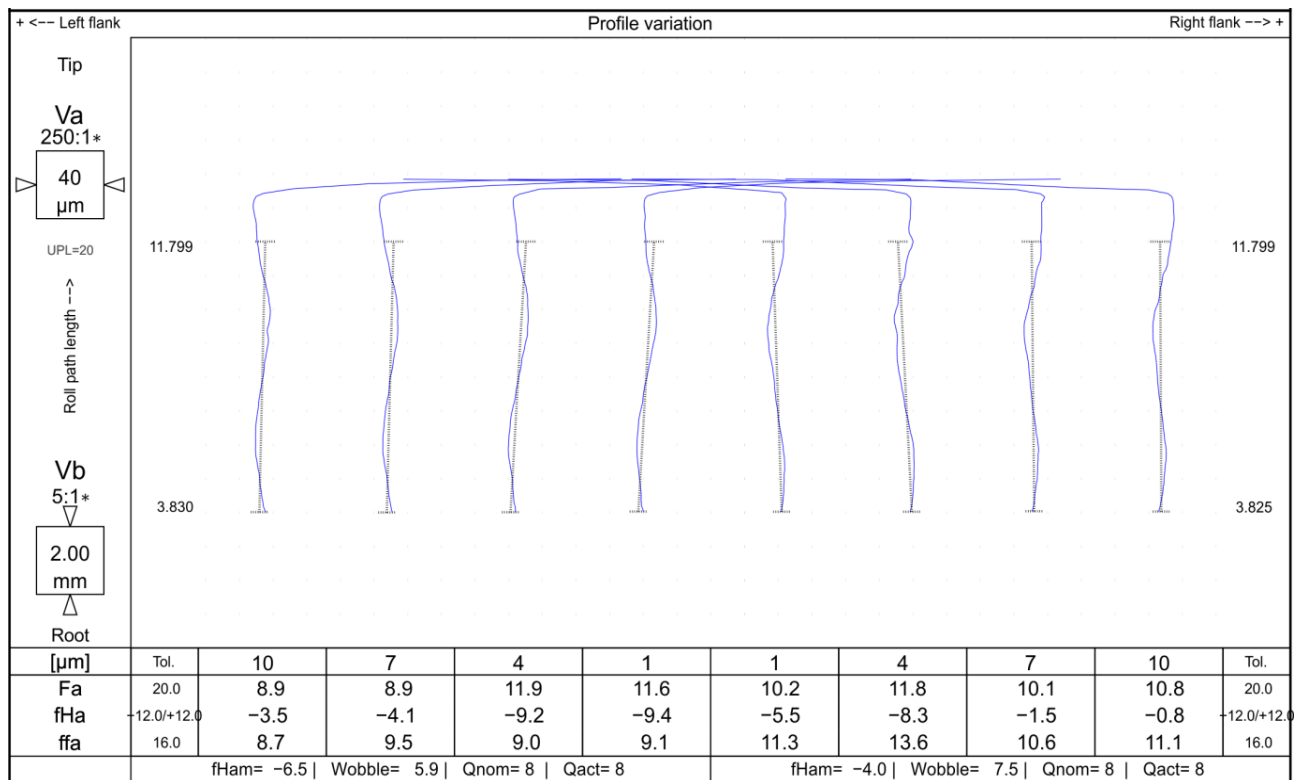


Рис. 4.10 Профілограма обмірної деталі

Результати експерименту зведено до табл. 4.3

Таблиця 4.3

Найменування		Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення
Шорсткість оброблених поверхонь по ISO P468	Повздож твірної	R_a	мкм	4,08
	Повздож напрямної	R_a	мкм	1,65
По DIN 3962	Похибка профілю	f_{fa}	мкм	13
	Похибка напрямку профілю	f_{Ha}		-9,5
	Похибка напрямку зубця	F_{β}		6,2
	Накоплена похибка кроків	F_p		17,7
	Радіальне биття зубчатого вінця	F_r		16,5

4.4 Висновки по розділу

1. При дослідженні процесів різання було виявлено, що поверхня, оброблена дотичною різальною кромкою інструменту (рис. 4.1, а), має значно гіршу якість, за всіма показниками, ніж поверхня, оброблена різальною кромкою інструменту розташованою по нормалі (рис. 4.1, б).

2. Експериментальне дослідження впливу характеру взаємодії ГРК інструменту з оброблюваною поверхнею в умовах довбання вказало на те, що ресурс по підвищенню колової подачі черв'ячно-контурної фрези дозволяє досягати не меншої якості обробленої поверхні, порівняно з черв'ячною фрезою.

3. Результати експериментальних досліджень впливу елементів режимів різання на величину шорсткості поверхні в умовах моделювання процесу показують кращу якість обробленої поверхні при розташуванні різальної кромки інструменту по нормалі до обробленої поверхні з функційними властивостями. Математична модель шорсткості була розроблена на основі використання методу характеристичних поверхонь. При використанні цього методу була отримана модель другого порядку для шорсткості, яка включає всі значущі параметри і була використана для побудови поверхонь відгуку параметра шорсткості.

4. Результати експериментального дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування показали, що правий і лівий профілі обробленої деталі (як видно з рис. 4.10) мають схожі по характеру спотворення профілограми. Це досягнуто за рахунок адекватних умов різання по правому і лівому профілю деталі при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні.

4.5 Рекомендації

1. Застосовувати черв'ячно-контурне зубофрезерування як чистовий спосіб обробки зубчастих коліс, а особливо, при необхідності забезпечення симетричності правих та лівих профілів деталі.

2. Надавати перевагу схемам різання з розташованою по нормалі до оброблюваної поверхні РК інструменту при проектуванні нових способів лезової обробки зубчастих коліс або зубообробного інструменту.

3. Побудовані поверхні відгуку шорсткості враховувати при виборі елементів режимів різання, так як вони можуть забезпечити підвищену продуктивність при збереженні необхідної величини шорсткості поверхні.

РОЗДІЛ 5

КОНЦЕПЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗУБООБРОБКИ ДЛЯ УМОВ ГНУЧКОГО ВИРОБНИЦТВА

5.1 Загальні положення

Враховуючи основні тенденції сучасної металообробки (такі як: зниження енергоємності процесів різання; концентрація операцій на одному верстаті типу обробний центр) виникає необхідність у реалізації проекту зубофрезерування в умовах диференційованої технології. І, як наслідок, виникає необхідність створення зубообробного центру з магазином змінних інструментів, з можливістю максимально забезпечити точність, та зосередження на одному обробному центрі повного циклу обробки зубчастих коліс по диференційованій технології.

Традиційну технологію обробки зубчастих коліс методом черв'ячного зубофрезерування можна умовно назвати методом з інтегрованим прорізанням западин з огляду на комплексне формування припуску під послідуочу обробку евольвентних поверхонь шляхом зняття ~90% матеріалу міжзубової западини. Метод містить в собі всі недоліки, притаманні черв'ячному зубофрезеруванню [26, 107, 130]. Тому, для реалізації диференційованої технології, було прийнято рішення синтезувати процес диференційованого попереднього прорізання западин комплектом дискових фрез для послідуочної реалізації процесу черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Диференційована технологія вміщує в собі:

- попереднє прорізання міжзубових впадин, комплектом дискових фрез (в умовах одиничного ділення);
- фрезерування лівих і правих профілів послідовно в умовах обкату;
- шевінгування профілів в умовах вільного обкату.

Найбільш ефективна реалізація проекту черв'ячно-контурного зубофрезерування можлива в умовах диференціації обробки, з огляду на те, що спрощення процесу формоутворення (схеми різання) при обробці методом

черв'ячно-контурного зубофрезерування, приводить до значного спрощення різального інструменту.

Також, до передумов створення технології гнучкого виробництва можна віднести:

- запобігання перемінності сил різання по модулю за рахунок вирівнювання товщини зрізу;
- розділення припуску на комплект інструменту для попереднього прорізання западин;
- розділення обробки по лівим та правим профілям, що виключає знакоперемінність сил різання;
- розвантаження кінематичного ланцюга шпінделя виробу при попередньому прорізанні впадин.

5.2 Синтез концептуальної схеми продукційного зубообробного центру для реалізації технології зубообробки в умовах гнучкого виробництва на базі черв'ячно-контурного зубофрезерування

5.2.1 Синтез компоновки та структурної схеми зубообробного центру

5.2.1.1 Синтез компоновки зубообробного центру

Практика верстатобудування постійно вказує на те, що правильний вибір і раціональна побудова компоновки роблять великий вплив на ефективність експлуатації верстата. Вплив проявляється за двома напрямками.

По-перше, через структуру, правильний вибір якої забезпечує необхідну універсальність або спеціалізацію верстата і його відповідність ряду технологічних та інших вимог.

По-друге, через вибір раціональних конструктивних виконань, розмірних пропорцій і розташування вузлів у просторі верстата, чим забезпечуються високі експлуатаційні показники.

На рис. 5.1 приведено розроблену компоновку верстата для здійснення зубообробки в умовах гнучкого виробництва.

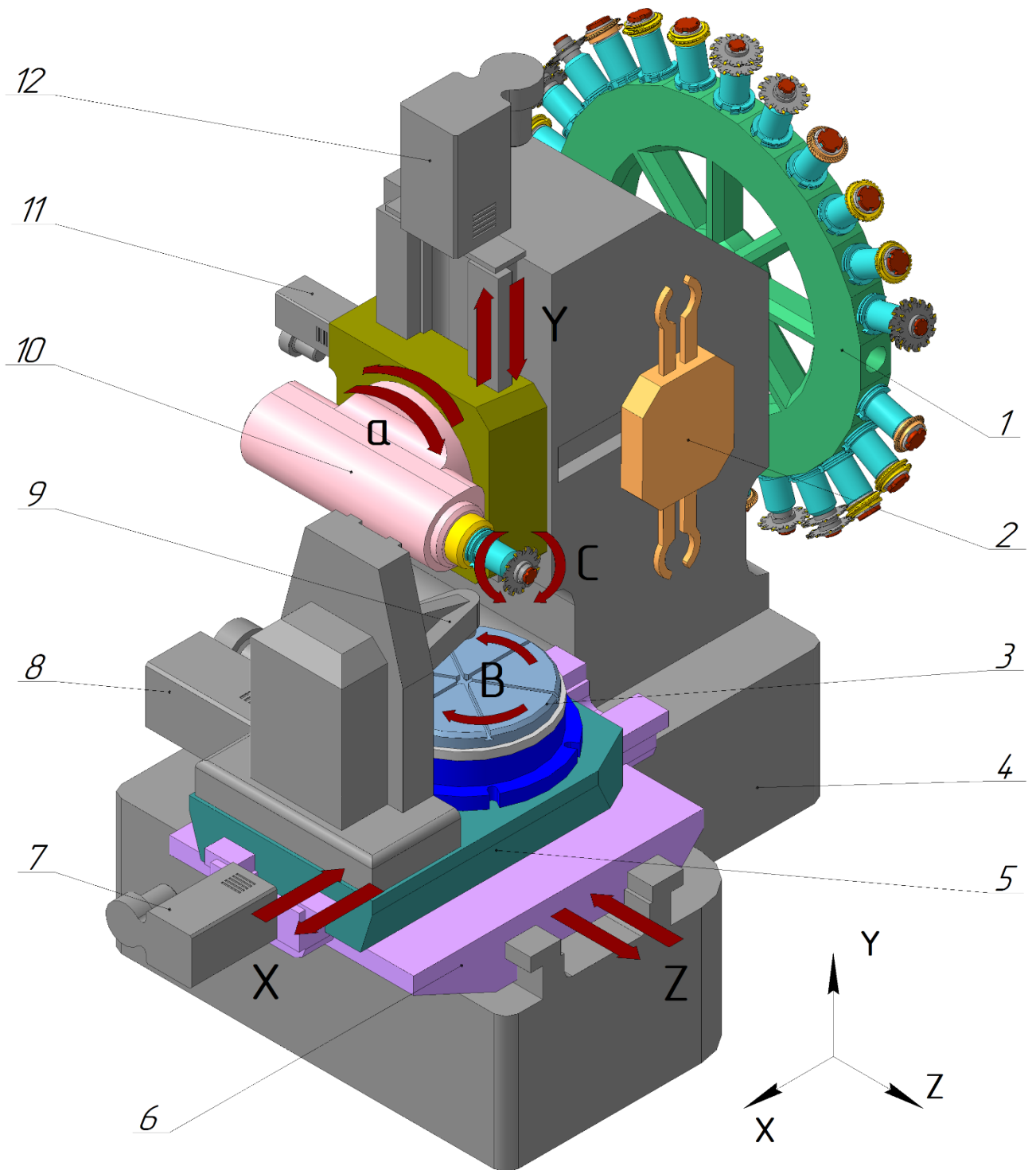


Рис. 5.1 Компоновка верстата для здійснення зубообробки
в умовах гнучкого виробництва

1 – інструментальний магазин; 2 – автооператор системи АЗІ; 3 – шпіндель виробу;
4 – станина; 5 – радіальний супорт шпінделя виробу; 6 – поперечний супорт шпінделя
виробу; 7 – сервопривод радіального супорта шпінделя виробу; 8 – сервопривод поперечного
супорта шпінделя виробу; 9 – верхній центр контрпідтримки; 10 – шпіндель інструменту;
11 – сервопривод кутового положення інструментального шпінделя;
12 – сервопривод повздовжнього переміщення інструментального шпінделя.

Гнучкий зубообробний центр, рис. 5.1, здатен виконувати попереднє прорізання западин та обробку способами черв'ячно-контурного зубофрезерування і шевінгування черв'ячним шевером [80]. Верстат оснащено інструментальним фрезерним шпінделем поз. 10, хрестовим ділильним столом зі шпінделем виробу поз. 3, інструментальним магазином поз. 1 та пристроєм автоматичної зміни інструменту (АЗІ) з двохзахватним автооператором поз. 2.

Обробка зубчатого колеса відбувається за один установ, наступним чином. Деталь встановлюється у шпінделі виробу поз. 3 та підтискається верхнім центром контрпідтримки поз. 9. На першій позиції відбувається прорізання западин та формування припуску на чистову обробку комплектом дискових фрез в умовах одиничного ділення. Для цього фрезерний супорт має можливість здійснювати повздовжній рух відносно деталі. Обробка евольвентних профілів методом черв'ячно-контурного зубофрезерування відбувається в умовах неперервного обкату.

У зв'язку з різноманітністю компоновок верстатів є необхідність у коротких записах, які могли б служити мовою і інструментом дослідження. Для цього коротке позначення компоновок повинно розкривати її структуру, дозволяти судити про розташування частин компоновок у просторі і надавати можливість використання того чи іншого математичного апарату досліджень. Всім цим вимогам задовольняє позначення компоновок за допомогою структурних формул, описаних в роботі [19], та яке використовується авторами інших робіт, які пов'язані із структурним конструюванням верстатів [1, 43]. В даній роботі використовується символіка, розроблена автором попередньо згаданої роботи, тому ми не визначаємо правила створення структурних формул.

Структурна формула компоновки - це певна послідовність символів, що позначають блоки компоновок, яка розкриває координатну приналежність і спосіб сполучення блоків.

Структурна формула синтезованої компоновки верстату:

$$B_V x z O^M Y a D_{v/h}.$$

Приведена компоновка верстату є найбільш доцільною для здійснення зубообробки в умовах диференційованих технологій. Верстат не обмежений у використанні комплекту інструментів, тому його використання являється бажаним для максимальної диференціації операцій.

Компоновка має найвищу ступінь гнучкості по розподілу умов різання при формоутворенні, тобто ступінь максимального спрощення інструменту за рахунок ускладнення верстату.

5.2.1.2 Аналіз формоутворюючих рухів кінцевих ланок зубообробного верстату

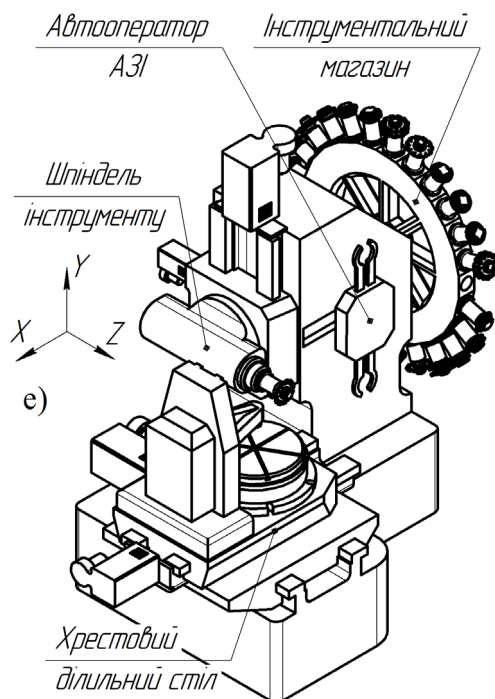
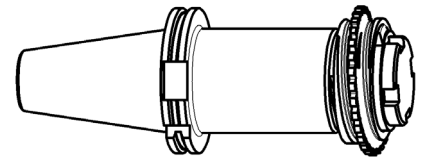
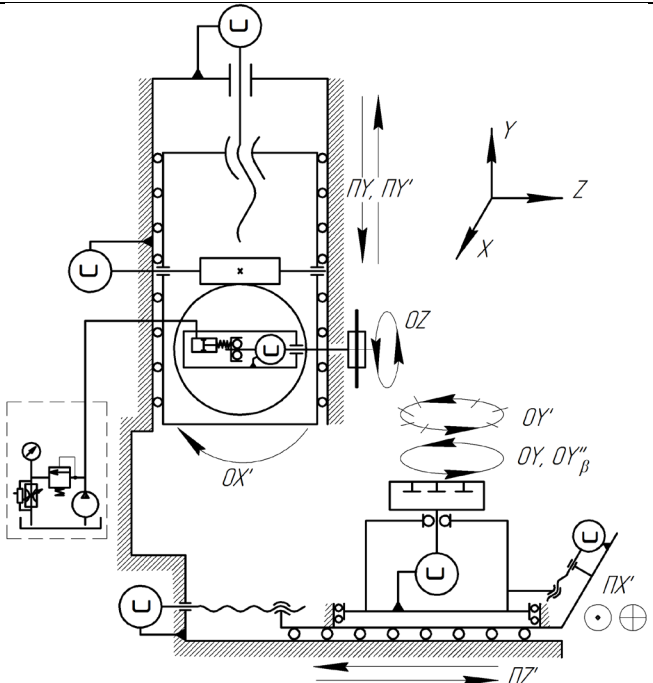
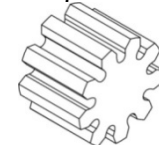
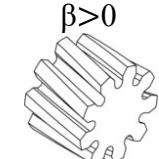
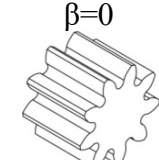
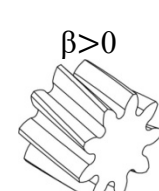
Визначальну роль при розмірній обробці заготовок грають траєкторії рухів формоутворення, від яких залежить найважливіший показник якості верстата – його точність. Задані траєкторії формоутворюючих рухів і їх розташування в просторі забезпечуються кінцевими ланками і несучою системою верстата. Сукупність кінцевих ланок і деталей несучої системи, яка характеризується їх кількістю, типом, просторовим розташуванням і пропорціями, називається компоновкою верстата.

Компоновка верстата, як правило, складається з одного стаціонарного (постійно нерухомого) і декількох рухомих елементів, розділених стиками. Кожен рухливий елемент компоновки виконує один певний координатний рух, переміщуючись по напрямних рухомого стику.

Відомі форми запису кінематики верстату [91], розглядаються як спрощений вираз кінематичної схеми. В зв'язку з тим, що сучасні верстати мають спрощену кінематичну схему, розповсюджений прямий привод, то більш доцільно ввести рівняння, які відображають рухи формоутворюючих кінцевих ланок, без допоміжних рухів.

Для здійснення зубообробки в умовах диференційованої технології проведено аналіз кінематики формоутворюючих рухів зубообробного центру, результати якого наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Компоновка верстата, структурна формула та комплект інструменту	Функційні параметри			
	Схема рухів	Рівняння суми формоутворюючих рухів кінцевих ланок $\sum P$	Оброблена поверхня	
<p>Автооператор АЗІ</p> <p>Інструментальний магазин</p> <p>Шпіндель інструменту</p> <p>Хрестовий дільний стіл</p> <p>$B_{yxz}O^M YaD_{v/h}$</p> <p>Інструментальна оправка з кінчним хвостовиком з встановленою черв'ячно-контурною фрезою</p>  	 <p> OY – рух ділення; OY' – дискретний рух ділення; OY''_{β} – рух додаткового ділення, який враховує гвинтову поверхню; OZ – рух різання; PY – рух формоутворення; PY' – установчий рух фрезерного супорту; PZ' – установчий рух столу; PX' – установчий рух столу; OY' – установчий рух шпінделя </p>	Прорізання впадин	$\sum P = OX' + PX + OZ$	$\beta=0$ 
		Прорізання впадин	$\sum P = OX' + PX \cdot OX''_{\beta} + OZ$	$\beta>0$ 
		Черв'ячно-контурне зубофрезерування черв'ячне шевінгування	$\sum P = OX \cdot OZ$	$\beta=0$ 
			$\sum P = OX \cdot OZ \cdot OX''_{\beta}$	$\beta>0$ 

Рівняння суми формоутворюючих рухів кінцевих ланок складені з урахуванням прийнятих положень [41]:

- по характеру руху, кінцевої ланки розрізняють обертальні (O) та поступальні (П);
- символ «+» означає кінематичну незалежність рухів, а символ «·» – кінематичну залежність.

5.2.1.3 Синтез структурної схеми верстата

На рис. 5.2 приведена структурна схема на основі розробленої у р. 5.2.1.1 компоновки верстату для здійснення зубообробки в умовах гнучкого виробництва.

На рис. 5.2 показано структуру основних вузлів зубообробного центру, зокрема:

- інструментального шпінделя поз. 11;
- шпінделя виробу поз. 2.

Інструментальний шпіндель розміщений на станині верстату з можливістю вертикального переміщення за допомогою серводвигуна поз. 14, та повороту на необхідний кут за допомогою поворотної платформи поз. 15 та її приводу поз. 13.

Окремо слід відзначити систему демпфування коливань інструментального шпінделя (ГВД) поз. 12 та її системи живлення поз. 10. Система демпфування встановлюється безпосередньо у інструментальному шпінделі поз. 11 для демпфування коливань, які виникають під час обробки зубчастих коліс.

Шпіндель виробу розміщується на хрестових напрямних поз. 7, поз. 4. Шпіндель виробу має прямий привод поз. 5.

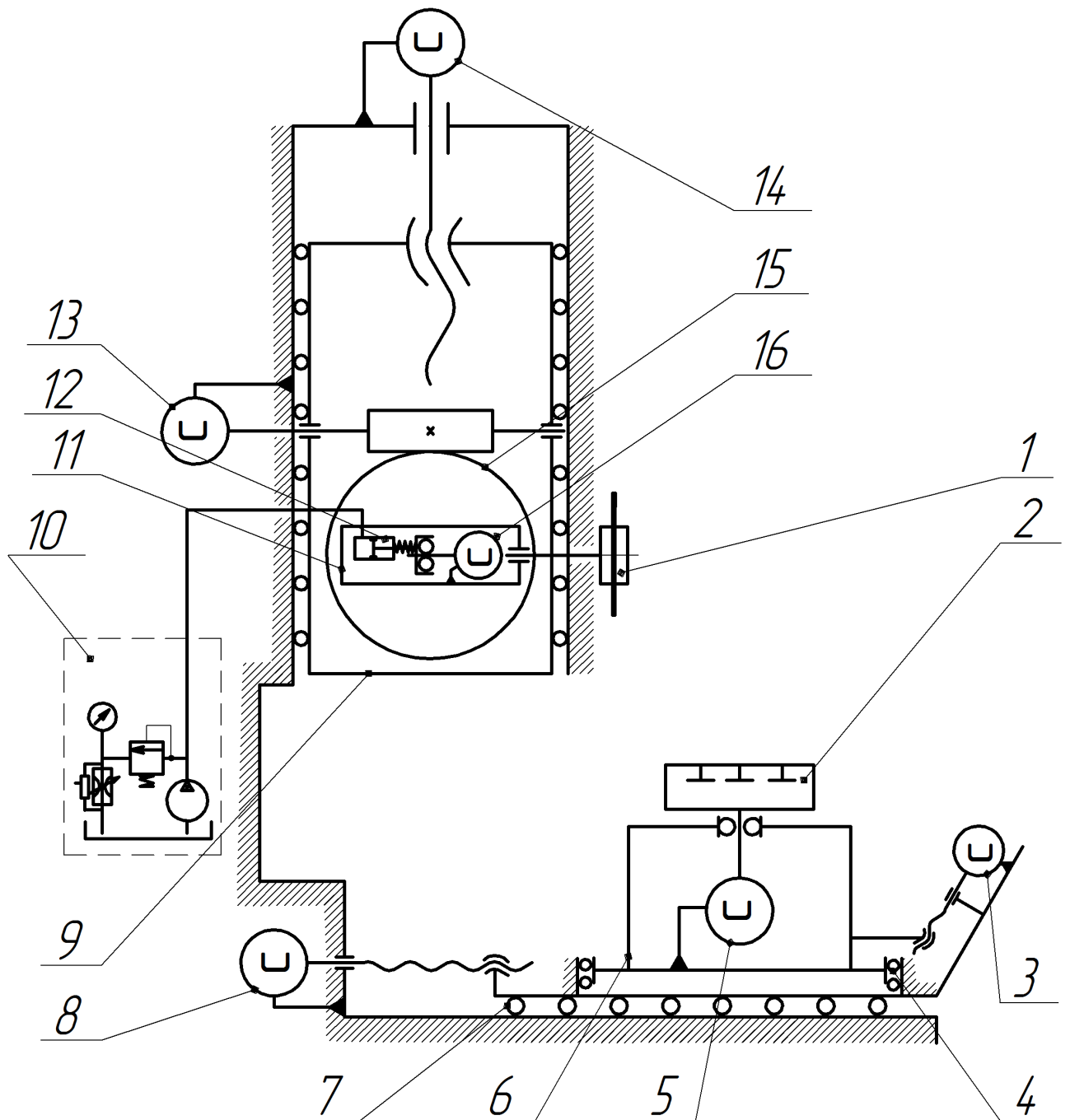


Рис. 5.2 Структурна схема зубообробного центра

- 1 – фреза; 2 – шпіндель виробу; 3 – сервопривод радіального переміщення шпінделя виробу; 4 – напрямні радіального переміщення шпінделя виробу; 5 – сервопривод шпінделя виробу; 6 – супорт шпінделя виробу; 7 – напрямні тангенціального переміщення шпінделя виробу; 8 – сервопривод тангенціального переміщення шпінделя виробу; 9 – супорт інструментального шпінделя; 10 – гідросхема живлення гідравлічного демпфера; 11 – інструментальний шпіндель; 12 – система демпфування коливань інструментального шпінделя (ГВД); 13 – сервопривод поворотної платформи інструментального супорту; 14 – сервопривод переміщення супорту інструментального шпінделя; 15 – поворотна платформа інструментального супорту; 16 – сервопривод інструментального шпінделя.

5.2.2 Синтез інструментального шпіндельного вузла

До інструментального шпінделя, що синтезується, висувається ряд вимог:

- зменшення кінематичних ланцюгів за рахунок використання прямого приводу;
- демпфування коливань з метою усунення негативного впливу вібрацій в процесі обробки;
- можливість функціонування у комплекті з інструментальним магазином.

5.2.2.1 Конструктивне виконання

Компоновка інструментального шпінделя представлена на рис. 1.18, та описана у р. 1.3.1.

5.2.2.2 Принцип дії

Інструментальний шпіндель призначений для здійснення головного руху різання при обробці шестерень в умовах диференційованої технології на базі черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Швидкозмінна інструментальна оправка з інструментом, за допомогою пристрою АЗІ (рис. 5.1 поз. 2), встановлюється у конус шпінделя, та затискається пакетом тарілчастих пружин. Прямий сервопривод забезпечує обертальний рух шпінделя з необхідною частотою. За допомогою системи ЧПУ відбувається ув'язка обертального руху інструментального шпінделя та шпінделя виробу для забезпечення умов обкату.

5.2.2.3 Поліпшення динамічних характеристик інструментального шпінделя

Загальні положення

Відома велика кількість робіт, які присвячені дослідженню динаміки при зубофрезеруванні [2, 16, 17, 30, 40, 42, 44, 45, 49, 55, 73, 89]. Причини несталості процесу та виникнення коливань більшість дослідів визначає, такі:

- зазори в кінематичних ланках верстатів;

- не лінійність пружних характеристик кінематичних ланок та вузлів верстата;
- самогальмування черв'ячних ділильних пар;
- перемінність сил різання, особливо при чистовому проході [16].

Більша частина перерахованих причин усунена у мехатронних верстатах нової концепції, які оснащені сервоприводами, та не мають зовсім кінематичних ланок та черв'ячних ділильних пар.

Але залишається найбільш суттєва причина – перемінність сил різання, яка визначає динамічну характеристику процесу по впливу її на геометричну точність та шорсткість оброблених поверхонь зубців.

Черв'ячно-контурне зубофрезерування це процес чистової обробки, який передбачає обов'язкове попереднє прорізання міжзубових впадин.

Вимоги до процесу чистової обробки передбачають максимально можливе зменшення пружних коливань системи ВПД внаслідок перемінності сил різання. Як відомо, перемінність сил різання виникає як внаслідок перемінності площин перерізів які знімаються кожним зубцем інструменту, так і внаслідок перемінності дуг контактів зубців інструмента і оброблюваної поверхні. В свою чергу, при чистовій обробці дуги контакту значно менші, що провокує збільшення амплітуди коливань.

Зменшити амплітуду коливання сил різання можливо за рахунок збільшення кількості одночасно працюючих різальних кромки, але це тільки частково може компенсувати зменшення дуг контактів.

Попередні дослідження [16, 49] рекомендують для зменшення амплітуди коливань застосовувати гальмування одного із шпінделів верстата. В роботі [16] експерименти з пригальмуванням виконувались на шпінделі інструменту. В роботі [49] експерименти з пригальмуванням виконувались на шпінделі виробу. В обох випадках, це сприяло зниженню амплітуди коливань.

Але автори робіт [16, 49] не визначають чітко теоретичну причину зменшення амплітуди коливань. Крім того, в роботах [16, 49] не наведено ряду суттєвих вимог, тобто:

- оптимізація конструктивного виконання засобів пригальмовування;
- оптимальну зону розміщення гальмівного пристрою: шпіндель інструменту, або шпіндель виробу.

Автор роботи [45] прогнозує можливість того, що при введенні в систему постійної складової моменту пригальмовування (по відношенню до амплітуди перемінної складової), можливе зниження загальної амплітуди коливань. В роботах Великовського [16] наведені експериментальні підтвердження впливу гальмівного моменту на зміну амплітуди коливань, а в роботах Левіна [45] наведені гіпотези по впливу постійної складової моменту, яка знижує висоту піків амплітуди.

Але не один із авторів не доводив теоретично можливість зменшення амплітуди коливань при введенні постійної складової моменту, наприклад, у вигляді гальмівного моменту.

Більш доцільно замість терміну «гальмування» застосовувати термін «демпфування». Тим більш, як визначено в роботі [41]: демпфер – пристрій для заспокоєння або запобігання шкідливих механічних коливань шляхом поглинання енергії. В якості засобів поглинання енергії використовують сухе тертя кочення, тертя рідини при протіканні її через спеціальні канали.

Теоретичне обґрунтування зниження амплітуди коливань на підставі використання наукового методу суперпозиції

Сутність методу суперпозиції полягає в тому, що ефективний наслідок від декількох незалежних дій уособлює в собі силу ефективних наслідків, які спровоковані кожною окремою дією.

Користуючись принципом суперпозиції, збільшимо момент, наприклад, на інструментальному шпінделі за рахунок введення постійного гальмівного моменту (демпфування). Побудуємо уявну схему осцилограм коливань, які виникнуть при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні, рис. 5.3.

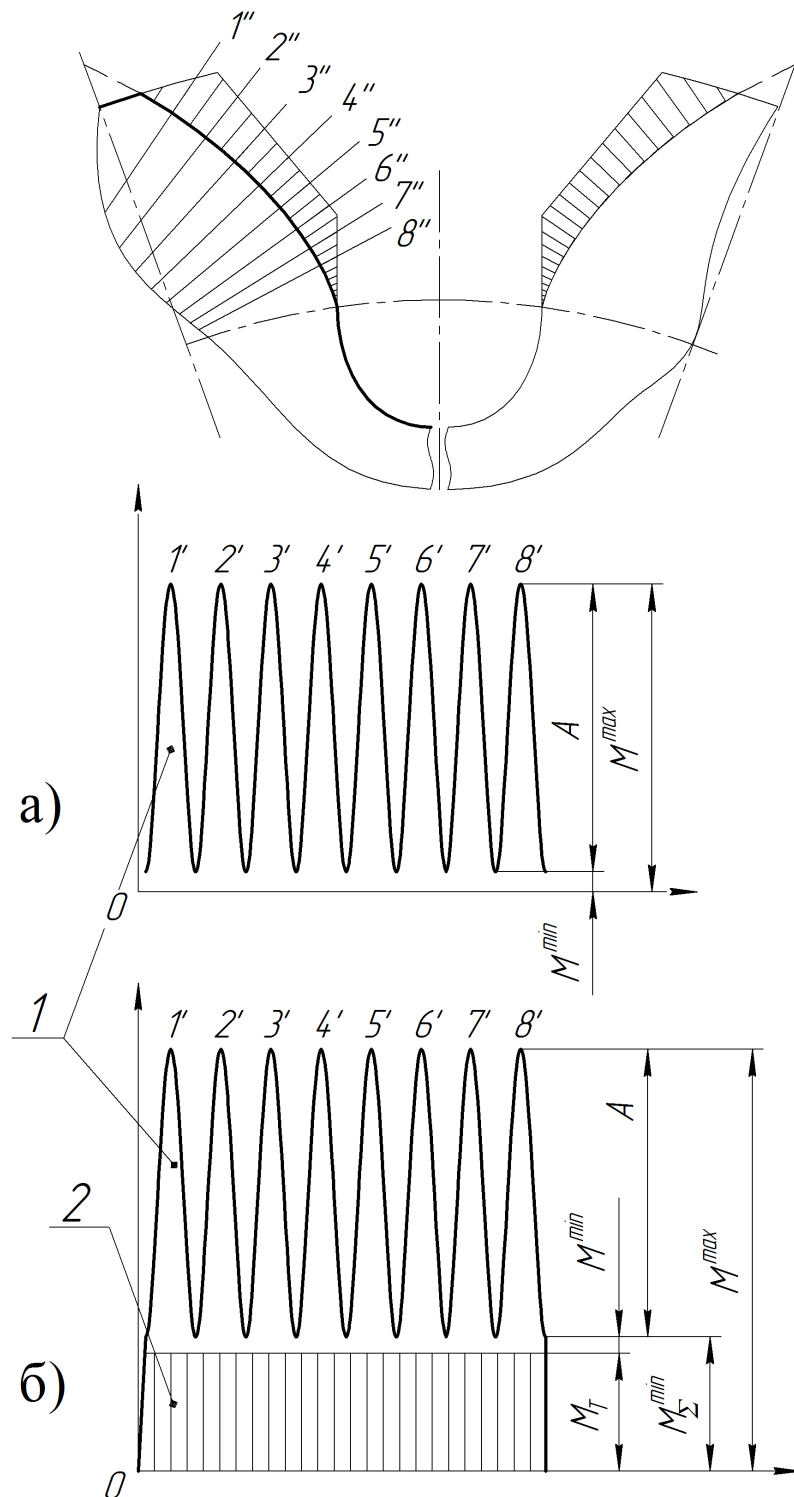


Рис. 5.3 Осцилограмна еюра демпфування коливань на інструментальному шпінделі

а) без гальмівного моменту, $M_T = 0$; б) при наявності гальмівного моменту $M_T > 0$;
 1 – лінія зміни моменту сил різання, яка змінюється за гармонічним законом; 2 – еюра дії постійного моменту за рахунок введення активного пригальмовування; 1' ... 8' – амплітудні коливання, які відповідають точкам врізання на профілі 1'' ... 8''; M^{max} – значення максимального моменту; M^{min} – значення мінімального моменту; M_T – момент пригальмовування; M_{Σ}^{min} – сумарний мінімальний момент.

Для визначення впливу гальмівного моменту на амплітуду коливань A прийmemo декілька припущень:

- момент від сили різання змінюється по синусоїдальному закону, або близькому до нього;
- амплітуда коливань залежить від значень моментів M^{max} та M^{min} ; при їх невизначеності достатньо один із них виразити через інший;
- введення гальмівного моменту, M_T збільшує максимальний момент M^{max} , але не змінює мінімальний M^{min} внаслідок утворення з останнім сумарного значення M_{Σ}^{min} .

На підставі прийнятих припущень визначаємо залежність між моментами M^{max} , M_{Σ}^{min} та M_T відповідно до схеми рис. 5.3, б:

$$\frac{M^{max}}{M_{\Sigma}^{min} - M_T} = K, \quad (5.1)$$

де K – амплітудний коефіцієнт, який визначає фактичне співвідношення діючих моментів.

Визначимо фактичне значення M^{max} на підставі формули (5.1):

$$M^{max} = (M_{\Sigma}^{min} - M_T) \cdot K. \quad (5.2)$$

Визначимо значення амплітуди коливань A :

$$A = M^{max} - M_{\Sigma}^{min} = (M_{\Sigma}^{min} - M_T) \cdot K - M_{\Sigma}^{min}. \quad (5.3)$$

Після здійснення перетворень:

$$A = M_{\Sigma}^{min}(K - 1) - K \cdot M_T. \quad (5.4)$$

Визначимо значення амплітуди коливань A при умовних одиницях: $M_{\Sigma}^{min} = 10$; $K = 4$; $M_{T1} = 1,0$. Визначаємо значення A_1 по формулі (5.4):

$$A_1 = 10(4 - 1) - 4 \cdot 1 = 30 - 4 = 26.$$

Визначаємо значення A_2 при збільшенні M_T в 4 рази, тобто $M_{T2} = 4,0$:

$$A_2 = 10(3 - 1) - 4 \cdot 4 = 30 - 16 = 14.$$

Як видно з умовних розрахунків, зі збільшенням M_T у 4 рази, A_2 зменшилась майже в 2 рази, у порівнянні з A_1 .

Таким чином, на підставі умовних розрахунків, доведена можливість зменшення амплітуди коливань при введенні гальмівного моменту. Тобто, збільшивши демпфування можливо зменшити реакцію системи ВПД на коливання моменту сил різання.

5.2.3 Синтез шпіндельного вузла виробу

Типову конструкцію відомих шпіндельних вузлів виробу показано у р. 1.3.2. Конструкція задовольняє вимоги диференційованої технології обробки зубчастих коліс на базі черв'ячно-контурного зубофрезерування, тому немає необхідності модернізувати відому конструкцію шпіндельного вузла.

У даному підрозділі розглядається шпіндельний вузол виробу, який відповідає вимогам пропонованої технології, а саме:

- зменшено довжину кінематичних ланцюгів за рахунок використання прямого приводу;
- покращено функційні показники (динамічні характеристики, точність виконавчих рухів, жорсткість) за рахунок використання підшипника з перехресними роликками.

5.2.3.1 Конструктивне виконання шпіндельного вузла

Запропоновано варіант виконання шпіндельного вузла, компоновка якого показана на рис. 5.4.

У корпусі поз. 6 шпіндельного вузла виробу обертається шпіндель поз. 2 зі столом поз. 1, ротором приводу шпінделя виробу поз. 4. Обертання відбувається у підшипнику з перехресними роликками поз. 3. Статор сервопривода головного руху поз. 5 встановлено безпосередньо в корпусі п. 6.

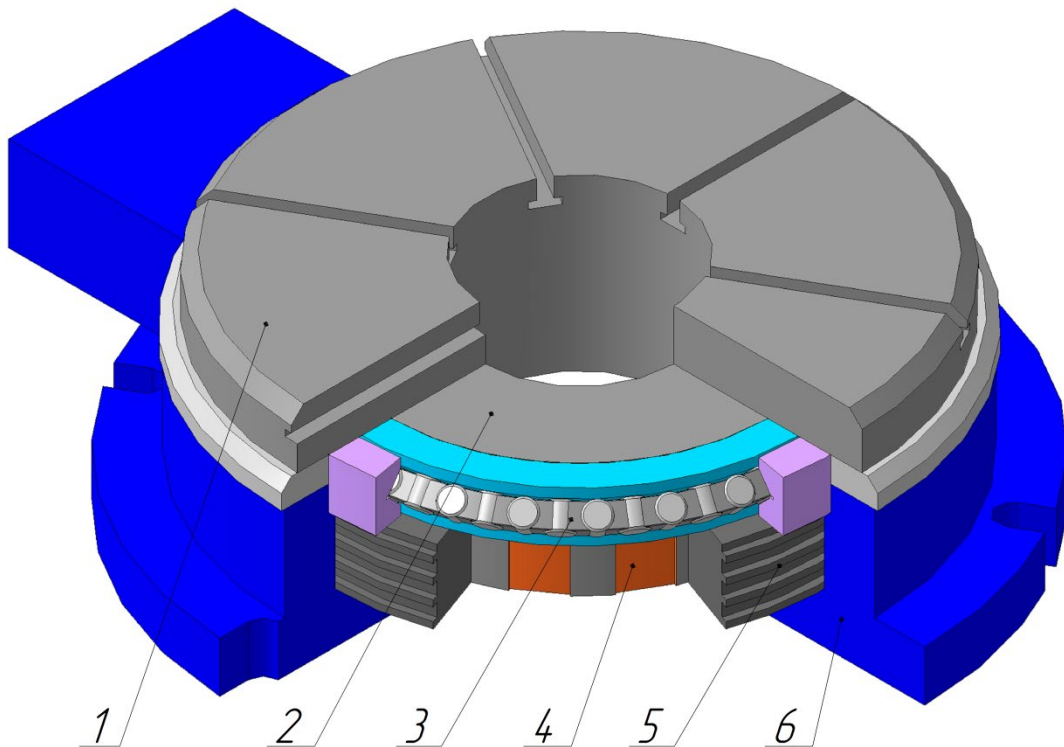


Рис. 5.4 Компоновка шпінделя виробу

1 – стіл; 2 – шпіндель; 3 – підшипник з перехресними роликками; 4 – ротор прямого приводу шпінделя виробу; 5 – статор прямого приводу шпінделя виробу; 6 – корпус.

5.2.3.2 Принцип дії

Обертання шпіндельного вузла виробу здійснюється за рахунок сервоприводу, який пов'язаний системою ЧПУ з інструментальним шпінделем.

Це дозволяє вести обробку як в умовах одиничного ділення, так і в умовах повного обкату.

Тип підшипникової опори шпіндельного вузла виробу обрано з міркувань покращення точності виконавчих рухів та підвищення жорсткості. Згідно інформації, неведеній у джерелі [129], підшипники з перехресними роликками мають дещо меншу статичну вантажопідйомність (проте однакову динамічну), але являються беззазорними, в той час як кулькові підшипники мають зазор.

5.3 Синтез методу диференційованого попереднього прорізання западин

Черв'ячно-контурне зубофрезерування це процес який відтворює лише чистові або напівчистові проходи. Тому актуально буде розбити вимоги до

форми та розмірів припусків, які утворюються попередньою обробкою. До таких вимог необхідно віднести, зокрема:

- звільнення від припуску міжзубової западини, в зоні від основного кола до кола западин;
- форма припуску повинна передбачати його плавне зниження до зони основного кола, а в деяких випадках і до верхівки зубця, з врахуванням максимального збільшення в зоні початкового (ділильного) кола;
- схема обробки повинна передбачати можливість використання як в умовах одиничного ділення, так і в умовах обкату, або в комбінованих умовах, тобто і перше, і друге;
- всі схеми попередньої обробки, які розглядаються, передбачають обробку в умовах вільного процесу стружкоутворення;
- при виборі схеми обробки перевагу слід надавати схемі, яка передбачає найменші навантаження на інструмент та елементи верстата безпосередньо при попередній обробці, так само як і при кінцевому черв'ячно-контурному зубофрезеруванні.

Суть методу полягає в тому, що зубець деталі попередньо обмежується припуском з прямолінійними твірними, які забезпечують його мінімум на вершині та в западині зубця, та максимум – в зоні початкового (ділильного) кола. Форма такого припуску може бути раціонально утворена при попередній обробці і найбільш прийнятна для умов черв'ячно-контурного зубофрезерування, а також з урахуванням використання диференційованої технології.

5.3.1 Схема утворення припуску при диференційованому попередньому прорізанні западин комплектом дискових фрез

Принцип диференційованого попереднього прорізання западин представлено на рис. 5.5. Обробка реалізується на верстатах типу обробний центр комплектом дискових фрез за дві позиції. На першій позиції (рис. 5.5, а), в умовах одиничного ділення, обробляються в чистову западини та

утворюється припуск на головці зубця під чистову обробку для всіх однойменних профілів, наприклад лівих. На другій позиції (рис. 5.5, б) – аналогічна обробка опозитних профілів другим комплектом інструменту.

Обробка методом диференційованого попереднього прорізання западин, на відміну від попередньої обробки черв'ячним зубофрезеруванням, ведеться в умовах вільного стружкоутворення (рис. 5.5, в), що є позитивним моментом з огляду на процес різання та умови експлуатації різального інструменту.

Схема розміщення припуску, отримана попереднім прорізанням западин комплектом дискових фрез, показана на рис. 5.6.

Така схема припуску являється раціональною для наступної обробки, так як при ній припуск у западині зубця, де мають місце найбільш скрутні умови стружкоутворення, відсутній. Також на рис. 5.6 показано утворене піднутрення по перехідній кривій zr_{min} , розташоване за основним колом R_o , яке дозволить виконувати чистову обробку евольвентного профілю зубців з вільним виходом різального інструменту.

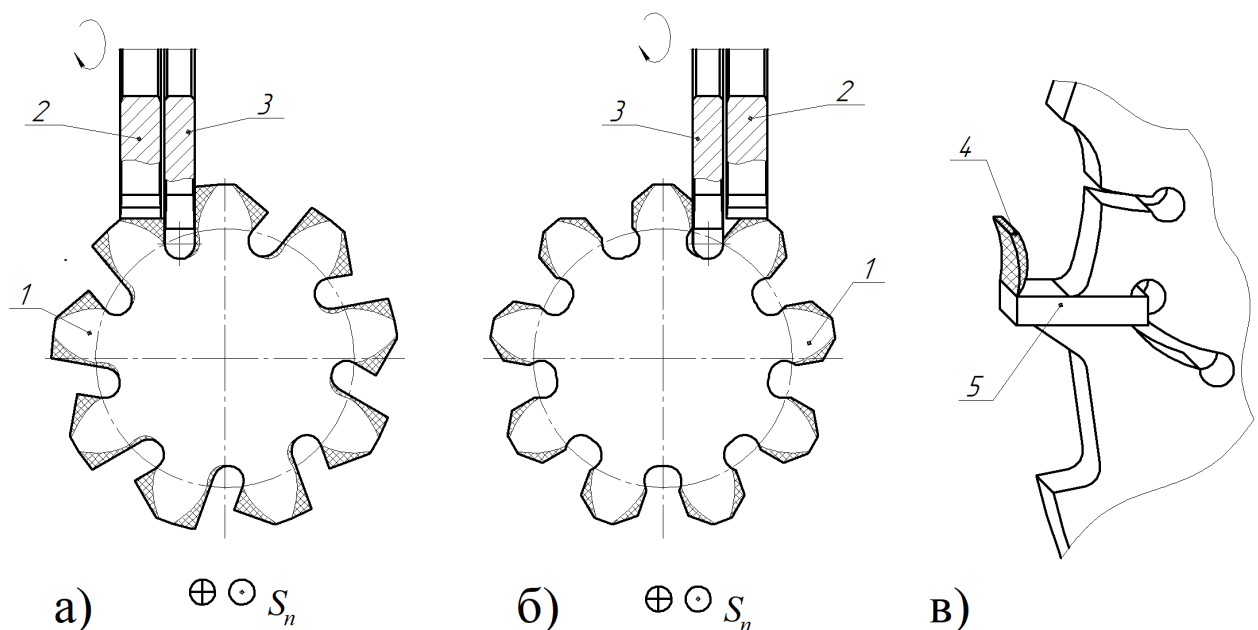


Рис. 5.5 Схема диференційованого попереднього прорізання западин комплектом дискових фрез

- а) обробка на першій позиції; б) обробка на другій позиції; в) фрагмент дискової фрези
 1 – заготовка; 2 – фреза профілююча головку зубця; 3 – фреза чистова по дну западини;
 4 – відокремлюваний елемент (стружка); 5 – змінний різальний елемент фрези;
 S_n – повздовжнє переміщення фрези.

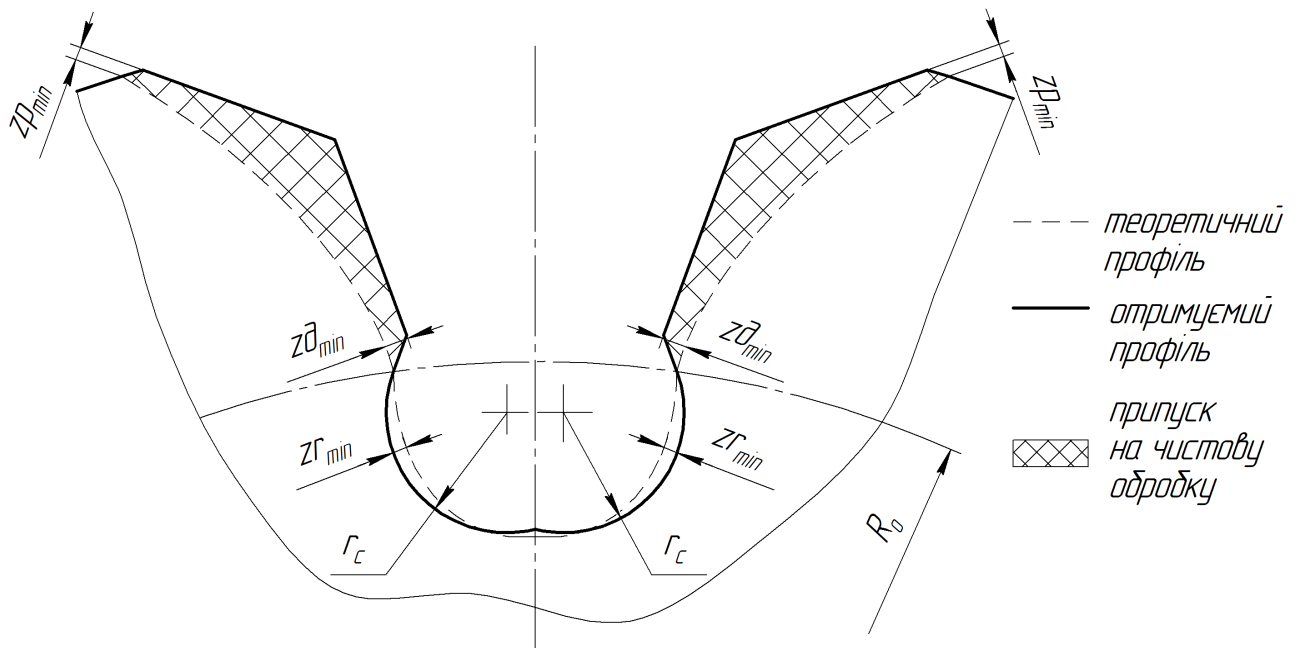


Рис. 5.6 Припуск, який залишається на чистовий прохід

r_c – радіус змінного різального елементу фрези; R_o – радіус основного кола;
 $z\bar{r}_{min}$ – мінімальне значення піднутрення по перехідній кривій; $z\bar{p}_{min}$ – мінімальне значення припуску на головці зуба; $z\bar{d}_{min}$ – мінімальне значення припуску по товщині зуба на сторону.

Методика графоаналітичного визначення налагоджувальних розмірів інструментального блоку для описаного методу приведена у додатку М.

Конструктивне виконання різального інструменту

Для виконання диференційованого попереднього прорізання западин рекомендується використовувати комплект з двох дискових фрез [115, 135]:

- фрезу профілюючу головку зубця (рис. 5.7);
- чистову по дну міжзубової западини [87] (рис. 5.8).

Конструктивне виконання фрез передбачає оснащення змінними різальними елементами з матеріалів, які працюють на високих швидкостях різання (до 200 м/хв, в залежності від оброблюваного матеріалу).

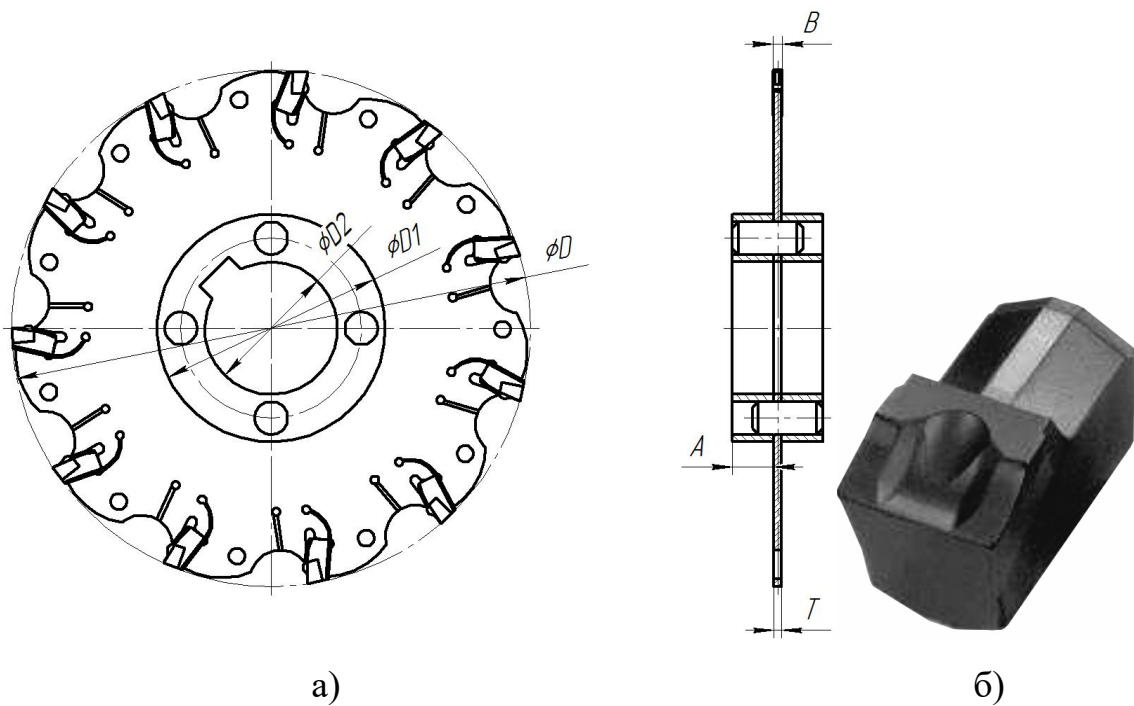


Рис. 5.7 Конструкція профілюючої фрези

а) профілююча фреза; б) змінний різальний елемент;
 D – зовнішній діаметр фрези; $D1$ – зовнішній діаметр ступиці; $D2$ – діаметр під оправку;
 B – ширина різальної кромки; A – ширина піджимної шайби; T – товщина корпусу фрези.

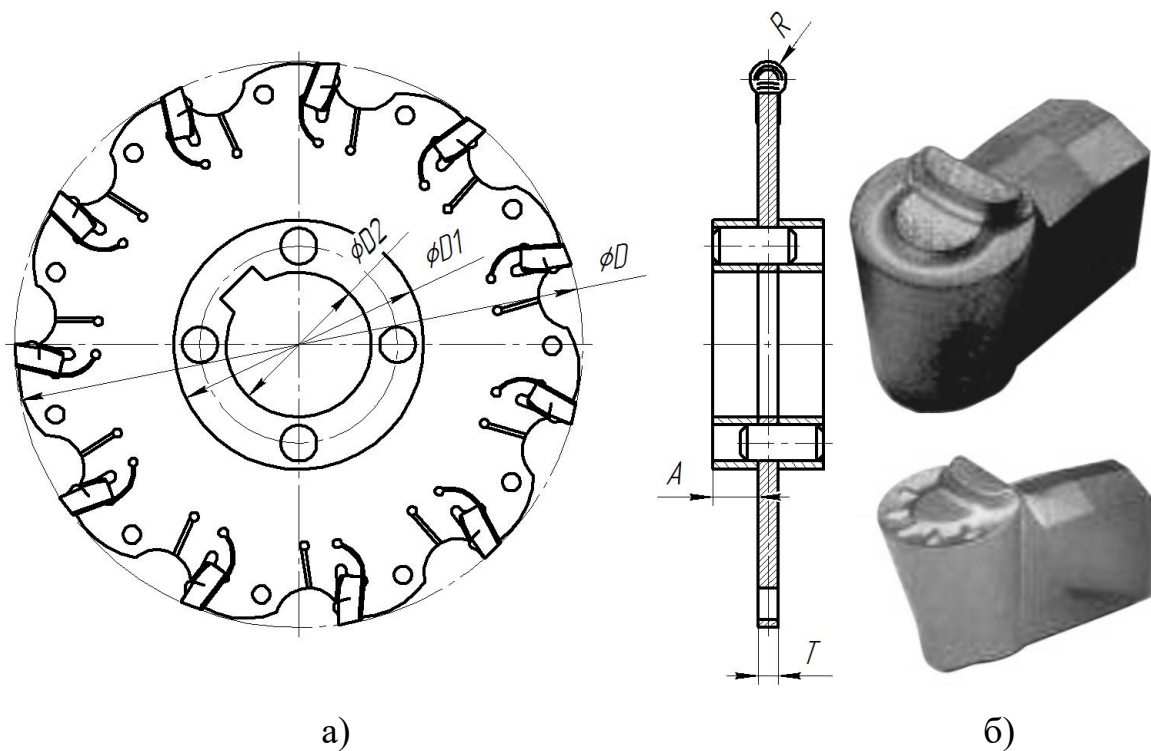


Рис. 5.8 Конструкція фрези чистової по дну міжзубової западини

а) фреза; б) змінний різальний елемент;
 D – зовнішній діаметр фрези; $D1$ – зовнішній діаметр ступиці; $D2$ – діаметр під оправку;
 R – радіус заокруглення різальної кромки; A – ширина піджимної шайби;
 T – товщина корпусу фрези.

Опис інструментального блоку

Інструментальний блок являє собою оправку для верстатів з ЧПУ по типу DIN 69872-A з конічним хвостовиком конусністю 7:24 та з встановленим комплектом інструменту. Фланець із канавками прямокутної форми передбачає використання оправки з системами автоматичної зміни інструменту в комплекті з інструментальним магазином [38].

На рис. 5.9 показано оправки зі встановленими комплектами фрез для здійснення диференційованого попереднього прорізання западин.

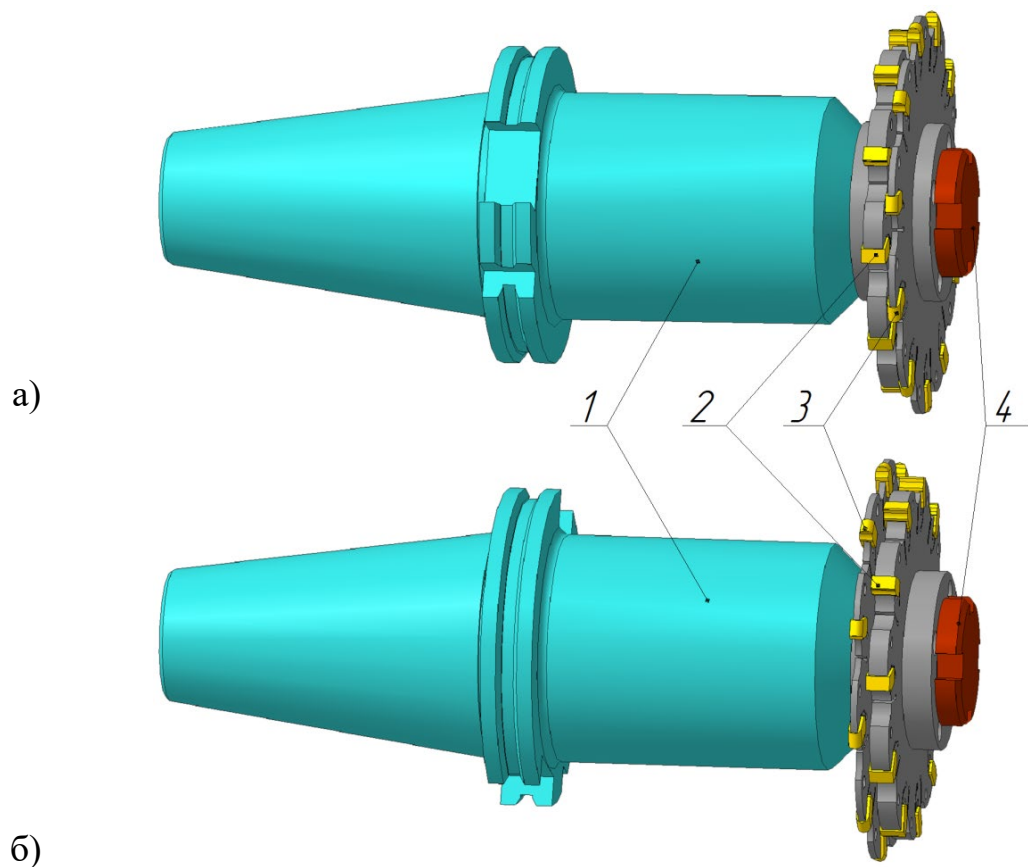


Рис. 5.9 Інструментальні блоки

- а) інструмент для обробки на першій позиції; б) інструмент для обробки на другій позиції;
 1 – інструментальна оправка з конусом; 2 – фреза профілююча головку зуба;
 3 – фреза чистова по дну міжзубової западини; 4 – гвинт по типу ГОСТ 13039-83.

5.3.2 Схема утворення припуску при диференційованому попередньому прорізанні западин комбінованим комплектом фрез

Принцип диференційованого попереднього прорізання западин комбінованим комплектом фрез відрізняється від способу, описаного у р. 5.3.1 тим, що замість використання профілюючих головок зубця фрез

використовуються черв'ячно-контурні фрези. Це дає можливість отримати еквідистантну евольвенті форму припуску, або взагалі напівчисто оброблену деталь.

Сутність способу пояснюється схемами на рис. 5.10. На першій позиції (рис. 5.10, а), комплектом з двох чистових по дну западини фрез, в умовах одиничного ділення, обробляються в чистову міжзубові западини та формується припуск на наступну позицію. На другій позиції (рис. 5.10, б) відбувається обробка черв'ячно-контурним зубофрезеруванням, послідовно правих та лівих профілів (див. р. 3.5).

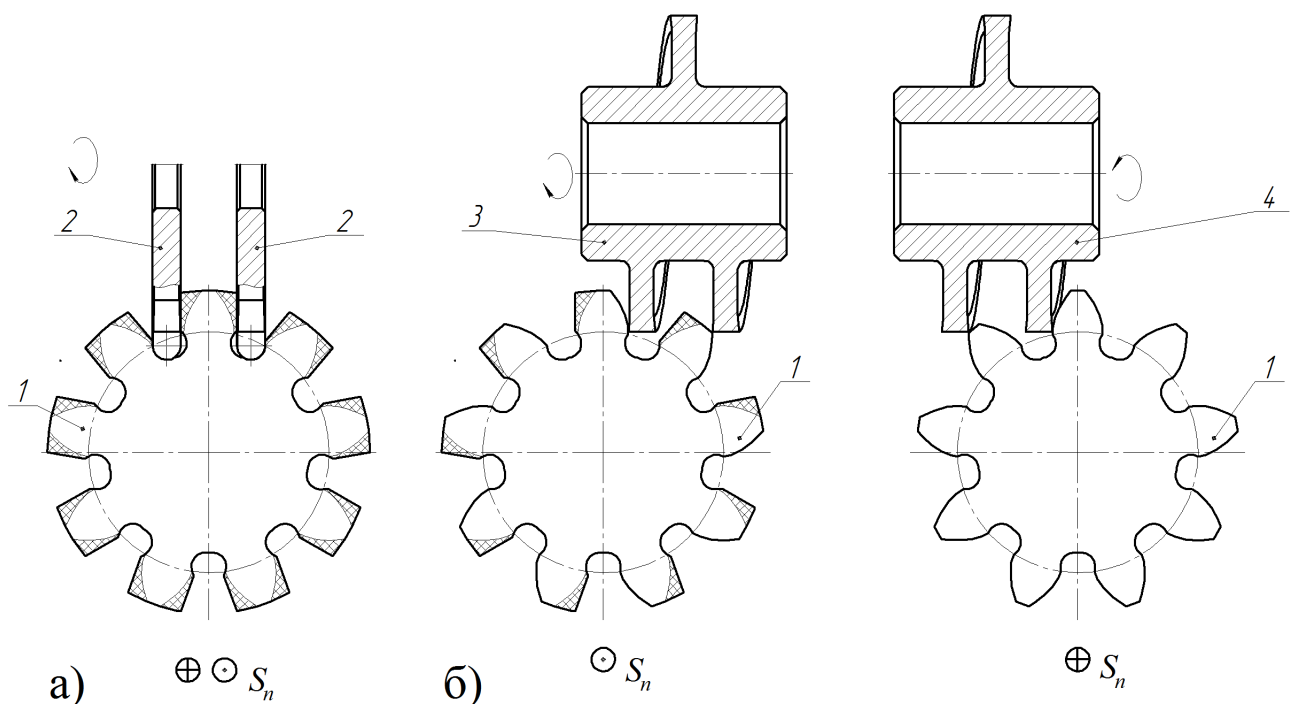


Рис. 5.10 Схема диференційованого попереднього прорізання западин комбінованим комплектом фрез

- а) обробка на першій позиції; б) обробка на другій позиції;
 1 – заготовка; 2 – фреза чистова по дну западини;
 3 – черв'ячно-контурна фреза «права»; 4 – черв'ячно-контурна фреза «ліва»;
 S_n – повздовжнє переміщення фрези.

Схема розміщення припуску, отримана попереднім прорізанням западин комбінованим комплектом фрез показана на рис. 5.11.

Така схема припуску являється раціональною для наступної обробки, так як при ній припуск у западині зубця, де мають місце найбільш скрутні умови стружкоутворення, відсутній. Також на рис. 5.11 показано утворене

піднутрення по перехідній кривій zr_{min} , розташоване за основним колом R_o , яке дозволить виконувати чистову обробку евольвентного профілю зубців з вільним виходом різального інструменту.

Методика графоаналітичного визначення налагоджувальних розмірів інструментального блоку для описаного методу приведена у додатку Н.

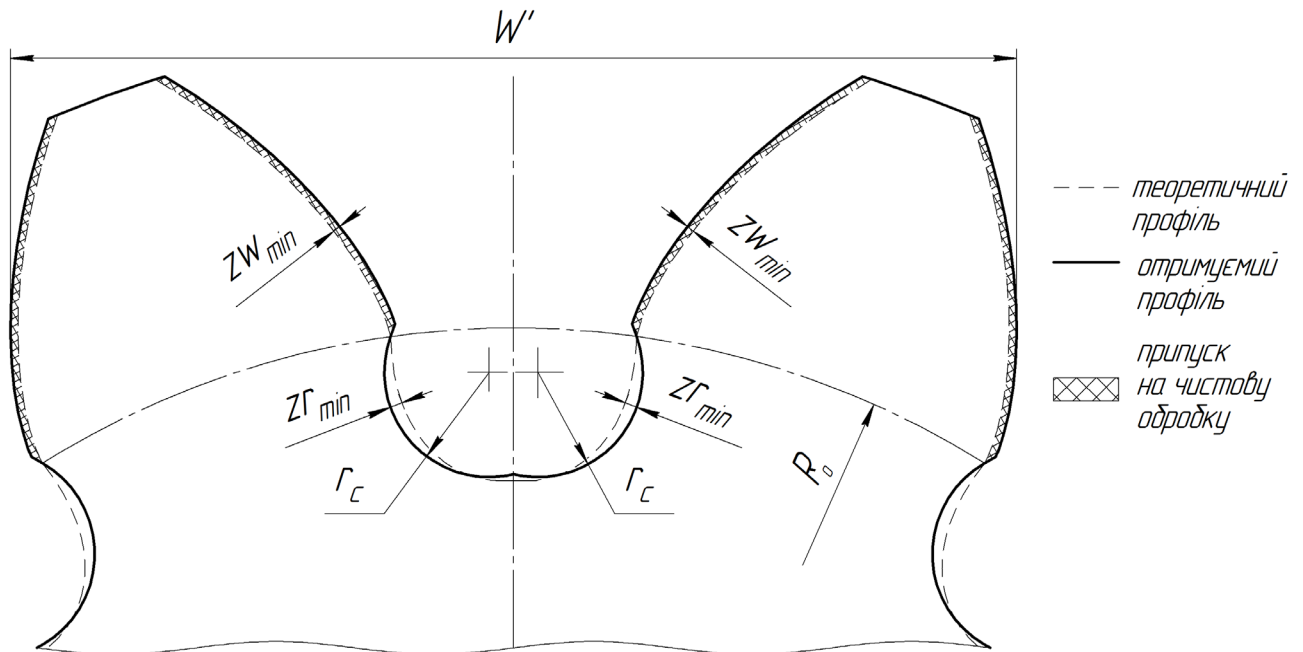


Рис. 5.11 Припуск, який залишається на чистовий прохід

r_c – радіус змінного різального елемента фрези; R_o – радіус основного кола;
 zr_{min} – мінімальне значення піднутрення по перехідній кривій; W' – загальний припуск по довжині загальної нормалі; zw_{min} – мінімальне значення припуску на сторону зубця по довжині загальної нормалі.

Конструктивне виконання різального інструменту

Для виконання попереднього прорізання западин використовується комплект з двох чистових по дну міжзубової западини фрез (рис. 5.8).

Черв'ячно-контурна фреза описана у р. 2.4.3, рис. 2.21.

Опис інструментального блоку

Інструментальний блок для диференційованого попереднього прорізання западин комбінованим комплектом фрез типовий з описаним у р. 5.3.1 інструментальним блоком.

На рис. 5.12 показано оправки зі встановленими комплектами фрез.

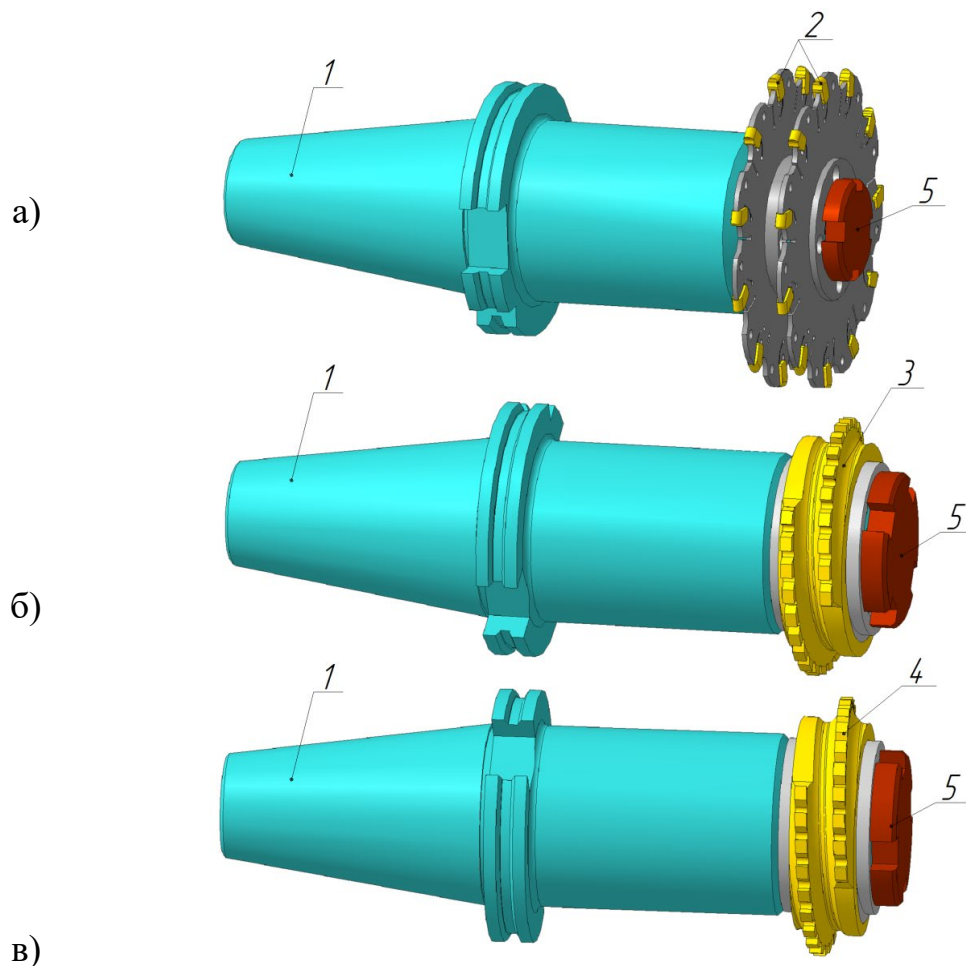


Рис. 5.12 Інструментальні блоки

- а) інструмент для утворення припуску чистовими по дну западини фрезами;
 б) інструмент для обробки правих профілів; в) інструмент для обробки лівих профілів;
 1 – інструментальна оправка з конусом; 2 – фреза чистова по дну міжзубової западини;
 3 – черв'ячно-контурна фреза «права»; 4 – черв'ячно-контурна фреза «ліва»;
 5 – гвинт по типу ГОСТ 13039-83.

5.4 Синтез конструктивної схеми черв'ячної фрези для черв'ячно-контурного зубофрезерування

5.4.1 Загальні положення

Відомі конструкції черв'ячних фрез розглянуто у р. 1.1.1. Збірні конструкції представляють собою корпус та змінні елементи, наприклад, вставні ножі (рейки), зубці, напаяні пластини.

Різальний елемент черв'ячно-контурної фрези задається у вигляді гвинтового тіла з центральним отвором. На зовнішній гвинтовій поверхні фрези утворені різальні зубці, які відокремлені один від одного стружковими канавками.

До профілю який синтезується висувається ряд вимог:

- 1) максимально можливий діапазон оброблюваних профілів від $z \rightarrow \infty$ до $z \rightarrow z_{min}$;
- 2) максимальна міцність при мінімально можливій металоємності;
- 3) експлуатаційна спроможність в межах зони сточування; достатня кількість переточувань та їх технологічна спроможність;
- 4) мінімальними величинами напружень які виникають від дії сил різання F_x та F_z ;
- 5) можливістю виготовлення сучасними методами порошкової металургії.

5.4.2 Припущення

З метою синтезу раціонального профілю різального елемента необхідно прийняти ряд припущень:

- 1) контур може бути еквідистантний зубчастому колесу з $z \rightarrow \infty$ або $z \rightarrow z_{min}$;
- 2) мінімальний зазор обирається з умов контактування контуру інструменту у крайніх положеннях з зубчастим колесом $z \rightarrow \infty$;
- 3) можливість переміщення контуру в обмеженому просторі, з метою задовільнення вимог по ресурсу переточувань.

5.4.3 Аналіз схем навантаження, виникаючих напружень та металоємності різальних елементів різних геометричних форм профілю

У табл. 5.2 наведені схеми навантаження можливих варіантів різального елемента силами різання F_x та F_z , та відповідні їм епюри напружень σ_z та σ_x .

Як видно з табл. 5.2, синтез оптимального профілю різального елемента відбувається шляхом поступової зміни конструктивних параметрів. До конструктивних параметрів профілю різального елемента, що аналізуються, відносяться:

Таблиця 5.2

№ з/п	Схема дії складової сили різання F_z та епюри виникаючих напружень σ_x	Схема дії складової сили різання F_x та епюри виникаючих напружень σ_z
1		
2		
3		
4		
5		

- кут між передніми гранями зубців фрези φ , фактично є аналогом кількості зубців фрези: $z = \frac{2\pi}{\varphi}$, шт;
- величина висоти витка H , обирається з огляду на модуль оброблюваного колеса;
- величина висоти зуба h , обирається з міркувань умов роботи інструменту;
- металоемність конструкції K_m .

Так, спрощена схема № 1 спочатку набуває оптимальної висоти витка (№ 2), а потім – збільшеної кількості різальних зубців (№ 3). Схема № 4 характеризується потовщенням витка біля основи з метою нейтралізації концентраторів напруження. За рахунок утворення гвинтової з'єднувальної поверхні профіль № 5 стає рівнозміцненим і, як наслідок, має меншу металоемність.

Визначення коефіцієнту металоемності можливих варіантів конструкції різального елемента проводиться згідно схеми рис. 5.13.

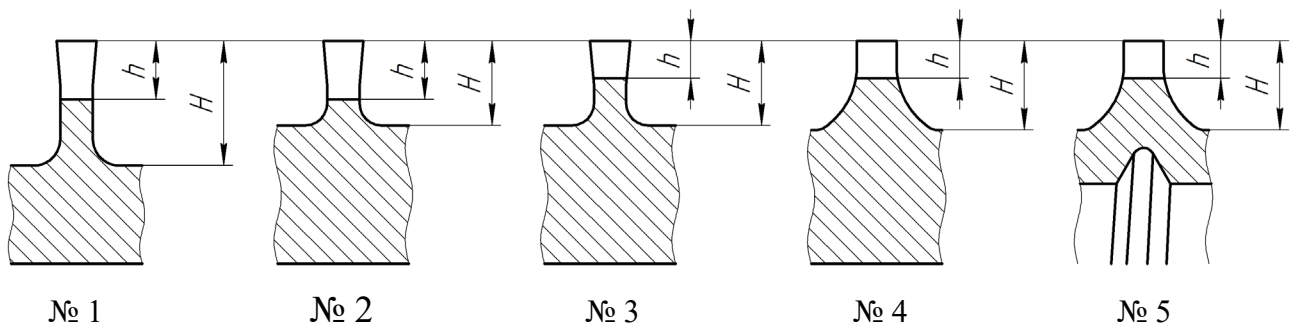


Рис. 5.13 Схеми до визначення

оптимальної металоемності конструкції, за табл. 5.2

H – висота витка; h – висота зуба.

У табл. 5.3 приведено значення відносних порівняльних параметрів оцінки різальних елементів, що розглядаються. Значення показників приведені у відносних одиницях. Як видно із табл. 5.3, найбільш оптимальною є схема № 5, яка відповідає всім визначеним вимогам, а саме одночасно найменшим значенням питомої металоемності та відношенням напружень які виникають від дії складових сили різання.

Таблиця 5.3

№ схеми за табл. 5.2	Порівнювані параметри, у відносних одиницях								
	Вхідні параметри				Вихідні параметри				
	σ_x	$\frac{\sigma_x}{-\sigma_x}$	σ_z	$\frac{\sigma_z}{-\sigma_z}$	H	h	$\frac{H}{h}$	φ	K_m
1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	~0,75
2	1,0	1,0	1,0	1,0	~0,68	1,0	~0,68	1,0	~0,92
3	~0,6	1,0	~0,6	1,0	~0,68	~0,63	~1,08	~0,66	~0,94
4	~0,6	1,0	~0,6	1,0	~0,68	~0,63	~1,08	~0,66	1,0
5	~0,6	1,0	~0,6	1,0	~0,68	~0,63	~1,08	~0,66	~0,45

5.4.4 Синтез різального елемента

Синтезований різальний елемент (рис. 5.14) виконаний у вигляді циліндричного порожнистого тіла, на зовнішній поверхні якого розміщено комплект різальних зубців, який утворює гвинтову лінію з кроком, що розраховується по формулі (3.15).

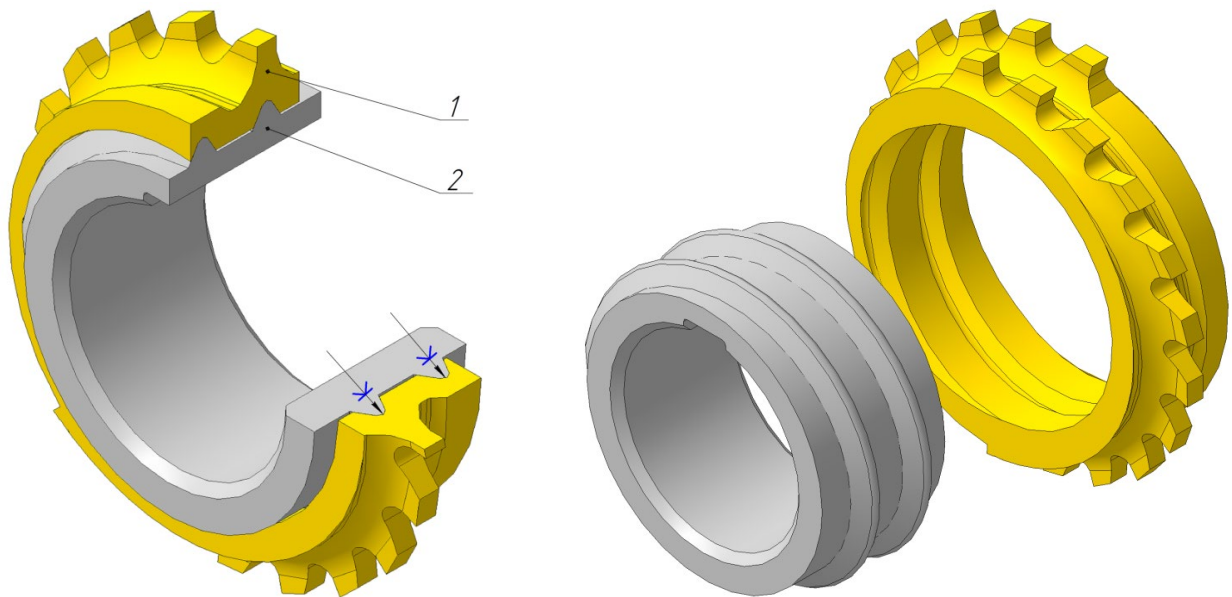


Рис. 5.14 Схема кріплення гвинтового різального елемента черв'ячно-контурної фрези

1 – гвинтовій різальний елемент; 2 – корпус інструменту.

На внутрішній циліндричній поверхні утворена гвинтова канавка, профіль поперечного перерізу якої та крок наближені до еквідистанти профілю поперечного перерізу різальних зубців. Поперечний переріз різальних зубців утворено контуром ліній які перетинаються.

На рис. 5.14 представлена схема спряження різального елемента з корпусом черв'ячно-контурної фрези. З'єднання відбувається по гвинтовій поверхні. На корпусі фрези поз. 2 виконана базова гвинтова поверхня для розміщення різального елемента на ній і закріплення, наприклад, методом склеювання. Склеювання різального елемента та корпусу фрези знизить вимоги до точності їх виготовлення, а також знизить ймовірність виникнення тріщин. На відміну від механічного кріплення, клеєве з'єднання має високу жорсткість, що позитивно відобразиться на стійкості інструменту [5].

На описану схему кріплення різального елемента отримано патент України [59], який наведено у додатку П.

5.5 Висновки по розділу

1. У розділі запропонована компоновка зубообробного центру, яка являється найдоцільнішою для реалізації диференційованої технології зубообробки в умовах гнучкого виробництва з огляду на:

- максимально можливе спрощення різального інструменту та поліпшення умов стружкоутворення;
- можливість надання верстату додаткових формоутворюючих рухів за рахунок сучасних методів модульного компонування верстатів та оснащення його серводвигунами прямого приводу;
- відсутність впливу динамічних, знакоперемінних навантажень при обробці за рахунок розділення обробки різнойменних профілів.

2. Розглянуті і описані модифіковані модулі зубообробного центру:

- фрезерний шпіндель з прямим приводом;
- шпіндель виробу з прямим приводом, оснащений підшипником з перехресними роликками.

Проведено аналіз формоутворюючих рухів кінцевих ланок синтезованого зубообробного центру.

3. Теоретично обґрунтовано зниження амплітуди коливань шляхом додаткового введення постійної складової до моменту сили різання у вигляді

постійного моменту пригальмовування. На підставі умовних розрахунків, доведена можливість зменшення амплітуди коливань при введенні гальмівного моменту.

4. Проведений синтез способів диференційованого попереднього прорізання западин, визначено вимоги та геометричну форму припуску. Розроблено методики графоаналітичного визначення налагоджувальних розмірів інструментального блоку. Розроблені рекомендації щодо різального інструменту. Перевагами обумовленого способу попередньої обробки є:

- спрощена форма інструменту;
- сприятливі умови роботи, з огляду на вільне стружкоутворення;
- можливість обробки широкої номенклатури типорозмірів циліндричних зубчастих коліс інструментом одного типорозміру.

5. Синтезовано найбільш оптимальну конструктивну схему різального елемента черв'ячно-контурної фрези з огляду на навантаження, виникаючі напруження та металоємність. Запропонована схема одночасно дозволяє оптимізувати спосіб кріплення різального елемента до корпусу. Таке рішення дає можливість економічного використання матеріалу різального елемента.

5.6 Рекомендації

1. Запропоновану компоновку зубообробного центру розглянути при розробці диференційованої технології зубообробки для умов гнучкого виробництва.

2. Провести експериментальне дослідження впливу гідравлічного гальма, встановленого на шпінделі інструменту, на зменшення амплітуди коливання сил різання.

3. Розглядати запропоновану збірну конструкцію черв'ячно-контурної фрези з гвинтовим різальним елементом при розробці технології обробки зубчастих коліс для умов гнучкого виробництва.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано вирішення актуальної науково-технічної задачі по підвищенню ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс середніх модулів шляхом зміни схеми різання, тобто взаємодії різальної кромки інструменту та оброблюваної поверхні, яке дозволить підвищити точність та якість обробки. Також створено передумови для реалізації технології зубофрезерування в умовах гнучкого виробництва.

Представлені у роботі результати досліджень дають змогу зробити такі загальні висновки:

1. Встановлено, що існує альтернатива схемі різання при формоутворенні евольвентного профілю способом традиційного черв'ячного зубофрезерування, а саме – контурна взаємодія, при якій евольвента утворюється як множина геометричних точок, які є проєкціями нормалей до теоретичного евольвентного профіля. На основі викладених методик проведено теоретичні та експериментальні дослідження та порівняльний аналіз взаємодії РК та ОП та виявлено, що зміна схеми різання дозволить зменшити похибки геометричної форми обробленої поверхні, підвищити якість та сталість процесу обробки та знизити виникаючі напруження у поверхневому шарі обробленої поверхні.

2. На основі контурної взаємодії РК інструменту та оброблюваної поверхні було синтезовано метод черв'ячно-контурного зубофрезерування.

3. Керуючись розробленою методикою дослідження процесу формоутворення в умовах тривимірного комп'ютерного моделювання визначено, що при використанні запропонованої контурної схеми взаємодії РК та ОП при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні утворюються раціональні форми та розміри відокремлюваних кожним зубцем фрези елементів матеріалу, визначено геометричні форми цих одиничних зрізів та закономірності їх розподілення під час обробки.

4. На основі результатів проведеного дослідження процесу формоутворення були отримані комп'ютерні осцилограми відносних модулів

сили різання та відносні крутні моменти різання, які відтворюють навантаження від сили різання на кожному зубці фрези. При аналізі осцилограм було встановлено, що черв'ячно-контурне зубофрезерування характеризується зниженням відносного модуля енергозатрат по інструментальному шпінделю в 2,5 рази, а по шпінделю виробу – у 4,5 рази у порівнянні з традиційним черв'ячним зубофрезеруванням, має кращі показники по рівномірності роботи та відсутність перемінності сили різання за напрямком.

5. Експериментальні дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування показали, що правий і лівий профілі обробленої деталі мають схожі по характеру спотворення профілограми, що досягнуто за рахунок адекватних умов різання по правому і лівому профілю деталі під час обробки. Ресурс по зменшенню колової подачі дозволяє досягти аналогічної, або навіть кращої величин шорсткості поверхні у порівнянні з традиційним черв'ячним зубофрезеруванням. Досяжна точність евольвентного профілю на рівні 9,5...13 мкм, що відповідає 6...7 квалітету по DIN 3962 та задовольняє вимогам напівчистої обробки.

6. Запропоновано концепцію технології зубообробки для умов гнучкого виробництва на базі методу черв'ячно-контурного зубофрезерування, методу диференційованого попереднього прорізання западин та верстата типу обробний центр.

7. Окремі результати дисертаційної роботи, а саме проект технології черв'ячно-контурного зубофрезерування, передано для впровадження у виробництво та апробовано на АТ «Гідросила», м. Кропивницький, так як технологія має перспективи у виробництві шестерень гідравлічних машин середніх та крупних модулів, особливо тих, що працюють в режимі реверсивних гідромоторів і повинні мати однакоvu геометричну форму різнойменних профілів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: Навч. Посібник для ВНЗ: у 3-х част. / [Під ред. Ю.М. Кузнецова]. – Кіровоград, 2003. – Част. I: Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання. – 422с.
2. Адам Я. И. Силы резания и мощности при зубофрезеровании / А. Я. Адам. – Москва: Машгиз, 1957. – 82 с. – (ЦНИИТМАШ). – (Сб.: Исследования в области технологии обработки металлов резанием).
3. Адам Я. И. Справочник зубореза / Я. И. Адам, Г. Г. Овумян. – Москва: Машиностроение, 1971. – 232 с.
4. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – Москва: "Металлургия", 1969. – 155 с.
5. Антонов О. А. Направления в конструировании зуборезного инструмента / О. А. Антонов. // «Вестник машиностроения». – 1990. – №8. – С. 36–38.
6. Артоболевский И. И. Теория механизмов и машин; Учеб. для вузов / И. И. Артоболевский. – Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1988. – 640 с. – (4-е изд., перераб. и доп.).
7. Архангельский Л. А. Повышение кинематической точности зубофрезерных станков / Л. А. Архангельский, Г. И. Ткачевский, Г. А. Лившиц. – Москва: Машгиз, 1954. – 202 с.
8. Байков А. Н. Нарезание колес с малым числом зубьев на зубофрезерных станках / А. Н. Байков. // «Станки и инструмент». – 1974. – №2. – С. 30–31.
9. Башкиров В. Н. Современное состояние расчета составляющих силы резания при зубофрезеровании цилиндрических колес червячными фрезами / В. Н. Башкиров. – Москва: ВНИИТЭМР, 1986. – 48 с. – (Технология, оборудование, организация и экономика машиностроительного производства). – (Сер. 6. Технология металлообрабатывающего производства; вып. 3).
10. Беляев Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976. – 608 с.

11. Беседы по автоматике / [Н. И. Голубицкий, Г. Ф. Зайцев, М. А. Иващенко та ін.]. – Киев: Техніка, 1971. – 232 с.
12. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – Санкт-Петербург: Изд-во "Профессия", 2003. – 752 с.
13. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1975. – 344 с.
14. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1986. – 544 с.
15. Бушуев В. В. Тяжелые зубообрабатывающие станки / В. В. Бушуев, С. П. Налетов. – Москва: Машиностроение, 1976. – 304 с.
16. Великовский А. Л. Влияние крутильных колебаний цепи деления зубофрезерного станка на точность нарезаемых колес / А. Л. Великовский. // «Станки и инструмент». – 1974. – №12. – С. 23–24.
17. Великовский А. Л. Измерение крутильных колебаний делительных цепей зубофрезерных станков / А. Л. Великовский. Москва: ЭНИМС, 1971. – С. 64–74. – (Сб.: Динамика металлорежущих станков. Труды ЭНИМС).
18. Влияние режимов термической обработки цементуемой стали на изменение размеров и формы зубчатых колес / Л. Н.Ващук, Н. М. Колесник, И. Л. Высоков, Г. М. Латышева. // Вестник машиностроения. – 1986. – №3. – С. 59–61.
19. Врагов Ю. Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: Основы компонентики / Ю. Д. Врагов. – Москва: Машиностроение, 1978. – 200 с.
20. Вульф А. М. Резание металлов / А. М. Вульф. – Ленинград: Машиностроение, 1973. – 496 с. – (Изд. 2-е).
21. Грановский Г. И. Основы теории резания металлов / Г. И. Грановский, В. Г. Грановский. – Москва: Высшая школа, 1985. – 304 с.
22. Грицай І. Є. Основи підвищення ефективності процесу нарізання циліндричних зубчастих коліс черв'ячними фрезами : автореф. дис. на здобуття

наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процеси механічної обробки, верстати та інструменти" / Грицай І. Є. – Київ, 2003. – 34 с.

23. Грицай І. Є. Синусоїдальні зубчасті передачі як альтернатива традиційним передачам та новий метод їх виготовлення / І. Є. Грицай, Я. М. Литвиняк // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы механического привода. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2009. – № 19. – С. 43-52.

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. – 2008. – №42. – С. 152–157.

25. Грицай І. Є. Удосконалення технології виготовлення зубчастих коліс на основі нового методу зубонарізання / І. Є. Грицай, В. І. Вільшанецький // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вып. : Проблеми механічного привода. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2011. – № 28. – С. 44-52.

26. Грицай И. Е. Управление точностью нарезания зубчатых колес червячными фрезами с учетом суммарной толщины срезов : дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Грицай Игорь Евгеньевич – Львов, 1984. – 224 с.

27. Гулида Э. Н. Измерение сил резания и крутящих моментов при зубофрезеровании / Э. Н. Гулида. – Львов: Изд-во Львовского ун-та, 1966. – 136 с.

28. Данильченко Ю. М. Кінематика формоутворення циліндричних зубчастих коліс з заданим профілем дисковим інструментом / Ю. М. Данильченко, А. В. Кривошея, С. І. Пастернак. // Вестник НТУУ "КПІ": сборник научных трудов, сер. Машиностроение. – 2005. – №46. – С. 104–108.

29. Економічне обґрунтування методу контурної обробки деталей з періодичними профілями дисковим інструментом / С. І. Пастернак, Ю. М. Данильченко, М. Г. Сторчак, А. В. Кривошея. // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы механического привода. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2009. – №19. – С. 118–126.

30. Экспериментальне дослідження контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом / С. І. Пастернак, Ю. М. Данильченко, М. Г. Сторчак, А. В. Кривошея. // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Проблемы механического привода. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2010. – №26. – С. 94–101.
31. Еланова Т. О. Прогрессивная технология зубообработки: Аналитический обзор / Т. О. Еланова. – Москва: ВНИИТЭМР, 1990. – 48 с.
32. Ермаков Ю. Н. Современные тенденции в развитии лезвийной обработки. Обзор / Ю. Н. Ермаков. – Москва: НИИмаш, 1982. – 31 с. – (Сер. С-6-3. Технология металлообрабатывающего производства).
33. Исследование влияния кинематических погрешностей при зубофрезеровании на погрешности профиля зубьев – Москва: ВИНТИ, 1968. – 38 с. – (Экспресс-информация «Режущие инструменты»; № 30).
34. Исследование влияния ошибок установки червячной фрезы на точность цилиндрических зубчатых колес – Москва: ВИНТИ, 1982. – 24 с. – (Экспресс-информация «Режущие инструменты»; № 21).
35. Кане М. М. Основы научных исследований в технологии машиностроения / М. М. Кане. – Минск: Вышэйшая школа, 1987. – 231 с.
36. Кинасошвили Р. С. Сопротивление материалов / Р. С. Кинасошвили. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 388 с.
37. Клушин М. И. Резание металлов / М. И. Клушин. – Москва: Машгиз, 1958. – 480 с.
38. Ковальцун С. С. Устройства автоматической смены инструмента на многоцелевых станках. Зарубежный опыт / С. С. Ковальцун, Ф. В. Киселёва. – Москва: ВНИИТЭМР, 1990. – 96 с.
39. Козловский И. С. Химико-термическая обработка шестерен / И. С. Козловский. – Москва: Машиностроение, 1970. – 232 с.
40. Колев К. С. Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 144 с. – (Изд. 2-е).

41. Крайнев А. Ф. Словарь-справочник по механизмам / А. Ф. Крайнев. – Москва: Машиностроение, 1987. – 560 с. – (Изд. 2-е).
42. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – Москва: Машиностроение, 1967. – 360 с.
43. Кузнецов Ю. Н. Станки с ЧПУ / Ю. Н. Кузнецов. – Киев: Выща школа, 1991. – 278 с.
44. Левин А. И. Влияние зазоров на динамическую точность делительных цепей зубофрезерных станков / А. И. Левин, А. Л. Великовский. // Труды ЭНИМС. – 1971. – С. 52–63.
45. Левин А. И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков / А. И. Левин. – Москва: Машиностроение, 1978. – 181 с.
46. Локтев Д. Современные износостойкие покрытия для червячных фрез / Д. Локтев. // «Стружка». – 2007. – №19. – С. 40–44.
47. Марочник сталей и сплавов / [А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др.]. – Москва: Машиностроение, 2003. – 784 с.
48. Медведицков С. Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами / С. Н. Медведицков. – Москва: Машиностроение, 1981. – 104 с.
49. Мисевич В. С. Экспериментальное исследование крутильных колебаний кинематических цепей зубофрезерных станков / В. С. Мисевич, В. С. Старикович. // «Станки и инструмент». – 1977. – №3. – С. 11–13.
50. Моисеенко О. И. Новые конструкции и технологии изготовления твердосплавных червячных зуборезных фрез / О. И. Моисеенко. – Киев: УкрНИИНТИ, 1968. – 48 с.
51. Моисеенко О. И. Твердосплавные зуборезные инструменты / О. И. Моисеенко, Л. Е. Павлов, С. И. Диденко. – Москва: Машиностроение, 1977. – 186 с.
52. Овумян Г. Г. Повышение производительности и качества чистового зубонарезания / Г. Г. Овумян, Е. В. Езерский, С. А. Хухрий. – Москва: Машиностроение, 1979. – 64 с.

53. Овумян Г. Г. Повышение технико-экономической эффективности чистового зубонарезания крупномодульных колёс / Г. Г. Овумян. // «Станки и инструмент». – 1980. – №11. – С. 21–23.
54. Овумян Г. Г. Стойкость инструмента при чистовом зубонарезании крупномодульных колёс / Г. Г. Овумян, Ю. А. Липатов, С. А. Хухрий. // «Станки и инструмент». – 1977. – №3. – С. 22–24.
55. Орликов М. Л. Динамика станков / М. Л. Орликов. – Киев: Вища школа, 1980. – 253 с.
56. Павлов Л. Е. Влияние скорости зубофрезерования на формирование профиля зубьев обрабатываемого колеса / Л. Е. Павлов, М. Л. Фингер. // «Станки и инструмент». – 1978. – №2. – С. 33–34.
57. Павлов Л. Е. Современные конструкции зубообрабатывающего инструмента / Л. Е. Павлов, Ю. В. Цвис. – Москва: Машиностроение, 1972. – 40 с.
58. Палей М. М. Технология производства режущего инструмента / М. М. Палей. – Москва: Машгиз, 1963. – 484 с.
59. Пат. 102901 Україна, МПК В23F 21/16, В24В 5/36. Збірна чистова черв'ячна фреза. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2015 04926; заявл. 20.05.2015; опубл. 25.11.2015. Бюл. №22.
60. Пат. 84471 Україна, МПК В23F 19/00. Спосіб лезової обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс після попереднього прорізання впадин. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2013 04277; заявл. 05.04.2013; опубл. 25.10.2013. Бюл. №20.
61. Пат. 110741 Україна, МПК В23F 21/14, В23F 21/16, В23F 5/22. Спосіб фрезерування зубців циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2014 07893; заявл. 14.07.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. №3.

62. Пат. 2310826 США, МПК В23F 21/16. Hob / William P. Adams; заявник і патентотримач William P. Adams. Заявка № 272,191; Заявл. 06.05.1939; Опубл. 09.02.1943.
63. Пат. 3374518 США, МПК В23F 21/16. Hob / Bernd Bentjens; заявник і патентотримач Fa. Wilhelm Fette Prazisionswerkzeug-Fabrik. Заявка № 487,825; Заявл. 16.09.1965; Опубл. 26.03.1968.
64. Пат. 3715789 США, МПК В23F 21/16. Hob / Stuart J. Johnson; заявник і патентотримач Barber-Colman Company. Заявка № 163,800; Заявл. 19.07.1971; Опубл. 13.02.1973.
65. Пат. 2011/0243671 США, МПК В23F 21/16. Hob / Armin Kretschmer; заявник і патентотримач Kennametal inc. Заявка № 13/133,453; Заявл. 13.10.2009; Опубл. 6.10.2011.
66. Пат. 3786719 США, МПК В23F 19/06, В26D 1/12. Hobbing cutter / Kanbei Kimura, Masato Ainoura; заявник і патентотримач Kanbei Kimura. Заявка № 250402; Заявл. 4.05.1972; Опубл. 22.01.1974.
67. Пат. 4205932 США, МПК В26D 1/12. Inserted blade cutter assembly / Michael G. Tennutti; заявник і патентотримач Illinois Tool Works Inc. Заявка № 973,519; Заявл. 26.12.1978; Опубл. 3.06.1980.
68. Пат. 2706848 США, МПК В26D 1/12. Inserted blade hob / Joseph Riley; заявник і патентотримач The Fellows Gear Shaper Company. Заявка № 285,465; Заявл. 1.05.1952; Опубл. 26.04.1955.
69. Пат. 4023246 США, МПК В26D 1/12. Inserted blade hob / Edward W. Hang, Charles E. Beck; заявник і патентотримач Barber-Colman Company. Заявка № 608,585; Заявл. 28.08.1975; Опубл. 17.05.1977.
70. Пат. 0371235 EU, МПК В23F 21/16, В23С 5/22. Inserted blade hob / Walter Zorn; заявник і патентотримач Walztechnik Saacke-Zorn & Co KG GmbH. Заявка № 89118558.9; Заявл. 06.10.1989; Опубл. 06.06.1990.
71. Пат. 2014/0010606 США, МПК В23С 5/20, В23С 5/22, В23С 5/08. Milling insert and a milling tool / Thomas Sagström, Sören Sjöberg; заявник і

патентотримач Sandvik intellectual property АВ. Заявка № 13/932,450; Заявл. 01.07.2013; Опубл. 09.01.2014.

72. Пат. 2011/0001282 США, МПК В23Q 1/40, В23Q 11/12, F16С 37/00. Rotary table device provided with cooling structure and rotary bearing provided with cooling structure / Shigeru Taniguchi, Toshiyuki Aso, Toshiya Tanaka; заявник і патентотримач ТНК со., Ltd. Заявка № 12/919,064; Заявл. 16.02.2009; Опубл. 06.01.2011.

73. Петраков Ю. В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням: Навчальний посібник / Ю. В. Петраков. – Київ: УкрНДІАТ, 2003. – 383 с.

74. Підгаєцький М.М. Динамічний та кінематичний синтез системи черв'ячно-контурного зубофрезерування / М. М. Підгаєцький, А. Р. Апаракін // Журнал "Науковий вісник НГУ". Серія: Геотехнічна і гірничча механіка, машинобудування. – Дніпро: НГУ, 2017. – №3 с. 54-62.

75. Підгаєцький М. М. Підвищення точності зубообробки шляхом розділення поверхонь, що взаємодіють з інструментом в процесі різання / М. М. Підгаєцький, А. М. Кириченко, А. Р. Апаракін // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. – Кіровоград: КНТУ, 2014. – Вип. 27. – с. 13-19.

76. Підгаєцький М. М. Порівняльний аналіз кінематики процесу при традиційному та черв'ячно-контурному чистовому зубофрезеруванні шестерень, що використовуються у сільськогосподарській техніці / М. М. Підгаєцький, А. М. Кириченко, А. Р. Апаракін // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин". – Кіровоград: КНТУ, 2014. – Вип. 44. – с. 149-153.

77. Повышение производительности зубофрезерования путем применения двухступенчатых червячных фрез – Москва: НИИмаш, 1983. – 33 с. – (Экспресс-информация «Обработка резанием (технология, оборудование, инструмент)»; вып. 6).

78. Производство зубчатых колес / [Под ред. Б. А. Тайца] – Москва: Машиностроение, 1975. – 708 с. – (Изд.2-е перераб. и доп.).
79. Производство зубчатых колёс: Справочник / [С. Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган та ін.]. – Москва: Машиностроение, 1990. – 464 с.
80. Радзевич С. П. Технология зуборезных работ. Справочник / С. П. Радзевич, В. А. Палагута, Е. D. Goodman. – Киев: ИПТТМ, 1999. – 298 с.
81. Развитие науки о резании металлов / [Председатель ред. коллегии Н. Н. Зорев] – Москва: Машиностроение, 1967. – 416 с.
82. Рашкович П. М. Обработка на зубофрезерных станках с оперативной системой ЧПУ: Учебное пособие / П. М. Рашкович. – Москва: Машиностроение, 1984. – 56 с.
83. Розенберг А. М. Элементы теории процесса резания металлов / А. М. Розенберг, А. Н. Еремин. – Москва: Машгиз, 1956. – 320 с.
84. Романов В. Ф. Расчеты зуборезных инструментов / В. Ф. Романов. – Москва: Машиностроение, 1969. – 251 с.
85. Северилов В. С. Силовые зависимости при зубофрезеровании / В. С. Северилов. // «Станки и инструмент». – 1969. – №7.
86. Северилов В. С. Экспериментальное определение силовых и стойкостных зависимостей при зубофрезеровании крупномодульных колёс из высоколегированных улучшенных сталей / В. С. Северилов, Н. Н. Тумашенко. // «Резание и инструмент». – 1978. – №19. – С. 92–96.
87. Сидоренко А. К. Червячные фрезы: Опыт НКМЗ / А. К. Сидоренко. – Москва: Машиностроение, 1980. – 83 с.
88. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 184 с.
89. Старикович В. С. Влияние крутильной жесткости цепи деления зубофрезерного станка на точность нарезаемых колес / В. С. Старикович. // «Станки и инструмент». – 1976. – №9. – С. 8–9.

90. Туркович Б. Ф. О касательных напряжениях при резании металлов / Б. Ф. Туркович. // Конструирование и технология машиностроения. – 1970. – №1. – С. 154–161.
91. Федотенок А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А. А. Федотенок. – Москва: Машиностроение, 1970. – 403 с.
92. Филатов В. П. Жесткость зуборезных станков : производственно-практическое издание / В. П. Филатов. – Москва: Машиностроение, 1969. – 118 с.
93. Фрезы червячные цельные чистовые для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Технические условия : ГОСТ 9324-2015. – [Действует с 2017.01.01]. – М. : Стандартинформ, 2016. – 44 с. – (Межгосударственный стандарт).
94. Харченко А. О. Станки с ЧПУ и оборудование гибких производственных систем / А. О. Харченко. – Киев: ИД «Профессионал», 2004. – 304 с. – (Учебное пособие для студентов вузов).
95. Шевченко А. Н. Современный зарубежный зуборезный инструмент / А. Н. Шевченко. – Москва: НИИмаш, 1976. – 56 с.
96. An innovative way of designing gear hobbing processes / F.Klocke, C. Gorgels, R. Schalaster, A. Stuckenberg. // Gear Technology. – 2012. – May. – P. 48–53.
97. Bouzakis K. D. Process models for the incorporation of gear hobbing into an information centre for machining data / K. D. Bouzakis, W. Konig. // CIRP Annals. – 1981. – №30. – S. 77–82.
98. Bouzakis K. D. Prozessmodelle zur Einbeziehung des Walzfrasens in Schnittwerte-Informationszentrum / Bouzakis. // Industrie-Anzeiger. – 1980. – №91. – S. 27–33.
99. Brecher J. Developments for High Performance Machine Tool Spindles / J. Brecher, G. Spachholz, F. Paepenmüller. // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2006. – Vol. 56. – №1 – P. 395–399.

100. Brecher C. Evaluation of an internally spring preloaded four contact-points bearing for spindle units / C. Brecher, J. Rossaint, J. Falker. // *Production Engineering - Research and Development*. – 2013. – Vol. 7. – №2-3. – P. 195–201.
101. Claudin C. Effects of the edge quality on the tool life: application on gear hobbing / C. Claudin, J. Rech. // *Proceedings of the 2nd International Conference «Innovative Cutting Processes & Smart Machining»*. – Intercut. – 2008. – p. 18.
102. Cutting performance increasing in gear hobbing by means of HSS hobs, coated with effective PVD films [Электронный ресурс] / K. D. Bouzakis, S. Kombogiannis, O. Friderikos, J. Anastopoulos. – 2003. – Режим доступа до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/237672470_Cutting_performance_increasing_in_gear_hobbing_by_means_of_HSS_hobs_coated_with_effective_PVD_films.
103. Deb S. Forces in gear cutting / S. Deb, A. Bhattacharyya. // *Journal of the Institution of Engineers (India): Mechanical Engineering Division*. – 1971. – №51. – P. 102–107.
104. Dimitriou V. Advanced Computer Aided Design Simulation of Gear Hobbing by Means of Three-Dimensional Kinematics Modeling / V. Dimitriou, N. Vidakis, A. Antoniadis. // *Journal of manufacturing science and engineering*. – 2007. – Vol. 129. – p. 911–918.
105. ETEL [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.etel.ch/torque-motors/direct-drive/>.
106. FIBRO - ROTOCUTTING [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.fibro.de/en/rotary-tables/product-groups/rotocutting>.
107. Gear hobbing cutting process simulation and tool wear prediction models / K. D. Bouzakis, S. Kombogiannis, A. Antoniadis, N. Vidakis. // *Journal of manufacturing science and engineering*. – 2002. – Vol. 124. – P. 42–51.
108. Gear hobs — Accuracy requirements : ISO 4468:2009. – [Valid from 2009.06.01]. – Geneve : International Organization for Standardization, 2009. – 32 P. – (International Standard).

109. Gleason - Зубообработка [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.gleason.com/ru/products/machines/cylindrical/hobbing-up-to-800-mm/genesis-400hcd-the-productivity-master-with-optional-flexible-chamfering>.
110. Gleason – Инструмент [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.gleason.com/ru/products/tools/cylindrical/hobbing-and-milling/hobbing-and-milling-tools>.
111. GMN - Tool spindles for automatic tool change [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.gmn.de/wp-content/uploads/2505_1219_e1.pdf.
112. HAAS - Поворотные столы [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.haascnc.com/ru/machines/rotaries-indexers/rotary-tables/models.html>.
113. HAAS - Шпиндели [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.haascnc.com/ru/productivity/spindles.html>.
114. IBAG - High Frequency Motor Spindles [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ibag.ch/en/spindle-design.html>.
115. Kennametal - Very Narrow Slotting Cutters KVNS [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.kennametal.com/us/en/products/p.kvns-very-narrow-slotting-cutters-197.1247785.html>.
116. Klingelnberg-Hofler - Cylindrical Gear Cutting Machines [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.klingelnberg.com/en/business-divisions/hoefer/cylindrical-gear-cutting-machines>.
117. Komori M. Simulation of hobbing for analysis of cutting edge failure due to chip crush / M. Komori, M. Sumi, A. Kubo. // Gear Technology. – 2004. – September/October. – p. 64–69.
118. Konig W. Walzfrasen mit Hartmetall Werkzeugen / W. Konig, G. Venohr, K. Peifer. // Industrie-Anzeiger. – 1987. – №90. – S. 32–39.
119. LCM - Accessories for machine tools [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.lcmitalia.it/_dynaPage/index.asp?pageID=96&menu=2.

120. LIEBHERR - Gear hobbing machines LC 60-130 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.liebherr.com/en/usa/products/gear-technology-and-automation-systems/information-service/downloads-video/downloads-video.html>.
121. LMT Fette Gear Cutting [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.lmt-tools.com/en/products/gear-cutting>.
122. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods / K. D. Bouzakis, E. Lili, N. Michailidis, O. Friderikos. // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2008. – №57. – P. 676–696.
123. On the wear of PVD-coated HSS hobs in dry gear cutting / [J. Gerth, M. Larsson, U. Wiklund та ін.]. // Wear. – 2009. – Vol. 266. – Issues 3-4. – P. 444–452.
124. Pasternak S. Untersuchung und Optimierung der spannenden Fertigung von Verzahnungen mit profilunabhängigen Scheibenwerkzeugen : Dissertation / Pasternak Sergii – Universität Stuttgart, 2016. – 146 s.
125. Reeber R. Der Energiebedarf bei trennenden Fertigungsverfahren / R. Reeber. // Werkstatt und betrieb. – 1980. – №113. – S. 109–113.
126. Reference Profiles of Gear-cutting Tools for Involute Tooth Systems according to DIN 867 : DIN 3972-1952. – [Valid from 1952.02.01]. – Berlin : Deutsches Institut Fur Normung E.V., 1952. – 2 S. – (German National Standard).
127. SAAZOR Hobs [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://saazor.de/index.php/en>.
128. Sandvik coromant - CoroMill 176 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/coromill_176/Pages/default.aspx.
129. Schaeffler Industrial Drives - direct-drive rotary tables [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.schaeffler-industrial-drives.com/content.sid/en/news_media/media_library/index.jsp?tab=mediathek-pub&uid=79505411&subfilter=app:dc;language-vid:167;language-pub:167;mediatyp-pub:all;referencetyp-pub:0.

130. Schmidhammer A. Die Verschleißerscheinungen an Wälzfräsern und ihre Ursachen / Schmidhammer. // Technische Nachrichten Fette. – 1980. – №270. – S. 211.
131. Solid (monobloc) gear hobs with tenon drive or axial keyway, 0,5 to 40 module - nominal dimensions : ISO 2490:2007. – [Valid from 2007.10.01]. – Geneve : International Organization for Standardization, 2007. – 10 P. – (International Standard).
132. SPINDER – Direct drive spindle [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.spinder.com.tw/en/product/direct-drive-spindle.html>.
133. Star SU - Gear Cutting Tools [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.star-su.com/wp-content/uploads/hobs_milling_cutters_ed0.pdf.
134. Sulzer G. Bestimmung der Spanungsquerschnitte beim Wälzfräsen / G. Sulzer. // Industrie-Anzeiger. – 1974. – №92. – S. 246–247.
135. TAEGU TEC - TSC-SLOTTING [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.imc-companies.com/taegutec/ttkCatalog/Family.aspx?fnum=1184&map=ML&app=85&GFSTYP=M>.
136. Tapoglou N. Hob3D: A Novel Gear Hobbing Simulation Software [Электронный ресурс] / N. Tapoglou, A. Antoniadis. – 2011. – Режим доступа до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/275027716_Hob3D_A_novel_gear_hobbing_simulation_software.
137. Taraman K. A surface roughness model for a turning operation / K. Taraman, B. Lambert. // International Journal of Production Research. – 1974. – №6. – P. 691–703.
138. Tolerances for Single-start Hobs for Involute Spur Gears : DIN 3968-1960. – [Valid from 1960.01.09]. – Berlin : Deutsches Institut Fur Normung E.V., 1960. – 5 S. – (German National Standard).
139. UCAM – Rotary tables [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.ucamind.com/product-category/solutions-for-machine-builders>.
140. Yama Seiki - High Performance Spindle System [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: http://www.yamaseiki.com/yama_en/milling/vertical/af/spindle.htm.

ДОДАТОК А

Методика налагодження черв'ячної -контурної фрези по попередньо обробленій впадині

Налагодження виконується по готовій деталі (еталону), згідно рис. А.1.

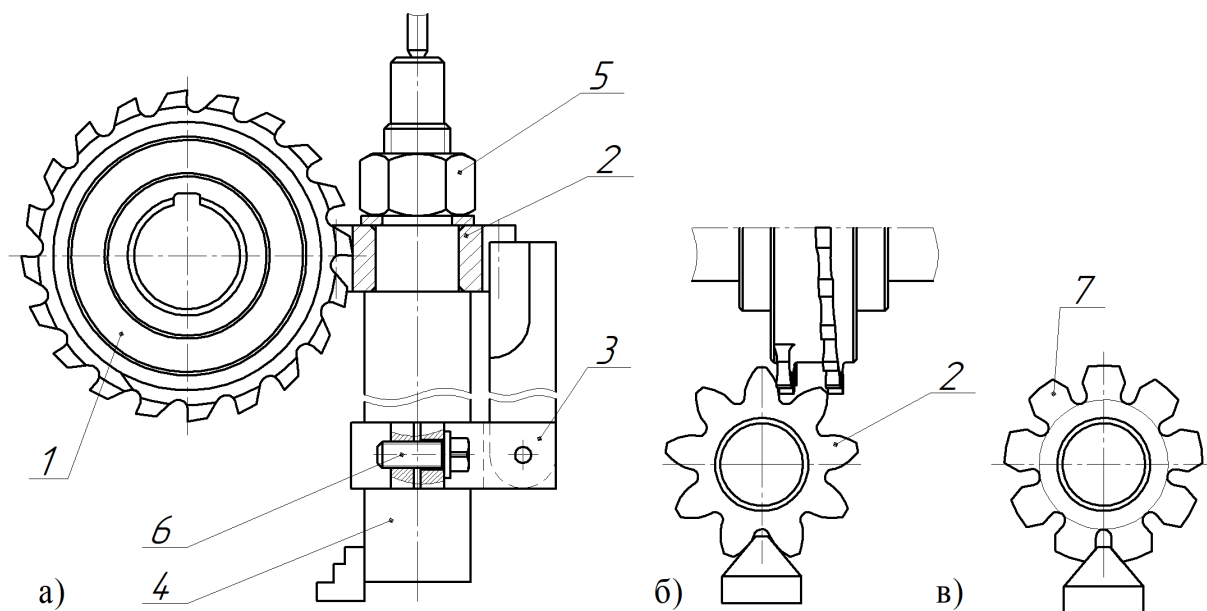


Рис. А.1 Схема налагодження черв'ячно-контурної фрези

а) вид збоку; б) вид зверху; в) орієнтування заготовки

1 – черв'ячно-контурна фреза; 2 – еталон; 3 – фіксатор; 4 – оправка; 5 – гайка затискна;
6 – затискний гвинт; 7 – заготовка.

Порядок налагодження наступний:

- установка черв'ячно-контурної фрези поз.1 на інструментальну оправку;
- на оправку поз.4 встановлюється еталон поз.2, без затискання гайкою поз.5;
- фреза поз.1 вводиться в зачеплення з еталоном поз.2, як показано на рис. А.1, б;
- фіксатор поз.3 орієнтується по впадині еталона поз.2, як показано на рис. А.1, та затискається гвинтом поз.6 до оправки поз.4;
- зняття еталону поз.2;
- встановлення заготовки поз.7 з орієнтуванням її по фіксатору поз.3, як показано на рис. А.1, в;
- затиснення заготовки поз.7 гайкою поз.5;
- виведення фіксатора поз.3 з впадини заготовки поз.7 перед обробкою.

ДОДАТОК Б

Результати дослідження процесу формоутворення традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування

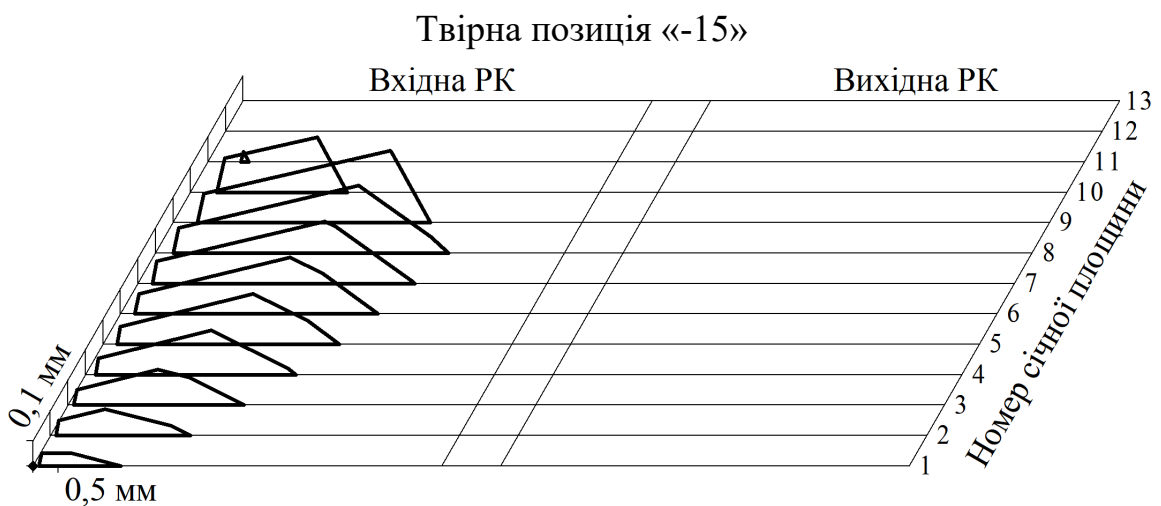
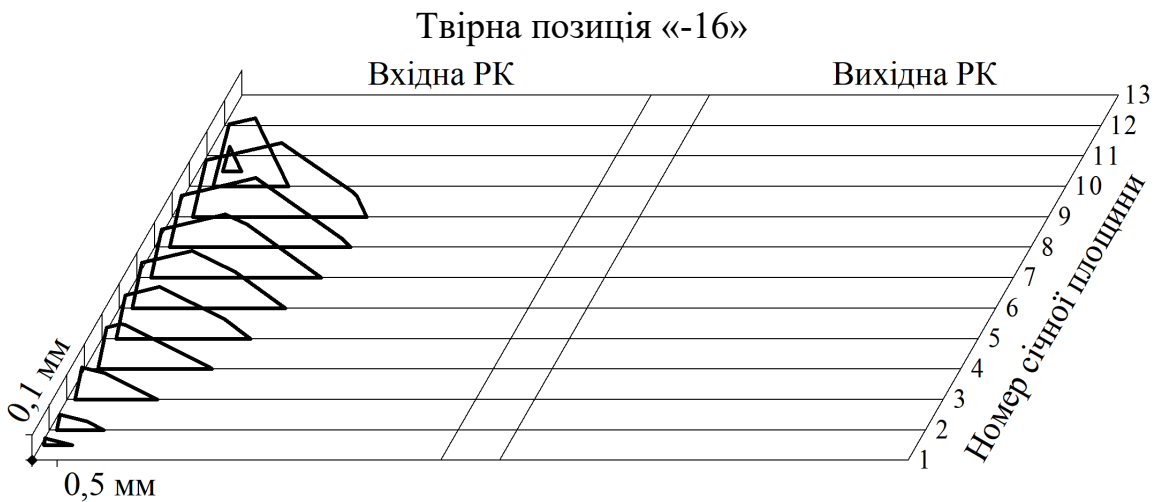
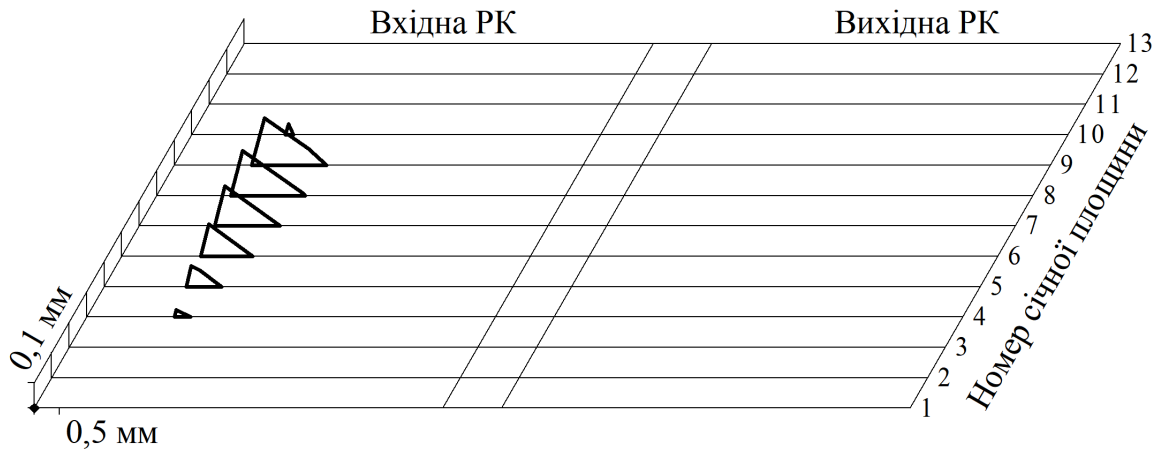
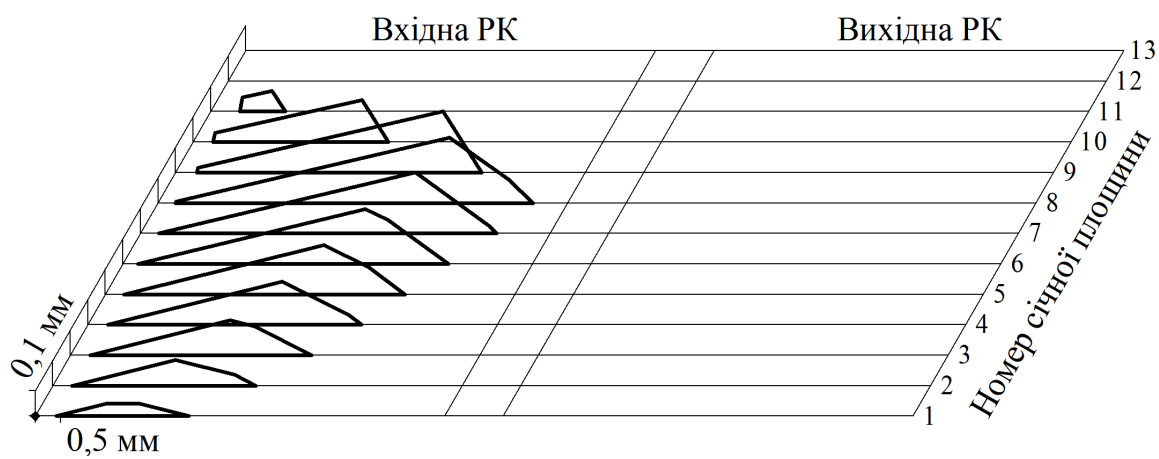
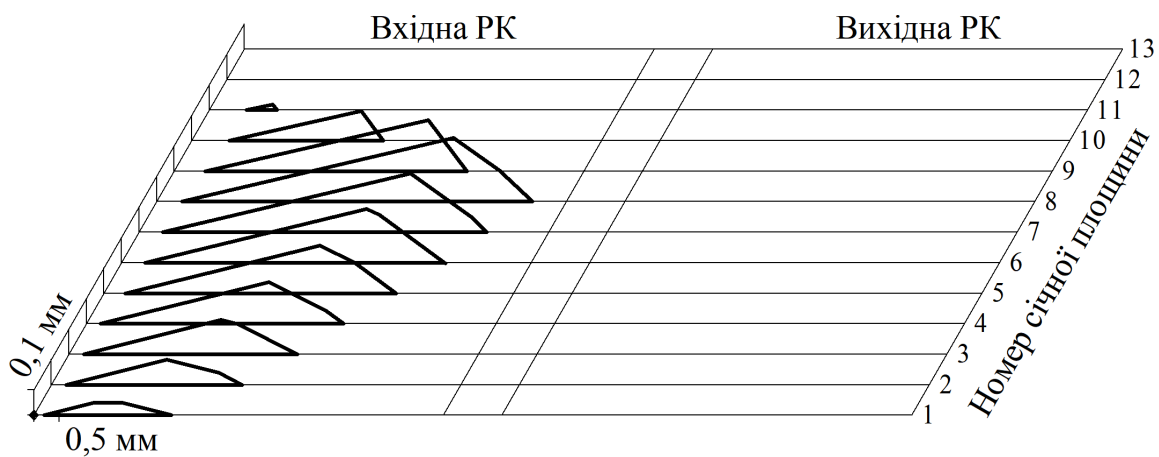


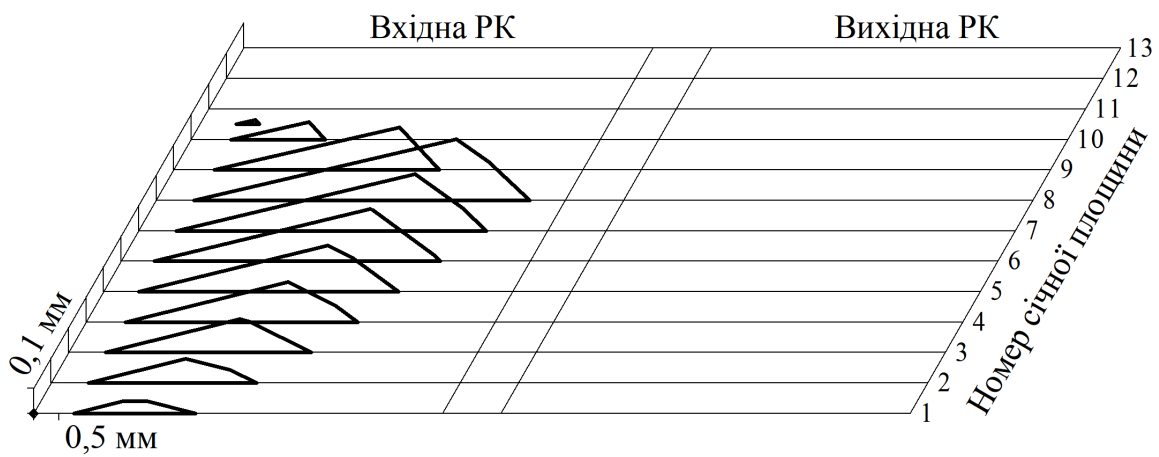
Рис. Б.1 Масштабна схема розміщення окремих площин перерізів по траєкторії руху зубця черв'ячної фрези



Твірна позиція «-13»

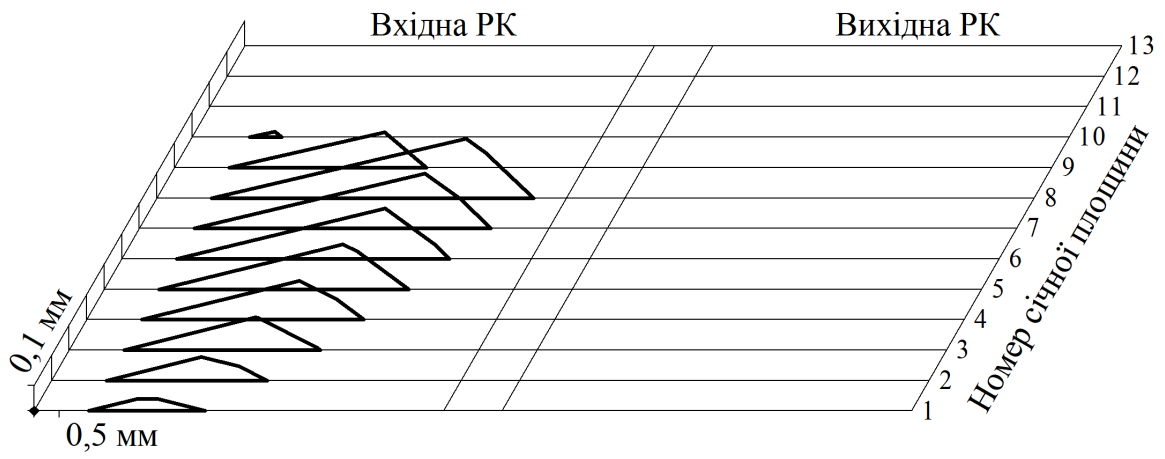


Твірна позиція «-12»

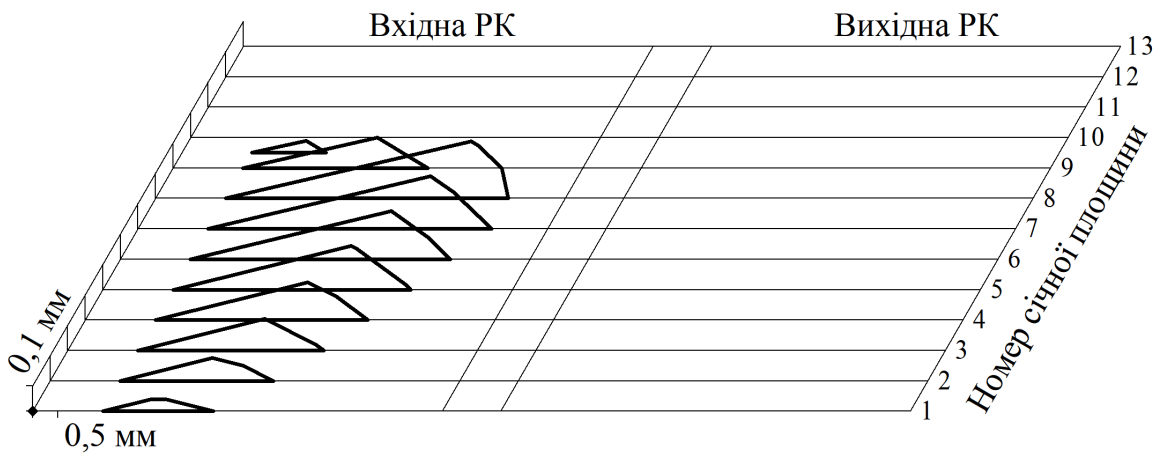


Твірна позиція «-11»

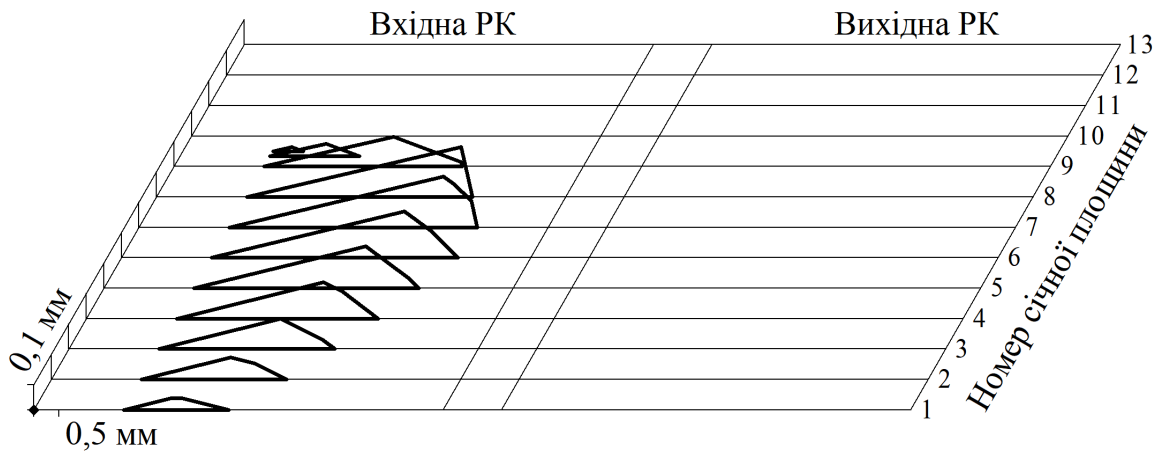
Рис. Б.1, аркуш 2



Твірна позиція «-10»

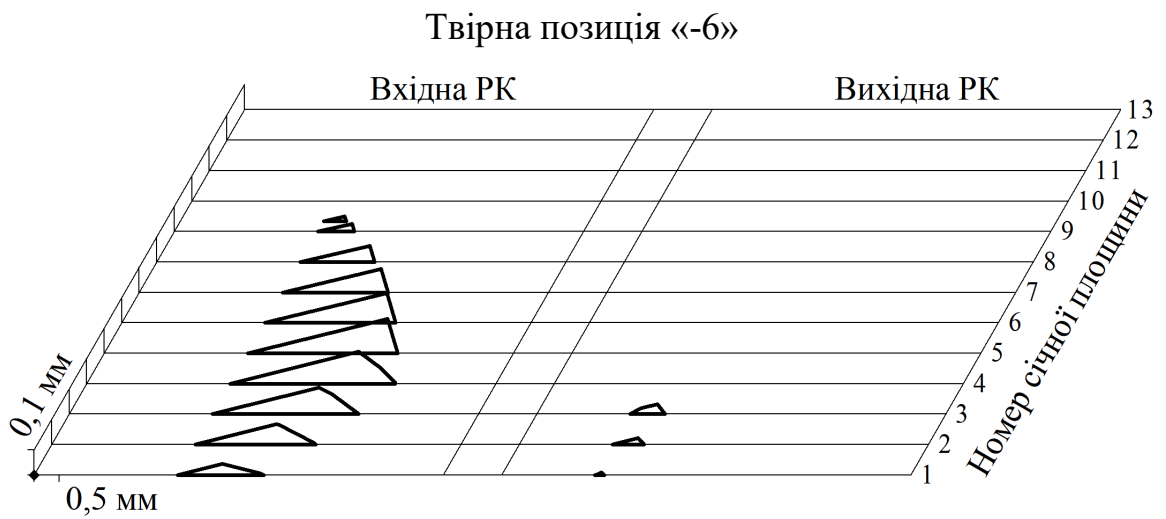
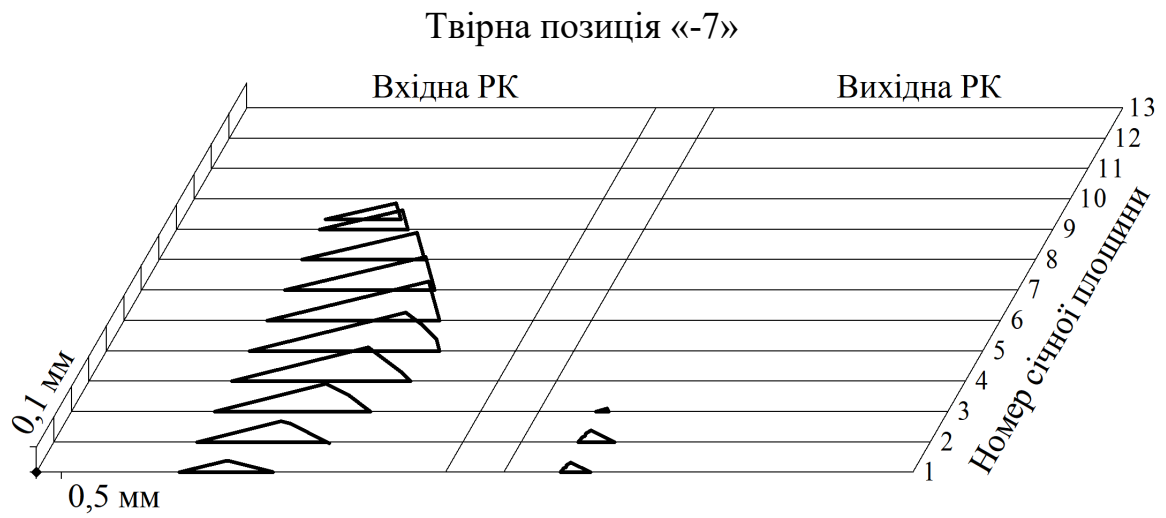
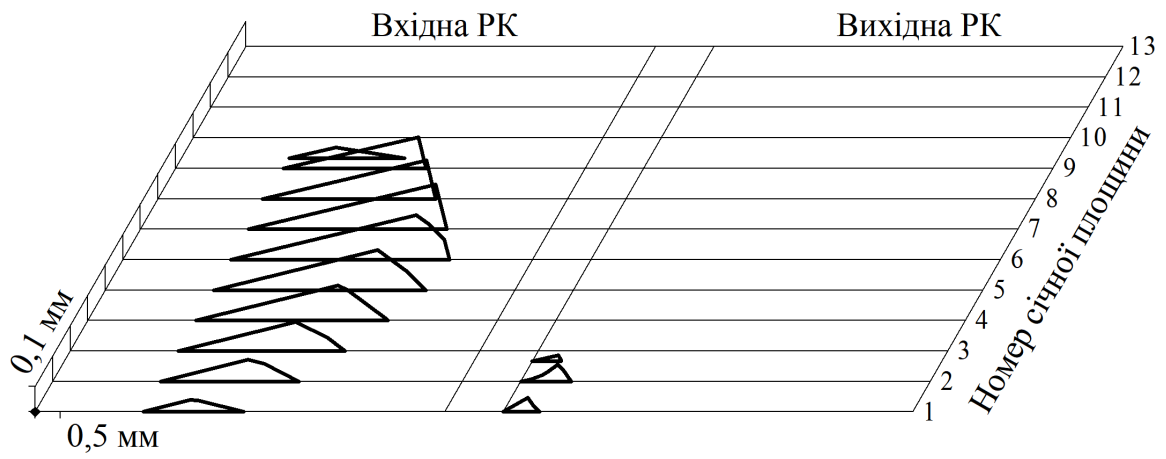


Твірна позиція «-9»



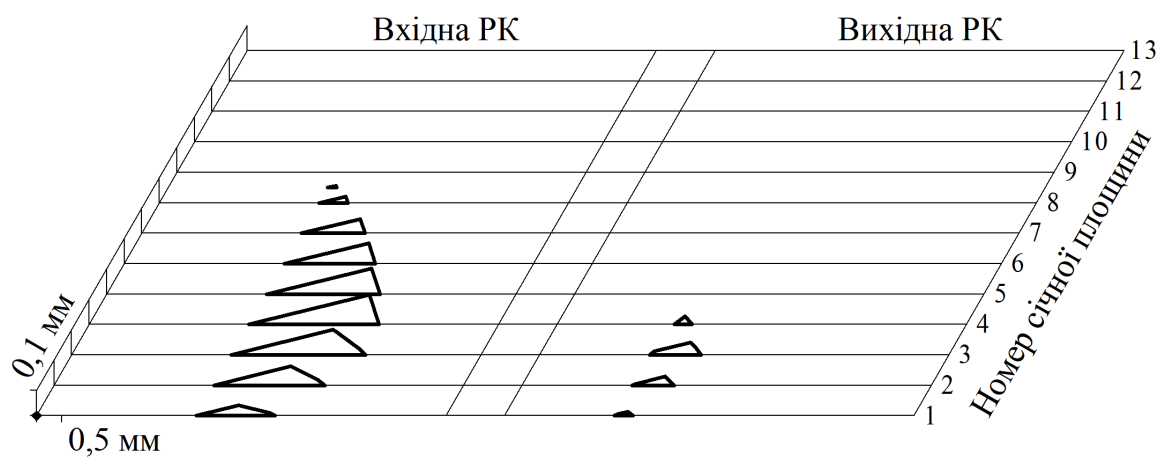
Твірна позиція «-8»

Рис. Б.1, аркуш 3

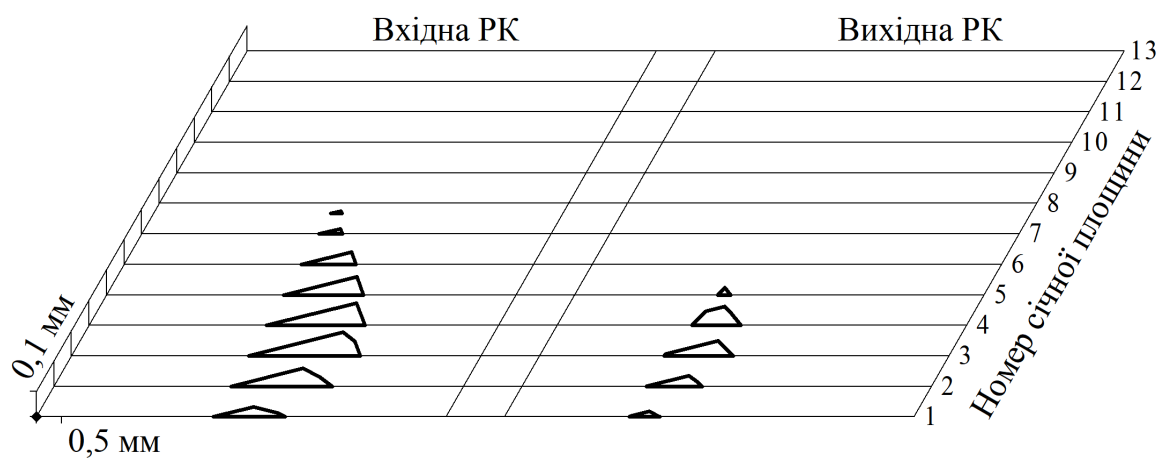


Твірна позиція «-5»

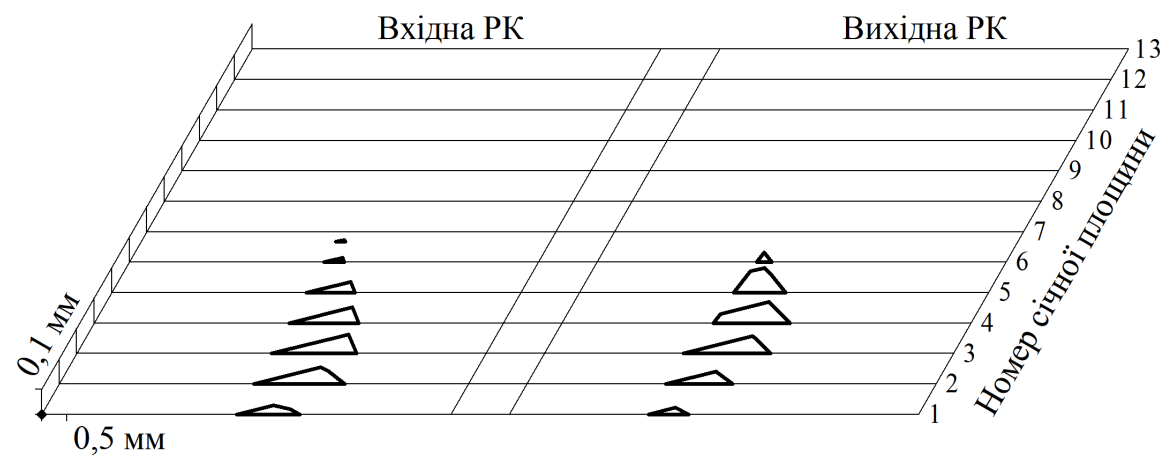
Рис. Б.1, аркуш 4



Твірна позиція «-4»

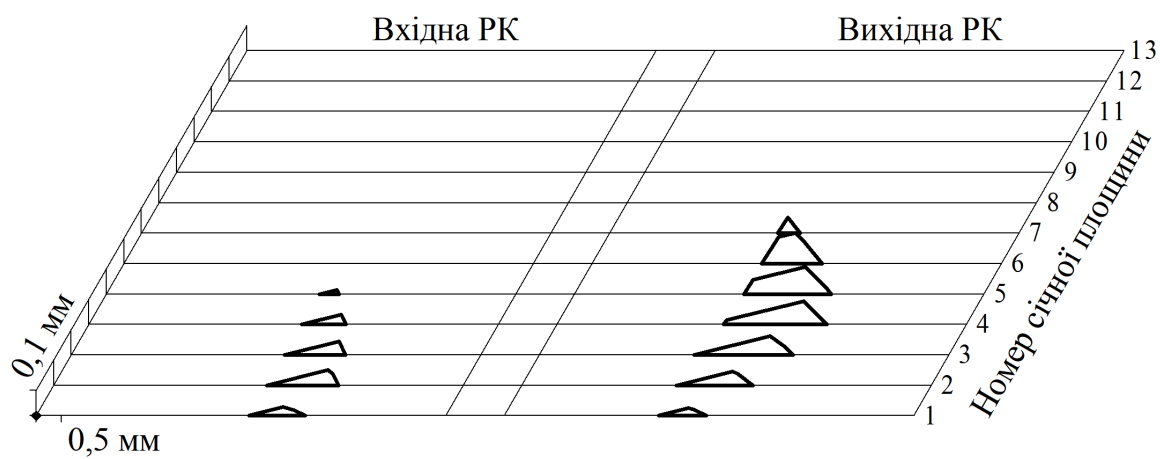


Твірна позиція «-3»

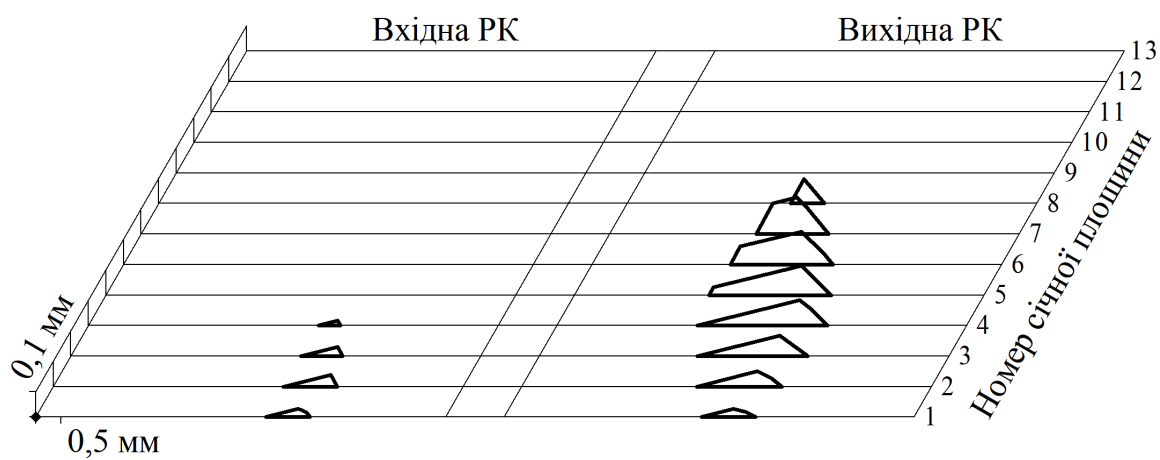


Твірна позиція «-2»

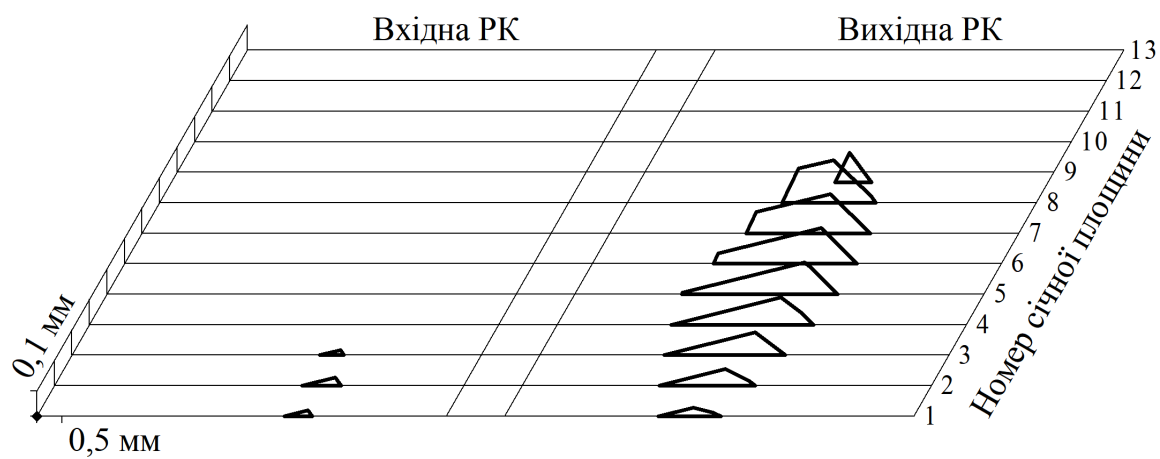
Рис. Б.1, аркуш 5



Твірна позиція «-1»

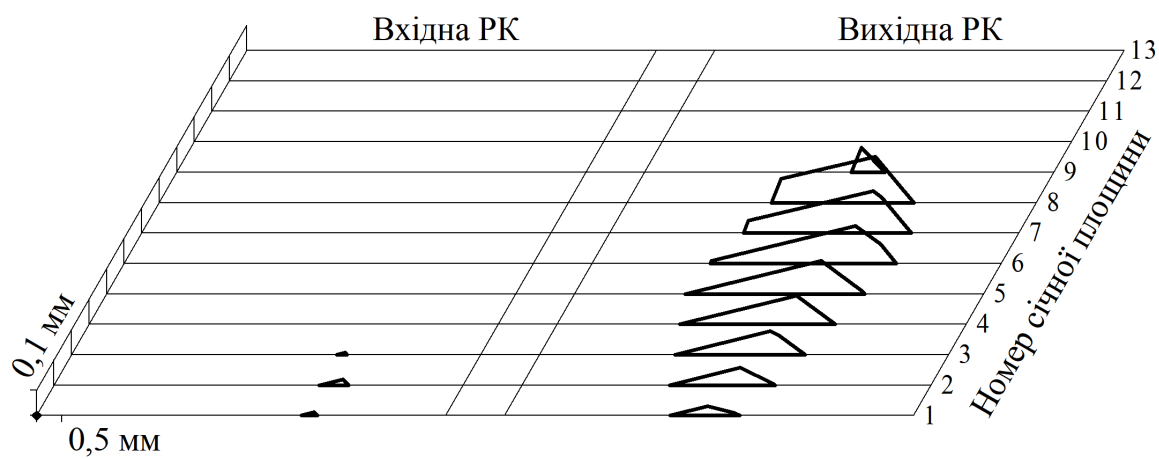


Твірна позиція «0»

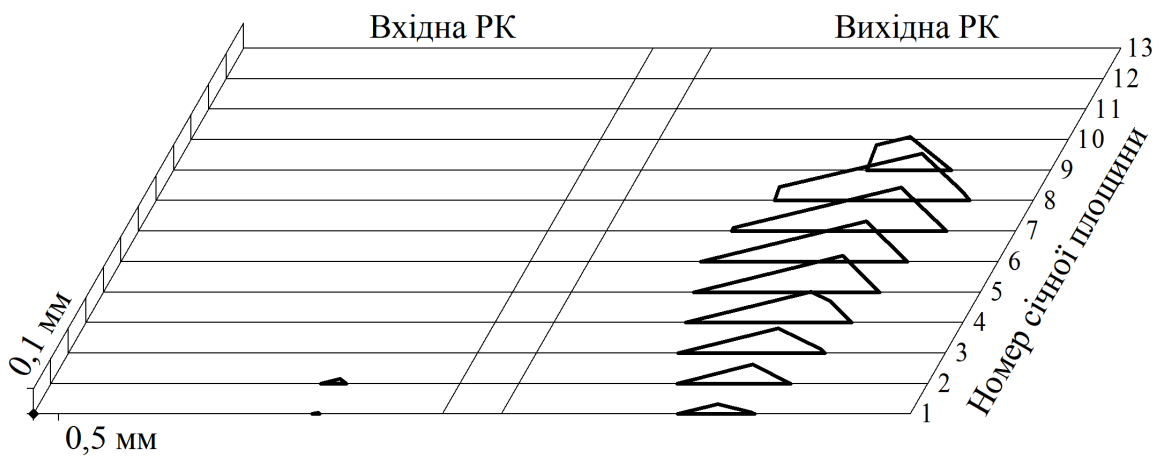


Твірна позиція «1»

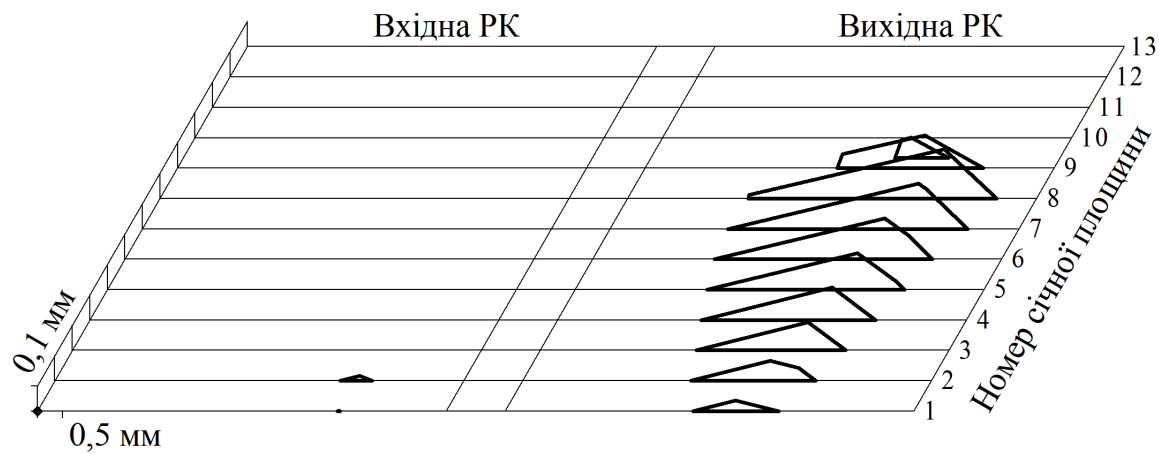
Рис. Б.1, аркуш 6



Твірна позиція «2»

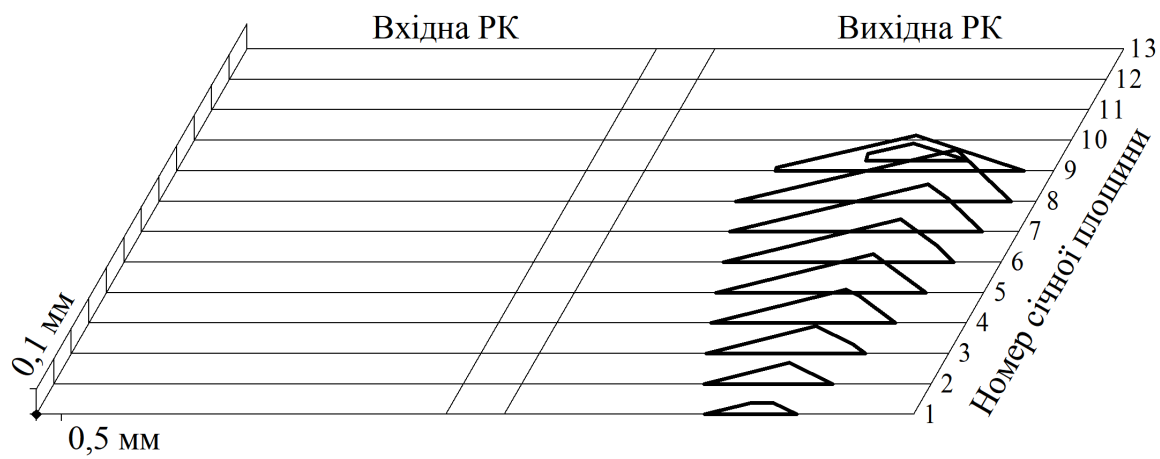


Твірна позиція «3»

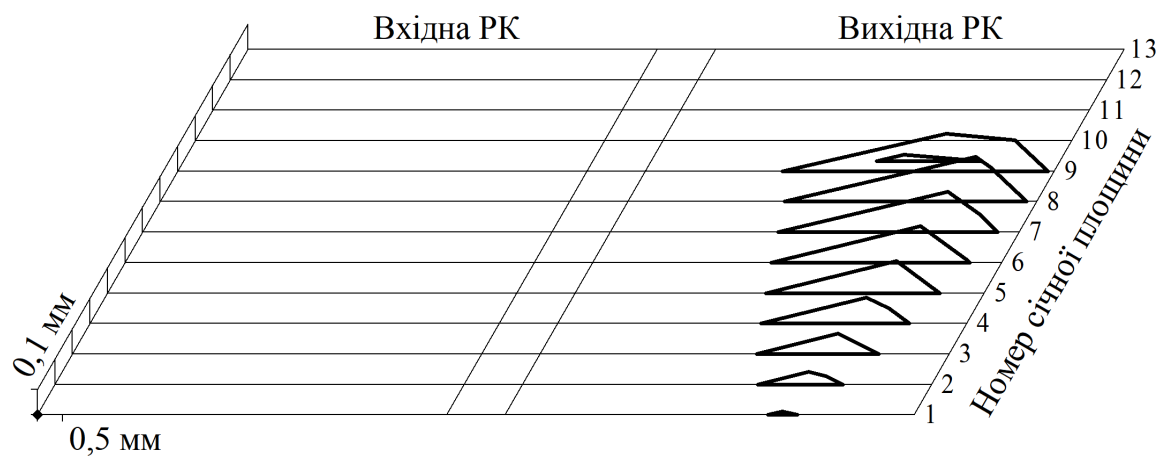


Твірна позиція «4»

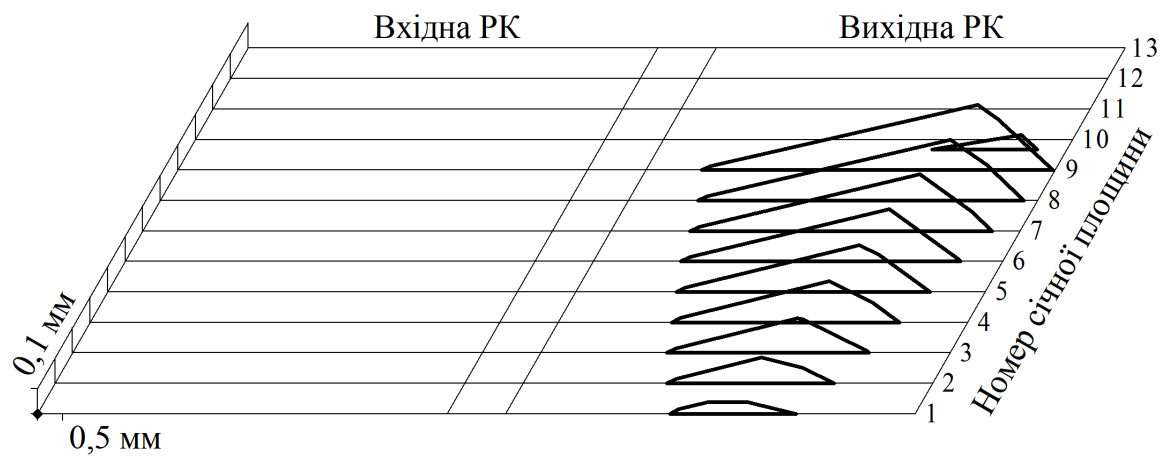
Рис. Б.1, аркуш 7



Твірна позиція «5»

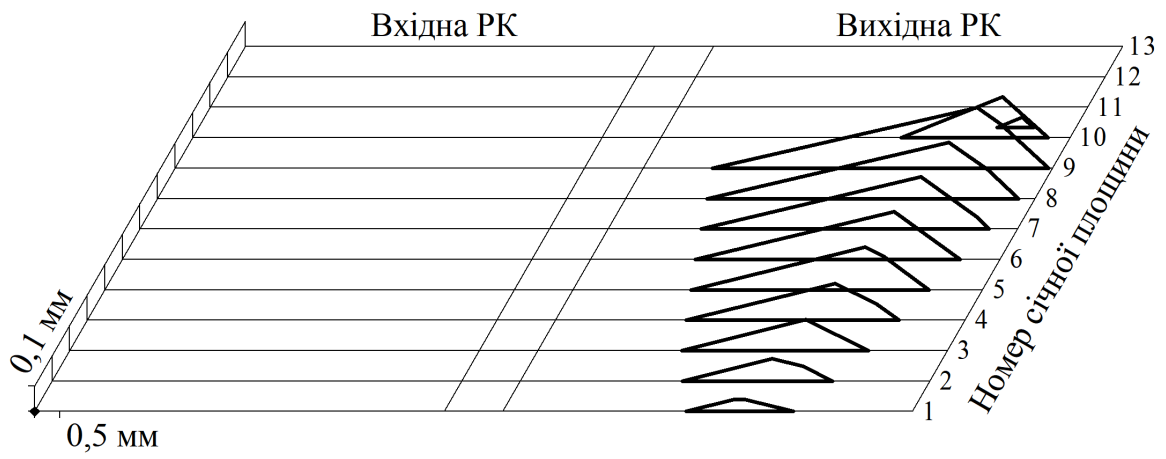


Твірна позиція «6»

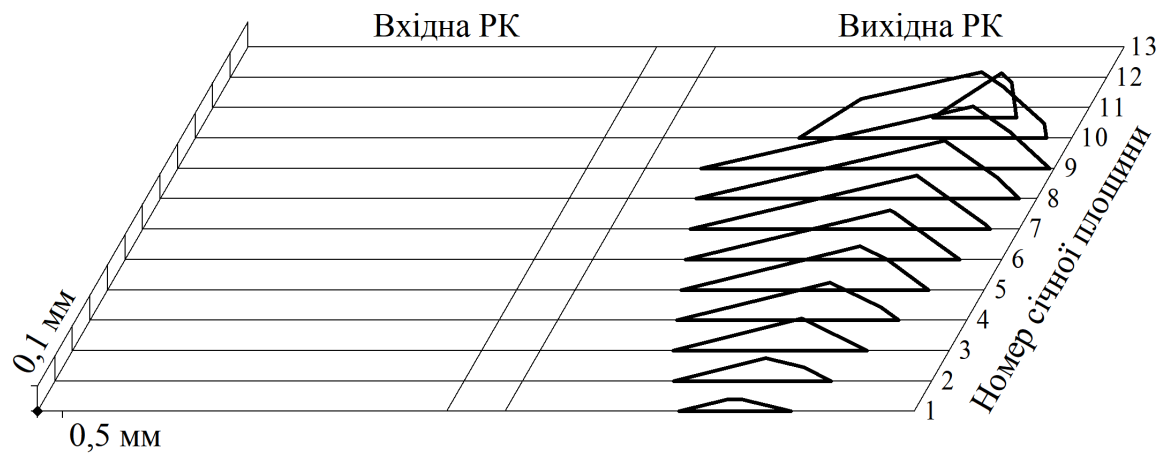


Твірна позиція «7»

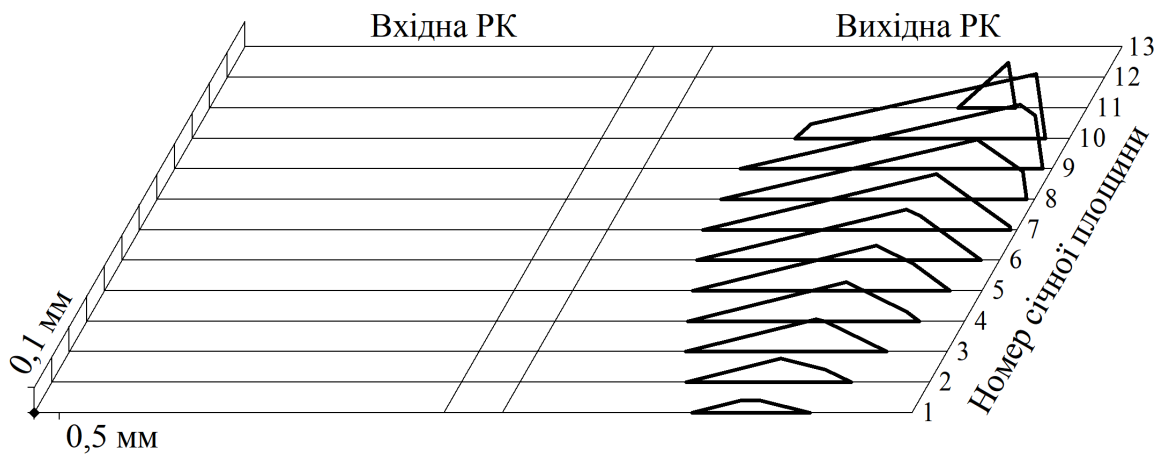
Рис. Б.1, аркуш 8



Твірна позиція «8»

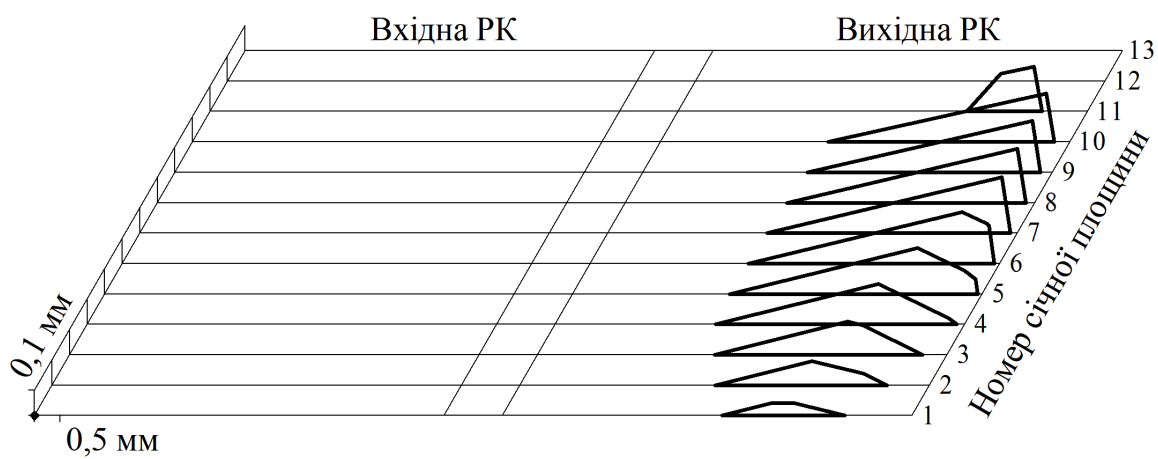


Твірна позиція «9»

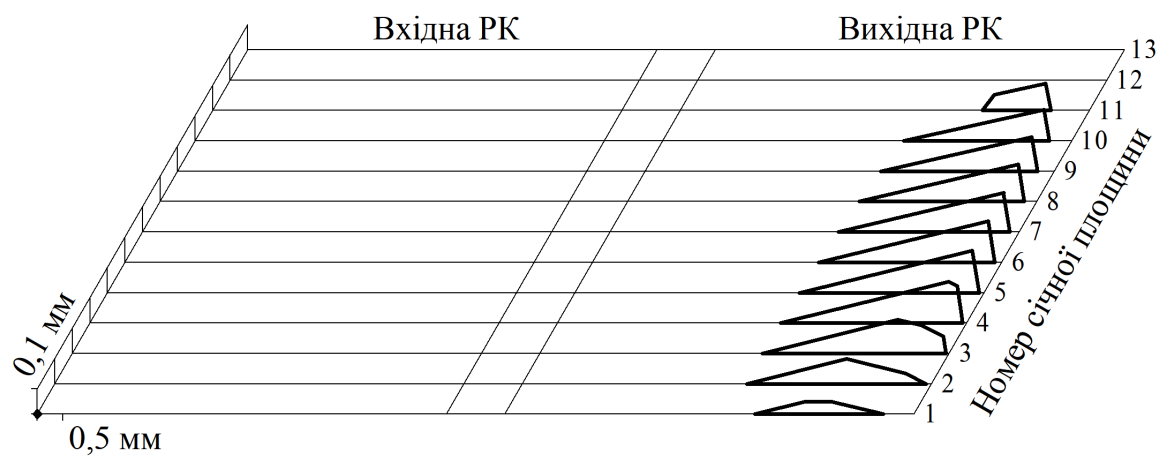


Твірна позиція «10»

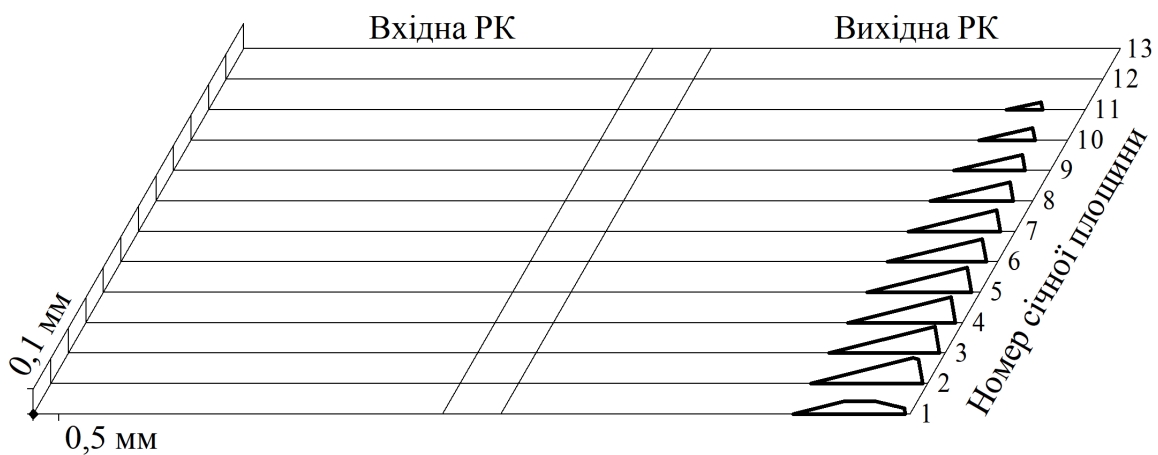
Рис. Б.1, аркуш 9



Твірна позиція «11»

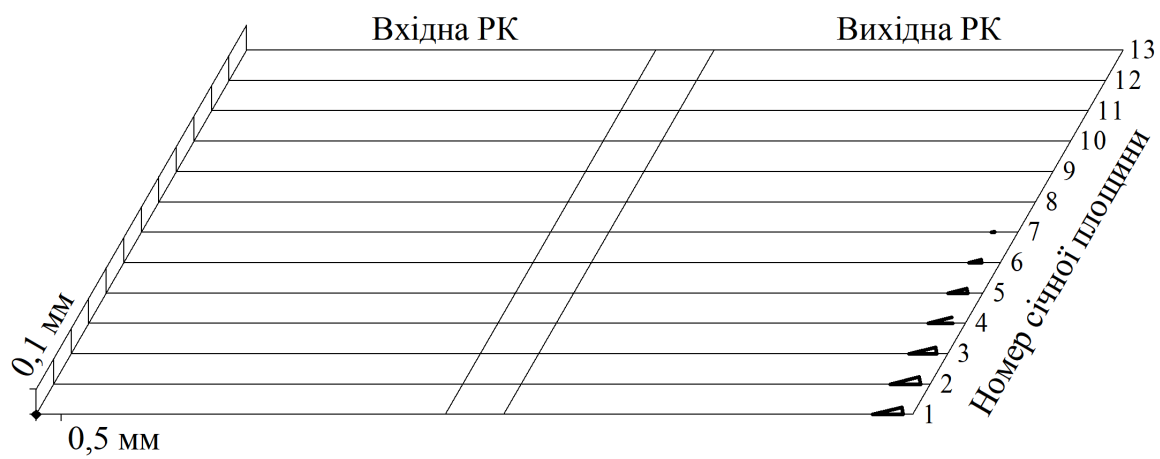


Твірна позиція «12»



Твірна позиція «13»

Рис. Б.1, аркуш 10



Твірна позиція «14»

Рис. Б.1, аркуш 11

Ширина зрізаемого шару, що знімається вихідною РК, мм

Твірна позиція	Радіальна січна площина, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-7	0,715	0,994	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-6	1,532	2,121	0,261	-	-	-	-	-	-	-	-
-5	1,398	1,309	0,694	-	-	-	-	-	-	-	-
-4	1,567	1,228	1,020	0,346	-	-	-	-	-	-	-
-3	1,720	1,105	1,362	0,957	0,253	-	-	-	-	-	-
-2	0,795	1,322	1,721	1,517	1,024	0,301	-	-	-	-	-
-1	0,939	1,512	1,956	2,043	1,733	1,191	0,448	-	-	-	-
0	1,071	1,689	2,180	2,563	2,411	2,019	1,437	0,673	-	-	-
1	1,232	1,894	2,385	2,811	3,084	2,843	2,453	1,852	-	-	-
2	1,375	2,081	2,571	3,070	3,552	3,677	3,317	2,817	0,669	-	-
3	1,521	2,244	2,900	3,280	3,673	4,081	4,237	3,861	1,670	-	-
4	1,696	2,464	2,951	3,448	3,908	4,316	4,743	4,910	2,879	-	-
5	1,819	2,538	3,140	3,636	4,142	4,551	4,980	5,432	4,910	-	-
6	0,581	1,686	2,406	2,930	3,430	3,931	4,348	4,786	5,251	-	-
7	2,487	3,300	3,994	4,493	5,007	5,519	5,962	6,433	6,937	-	-
8	2,114	2,966	3,686	4,195	4,702	5,229	5,688	6,147	6,639	2,893	-
9	2,220	3,111	3,830	4,383	4,890	5,417	5,926	6,388	6,884	4,882	-
10	2,325	3,256	3,973	4,571	5,077	5,604	6,074	6,030	5,966	4,950	1,135
11	2,431	3,401	4,116	4,762	4,904	4,861	4,802	4,720	4,610	4,459	1,478
12	2,536	3,550	3,637	3,603	3,553	3,484	3,390	3,265	3,099	2,879	1,356
13	2,218	2,208	2,180	2,130	2,057	1,957	1,822	1,645	1,414	1,112	0,714
14	0,610	0,597	0,557	0,489	0,388	0,251	0,068	-	-	-	-

Таблиця В.4

Товщина зрізаного шару, що знімається вихідною РК, мм

Твірна позиція	Радіальна січна площина, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-7	0,044	0,074	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-6	0,079	0,060	0,012	-	-	-	-	-	-	-	-
-5	0,085	0,060	0,039	-	-	-	-	-	-	-	-
-4	0,077	0,049	0,050	0,033	-	-	-	-	-	-	-
-3	0,081	0,042	0,059	0,074	0,028	-	-	-	-	-	-
-2	0,026	0,050	0,068	0,083	0,098	0,038	-	-	-	-	-
-1	0,029	0,055	0,075	0,092	0,107	0,121	0,061	-	-	-	-
0	0,031	0,060	0,081	0,099	0,116	0,130	0,144	0,097	-	-	-
1	0,034	0,065	0,089	0,107	0,124	0,140	0,154	0,167	-	-	-
2	0,037	0,070	0,094	0,114	0,131	0,149	0,166	0,180	0,098	-	-
3	0,039	0,074	0,098	0,122	0,144	0,158	0,171	0,185	0,131	-	-
4	0,042	0,078	0,110	0,128	0,145	0,162	0,179	0,194	0,130	-	-
5	0,046	0,084	0,108	0,131	0,152	0,169	0,186	0,202	0,139	-	-
6	0,014	0,050	0,080	0,103	0,126	0,143	0,159	0,176	0,147	-	-
7	0,047	0,102	0,137	0,162	0,185	0,207	0,224	0,240	0,256	-	-
8	0,048	0,088	0,122	0,145	0,168	0,189	0,206	0,222	0,238	0,162	-
9	0,048	0,091	0,126	0,150	0,172	0,195	0,212	0,229	0,245	0,261	-
10	0,049	0,093	0,128	0,154	0,177	0,199	0,219	0,235	0,251	0,252	0,177
11	0,049	0,096	0,131	0,159	0,182	0,204	0,220	0,212	0,203	0,191	0,177
12	0,050	0,098	0,133	0,164	0,167	0,162	0,155	0,146	0,136	0,123	0,107
13	0,051	0,101	0,104	0,101	0,096	0,091	0,083	0,073	0,062	0,047	0,029
14	0,029	0,028	0,026	0,023	0,018	0,012	0,003	-	-	-	-

Таблиця В.6

Недеформована площа перетину зрізасомого шару,
що знімається вихідною РК, мм²

Твірна позиція	Радіальна січна площа, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-7	0,019	0,043	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-6	0,055	0,073	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-
-5	0,060	0,076	0,014	-	-	-	-	-	-	-	-
-4	0,072	0,054	0,029	0,006	-	-	-	-	-	-	-
-3	0,131	0,046	0,043	0,044	0,002	-	-	-	-	-	-
-2	0,011	0,033	0,050	0,077	0,081	0,006	-	-	-	-	-
-1	0,014	0,043	0,074	0,106	0,118	0,088	0,014	-	-	-	-
0	0,018	0,052	0,088	0,129	0,163	0,171	0,130	0,033	-	-	-
1	0,023	0,063	0,106	0,152	0,200	0,236	0,243	0,200	-	-	-
2	0,027	0,073	0,122	0,173	0,235	0,296	0,334	0,332	0,033	-	-
3	0,031	0,083	0,145	0,208	0,264	0,322	0,384	0,429	0,140	-	-
4	0,036	0,105	0,162	0,220	0,286	0,356	0,427	0,501	0,230	-	-
5	0,052	0,107	0,173	0,242	0,315	0,390	0,469	0,551	0,357	-	-
6	0,004	0,045	0,095	0,153	0,215	0,281	0,352	0,426	0,461	-	-
7	0,079	0,188	0,290	0,388	0,487	0,589	0,694	0,803	0,919	-	-
8	0,055	0,140	0,224	0,313	0,403	0,494	0,592	0,694	0,801	0,234	-
9	0,060	0,151	0,242	0,336	0,431	0,530	0,633	0,742	0,856	0,795	-
10	0,236	0,163	0,260	0,360	0,462	0,564	0,674	0,754	0,778	0,716	0,101
11	0,312	0,174	0,278	0,384	0,482	0,534	0,530	0,501	0,467	0,426	0,170
12	0,402	0,186	0,276	0,307	0,297	0,282	0,263	0,239	0,211	0,177	0,100
13	0,078	0,116	0,113	0,107	0,099	0,088	0,076	0,060	0,044	0,026	0,011
14	0,009	0,008	0,007	0,006	0,004	0,001	0,000	-	-	-	-

ДОДАТОК Г

Патент України на корисну модель №84471





ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **84471** (13) **U**
(51) МПК (2013.01)
B23F 19/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2013 04277	(72) Винахідник(и): Підгаєцький Михайло Матвійович (UA), Апаракін Антон Русланович (UA), Скїбїнський Олександр Іванович (UA)
(22) Дата подання заявки: 05.04.2013	(73) Власник(и): КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25006 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.10.2013	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.10.2013, Бюл.№ 20	

(54) СПОСІБ ЛЕЗОВОЇ ОБРОБКИ ЕВОЛЬВЕНТНИХ ПОВЕРХОНЬ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ПІСЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО ПРОРІЗАННЯ ВПАДИН

(57) Реферат:

Спосіб лезової обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс після попереднього прорізання впадин, який здійснюється в умовах обкату з одиничним діленням на один кутовий крок при обертовому русі різання, здійснюваному інструментом, який переміщується повздовж оброблюваної поверхні із швидкістю повздовжньої подачі, з утворенням номінального евольвентного профілю. Формоутворююча ріжуча кромка інструмента знаходиться на продовженні радіусів кривизни евольвентного профілю так, що її початкова точка описує при русі формоутворення номінальний евольвентний профіль.

UA 84471 U

Корисна модель належить до галузі машинобудування, а саме до чистової обробки циліндричних зубчастих коліс; може бути використаний після попереднього прорізання впадин зубців циліндричних зубчастих коліс.

Відомий спосіб зубофрезерування черв'ячною фрезою. Спосіб здійснюють черв'ячною фрезою за методом обкочування, що відтворює зачеплення черв'ячної передачі, при якому оброблюване колесо здійснює обертання навколо власної осі, а черв'ячна фреза здійснює обертальний рух різання навколо власної осі і поступальний рух подачі [1].

Недоліком відомого способу є:

1. Наявність не вільного різання, що підвищує сили різання. В свою чергу, виникнення великих сил різання сприяє виникненню внутрішньої напруги в поверхневому шарі матеріалу, зносу інструменту, зносу кінематичних вузлів верстата [2]

2. Черв'ячна фреза має високу трудомісткість виготовлення і низьку стійкість, а це призводить до великих витрат на інструмент. [3]

В основу винаходу поставлено задачу створення способу обробки зубчастих профілів, по попередньо формоутворених впадинах, простим лезвійним інструментом в умовах вільного різання.

Поставлена задача вирішується за допомогою запропонованого способу обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс після попереднього прорізання впадин, який здійснюється в умовах обкату з одиничним діленням на один кутовий крок при обертотому русі різання, здійснюваному інструментом, який переміщується повздовж оброблюваної поверхні із швидкістю повздовжньої подачі, з утворенням номінального евольвентного профілю.

Особливості запропонованого способу обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс пояснюються графічними зображеннями. На фіг. 1 зображено оброблюване циліндричне зубчасте колесо, з припуском на чистову обробку і інструментом; на фіг. 2 зображено формоутворюючі рухи обкату циліндричного зубчастого колеса при обробці; на фіг. 3 зображено поворот циліндричного зубчастого колеса на один кутовий крок для обробки евольвентної поверхні зубця; на фіг. 4 зображено розміщення інструменту для обробки опозитних профілів зуба.

На фіг. 1 зображено: оброблюване циліндричне зубчасте колесо 1, припуск на чистову обробку 2, інструмент 3, формоутворююча ріжуча кромка інструменту 4, початкова точка формоутворюючої ріжучої кромки інструмента 5, номінальний евольвентний профіль зуба 6, продовження радіусів кривизни евольвентного профілю 7, вісь обертання інструменту, контур інструменту.

На фіг. 2 зображено: основний циліндр оброблюваного циліндричного зубчастого колеса 8, дотична до основного циліндра площина 9, сімейство окружностей 10, які повторюють траєкторію руху обумовленої різальної кромки, дотичних до оброблюваної поверхні, сімейство осей 11, які утворюють площину діаметрального перерізу, оброблювана поверхня 12.

На фіг. 3 зображено: дотична до основної окружності пряма 13, основна окружність до повороту на кутовий крок 14, основна окружність після повороту на кутовий крок 15, величина лінійного кроку l , величина кутового кроку l' , кутовий крок φ .

На фіг. 4 зображено: оброблюване циліндричне зубчасте колесо 1, інструмент 3, формоутворююча ріжуча кромка інструменту 4, початкова точка формоутворюючої ріжучої кромки інструмента 5, дотична до основної окружності пряма 13, основна окружність 16, радіус основної окружності r_0 , радіус вершин зубців r_e .

На фіг. 2 зображено оброблюване циліндричне зубчасте колесо 1, з припуском на чистову обробку 2. Пропонований спосіб реалізується інструментом 3 за умови, що формоутворююча ріжуча кромка 4 інструмента 3 знаходиться на продовженні радіусів кривизни 7 номінального евольвентного 6 профілю зубців оброблюваного колеса 1 так, що її початкова точка 5 описує при русі формоутворення обумовлений номінальний евольвентний профіль 6 зубця.

На фіг. 2 зображено формоутворюючі рухи обкату циліндричного зубчастого колеса при обробці. Деталь здійснює формоутворюючий рух обкату, що складається з двох рухів, а саме: кочення без проковзування основного циліндра 8 по площині 9, дотичній до неї, та обертання навколо власної осі. В той же час, формоутворюючий рух обкату є періодичним, з повторенням його при переміщенні інструменту повздовж деталі на величину повздовжньої подачі, та повторюваним на кожному знову оброблюваному однойменному евольвентному профілю зуба циліндричного зубчастого колеса. Утворення номінального евольвентного профілю 6 здійснюється сімейством окружностей 10, які повторюють траєкторію руху обумовленої різальної кромки, дотичних до оброблюваної поверхні 12 і утворюючих номінальний евольвентний профіль 6 в перерізі зуба, який співпадає з площиною діаметрального перерізу, яку утворюють осі 11 обумовлених кіл.

UA 84471 U

На фіг. 3 зображено поворот циліндричного зубчастого колеса на один кутовий крок для обробки евольвентної поверхні зубця. Обробка евольвентних поверхонь здійснюється при повороті зубчастого колеса на один кутовий крок φ по дузі основної окружності 14, одночасно з обкатом без ковзання обумовленої основної окружності 14 в положення 15 по прямій 13, дотичній їй, на величину лінійного кроку l рівного обумовленому кутовому l' , тобто:

$$l = l'.$$

На фіг. 4 зображено розміщення інструменту 3 для обробки опозитних профілів зуба. Опозитні евольвентні профілі зуба обробляються двома різальними інструментами 3, початкові точки 5 формоутворюючих різальних кромки 4 яких розміщені на загальній нормалі на відстані L , визначуваній з виразу:

$$L = 2r_e \cdot \sin\left(\cos^{-1} \frac{r_0}{r_e}\right),$$

де, r_e - радіус вершин зубців, мм;

r_0 - радіус основного кола, мм.

Спосіб здійснюється наступним чином.

При обробці евольвентних поверхонь зубців циліндричного зубчастого колеса (фіг. 1) два інструменти 3, формоутворююча ріжуча кромка 4 яких знаходиться на продовженні радіусів кривизни 7 евольвентного профілю 6, встановлюють на безпечній відстані від оброблюваного зубчастого колеса 1 та на загальній нормалі на відстані L між початковими точками 5 формоутворюючих різальних кромки 4. Потім інструментам надають обертальний рух різання навколо власної осі та переміщення повздовж оброблюваної поверхні із швидкістю повздовжньої подачі, а оброблюваному циліндричному зубчастому колесу відповідні формоутворюючі рухи обкату (фіг. 2, фіг. 3). Після завершення обробки опозитних профілів зуба, оброблюване циліндричне зубчасте колесо 1 здійснює рух ділення на один кутовий крок.

Здійснення запропонованого методу обробки можливе шляхом модернізації існуючих фрезерних верстатів. Для модернізації необхідно оснастити верстат систему ЧПУ з схемою синхронізації формоутворюючих рухів обкатування.

Головною перевагою обумовленого способу обробки евольвентних поверхонь зубців циліндричних зубчастих коліс є те, що інструмент 3 має просту форму, сприятливі умови роботи з огляду на вільне стружкоутворення та можливість обробки широкої номенклатури типорозмірів циліндричних зубчастих коліс інструментом одного типорозміру.

Використання запропонованого способу лезової обробки евольвентних поверхонь зубців циліндричних зубчастих коліс дозволить знизити собівартість обробки в 1,5-2,5 рази.

Використанні джерела:

1. Кинематическая структура металлорежущих станков. /А.А. Федотенок. - М.: Машиностроение, 1970.-403 с.

2. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. - М.: Машиностроение, 1981.-104 с, ил.

3. Сидоренко А.К. Червячные фрезы: Опыт НКМЗ. - М.: Машиностроение, 1980.-83 с, ил.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

1. Спосіб лезової обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс після попереднього прорізання впадин, який здійснюється в умовах обкату з одиничним діленням на один кутовий крок при обертовому русі різання, здійснюваному інструментом, який переміщується повздовж оброблюваної поверхні із швидкістю повздовжньої подачі, з утворенням номінального евольвентного профілю, який **відрізняється** тим, що формоутворююча ріжуча кромка інструмента знаходиться на продовженні радіусів кривизни евольвентного профілю так, що її початкова точка описує при русі формоутворення номінальний евольвентний профіль.

2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що утворення евольвентного профілю здійснюється сімейством окружностей, які повторюють траєкторію руху обумовленої різальної кромки, дотичних до обробленої поверхні і утворюючих номінальний евольвентний профіль в перерізі зуба, який співпадає з діаметральним перерізом обумовлених окружностей.

3. Спосіб за пп. 1, 2, який **відрізняється** тим, що деталь здійснює формоутворюючий рух обкату, що складається з двох рухів, а саме: кочення без проковзування основного кола по прямій, дотичній до нього, та обертання навколо власної осі.

UA 84471 U

4. Спосіб за пп. 1, 2, 3, який **відрізняється** тим, що формоутворюючий рух обкату являється періодичним, з повторенням його при переміщенні інструменту повздовж деталі на величину повздовжньої подачі.
5. Спосіб за пп. 1, 2, 3, 4, який **відрізняється** тим, що після кожного формоутворюючого руху обробки евольвентної поверхні зубчасте колесо повертається у вихідне положення при одночасному установчому повороті на один кутовий крок для підводу у вихідне положення наступного евольвентного профілю.
6. Спосіб за пп. 1, 2, 3, 4, 5, який **відрізняється** тим, що опозитні евольвентні профілі зуба обробляються двома інструментами, початкові точки формоутворюючих різальних кромки яких розміщені на загальній нормалі на відстані L , яка визначається з виразу:

$$L = 2r_e \cdot \sin\left(\cos^{-1}\frac{r_0}{r_e}\right),$$

де, r_e - радіус вершин зубців, мм;

r_0 - радіус основного кола, мм.

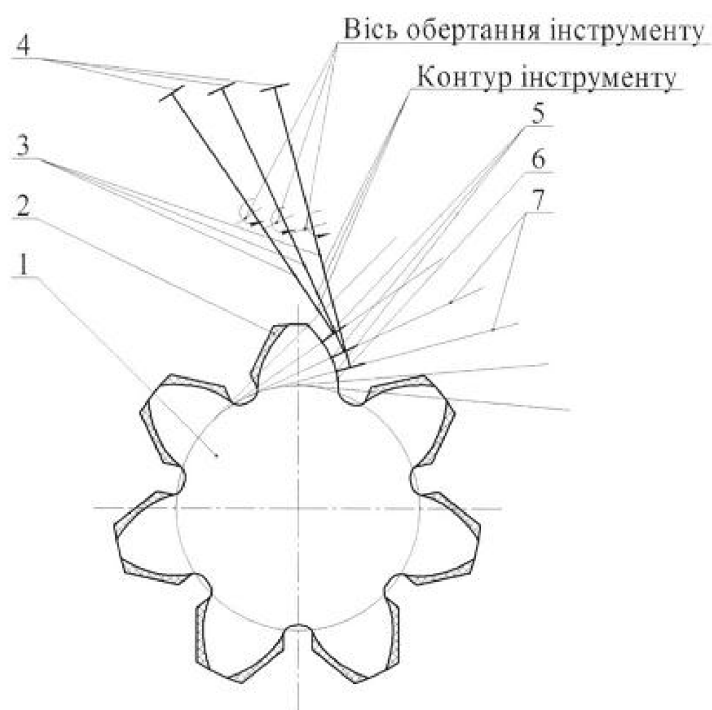
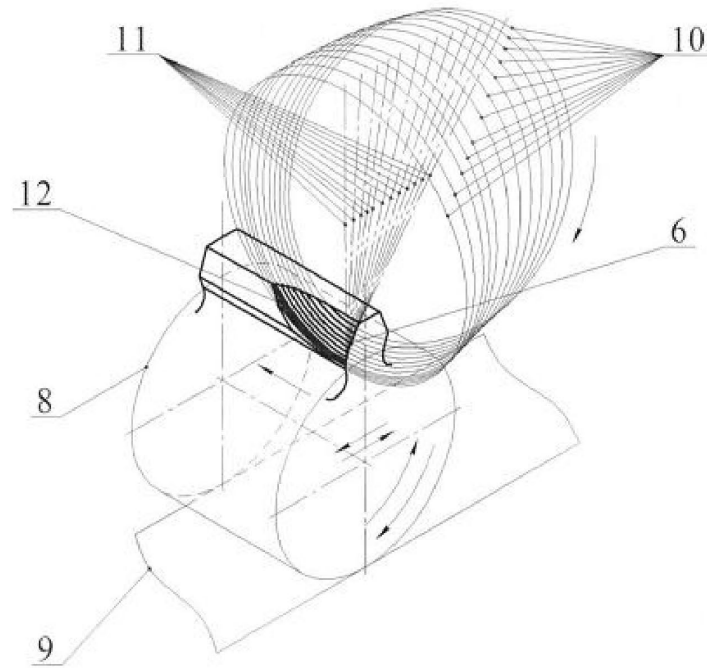
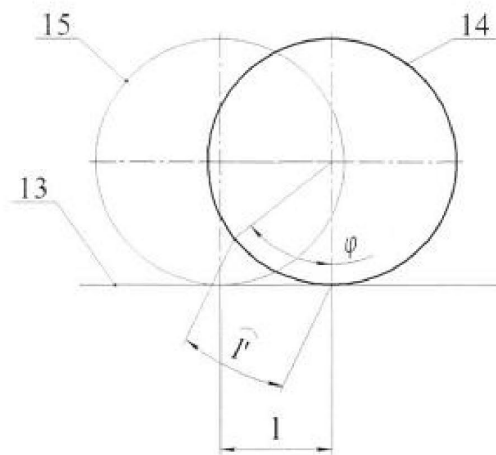


Fig. 1

UA 84471 U

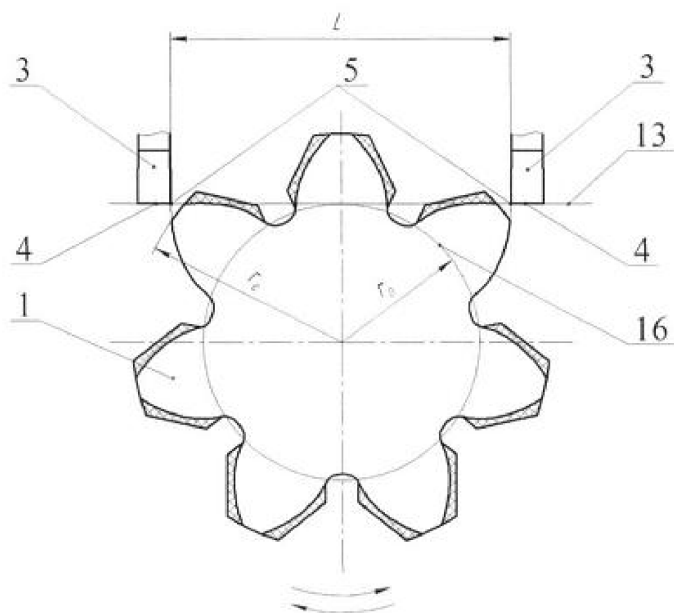


Фиг. 2



Фиг. 3

UA 84471 U



Фиг. 4

Комп'ютерна верстка М. Мацело

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

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

ДОДАТОК Д

Патент України на винахід №110741





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **110741** (13) **C2**
(51) МПК**B23F 21/14** (2006.01)**B23F 21/16** (2006.01)**B23F 5/22** (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

<p>(21) Номер заявки: а 2014 07893</p> <p>(22) Дата подання заявки: 14.07.2014</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 10.02.2016</p> <p>(41) Публікація відомостей про заявку: 25.01.2016, Бюл.№ 2</p> <p>(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 10.02.2016, Бюл.№ 3</p>	<p>(72) Винахідник(и): Підгасцький Михайло Матвійович (UA), Апаракін Антон Русланович (UA), Скібінський Олександр Іванович (UA)</p> <p>(73) Власник(и): КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25006 (UA)</p> <p>(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою: RU 2481927 C1, 20.05.2013 SU 1096058 A1, 07.06.1984 SU 150738 A1, 30.11.1961 SU 814610 A1, 23.03.1981 SU 990445 A1, 23.01.1983 UA 45527 A, 15.04.2002 UA 39595 A, 15.06.2001 US 5338134 A, 16.08.1994 JPS 61131225 U, 16.08.1986 Федотенок А. А. Кинематическая структура металлорежущих станков / А. А. Федотенок. - изд. 2-е. - М.: "Машиностроение". - 1970. - 403 с.</p>
---	--

UA 110741 C2

(54) СПОСІБ ФРЕЗЕРУВАННЯ ЗУБЦІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС З ЕВОЛЬВЕНТНИМ ПРОФІЛЕМ**(57) Реферат:**

Спосіб фрезерування зубців циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем, що включає попереднє прорізання дисковими фрезами з наступним фрезеруванням черв'ячними фрезами, розташованими на загальному інструментальному шпинделі. Для зниження енерговитрат на процес обробки та підвищення ресурсу кінематичних ланцюгів верстата в заявленому способі черв'ячні фрези утворюють комплект з двох штук, встановлених опозитно один одному їх передніми гранями на відстані, тотожній модулю оброблюваного колеса, кожна з яких обробляє однойменний евольвентний профіль зуба.

Винахід належить до галузі машинобудування, а саме до обробки циліндричних зубчастих коліс; може бути використаний для обробки крупномодульних, малозубих циліндричних зубчастих коліс.

Відомий спосіб зубофрезерування фірми HÖFLER. Спосіб здійснюють за два проходи: 5 попереднє прорізання дисковою фрезою в умовах одиничного ділення та чистове зубофрезерування черв'ячною фрезою за методом обкатування, що відтворює зачеплення черв'ячної передачі, при якому оброблюване колесо здійснює обертання навколо власної осі, а черв'ячна фреза здійснює обертальний рух різання навколо власної осі і поступальний рух подачі [1].

10 Недоліком відомого способу є:

1. Черв'ячна фреза має високу трудомісткість виготовлення і низьку стійкість, а це призводить до великих витрат на інструмент. [2]

2. Наявність не вільного стружкоутворення, що підвищує сили різання. В свою чергу, виникнення великих сил різання сприяє виникненню внутрішньої напруги в поверхневому шарі 15 матеріалу, зносу інструменту, зносу кінематичних вузлів верстата. [3]

В основу винаходу поставлено задачу створення способу обробки зубчастих профілів простим лезовим інструментом в умовах вільного стружкоутворення, при рівномірному завантаженні профілів зубців ділильної пари зубооброблюючого верстата.

20 Поставлена задача вирішується за допомогою запропонованого способу обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс, який складається з двох операцій: попереднього прорізання та черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Особливості запропонованого способу обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс пояснюються графічними зображеннями.

25 На фіг. 1 зображено інструментальний шпindel 1 з послідовно розміщеними на ньому наступними інструментами:

- комплект дискових фрез для попереднього прорізання 2;

- комплект черв'ячно-контурних фрез 3, що складається з двох штук, розташованих на розрахунковій відстані одна від одної (на відстані, тотожній модулю оброблюваного колеса), при 30 цьому передні грані обумовлених фрез розташовані опозитно.

При обробці черв'ячно-контурними фрезами, вісь інструментального шпинделя розташовується під кутом θ до повздовжньої осі оброблюваного зуба, що визначається виразом:

$$\theta = 90^\circ - \omega,$$

де: ω - кут нахилу гвинтової лінії фрези, град.

35 На фіг. 2 зображено схему роботи верстата на першій позиції, на якій здійснюється прорізка западин в умовах одиничного ділення комплектом дискових фрез 2. Процес прорізання западин здійснюється як при подачі "зверху вниз" (зустрічне фрезерування), так і при подачі "знизу вгору", після одиничного поділу (попутне фрезерування).

40 На фіг. 3 зображено схему роботи верстата на другій позиції, на якій відбувається обробка в умовах безперервного обкату. При переміщенні, наприклад, вниз працює одна з комплекту черв'ячно-контурних фрез, при цьому обробляються однойменні, праві чи ліві, профілі на всіх зубцях. Після закінчення проходу "зверху вниз" відбувається переміщення інструментального шпинделя, і в роботу вступає друга фреза, яка здійснює обробку опозитного профілю, при ході фрезерного супорта "знизу вгору".

45 На фіг. 4 зображено оброблюване циліндричне зубчасте колесо 4, з припуском на чистову обробку 8. Пропонований спосіб реалізується інструментом 3 за умови, що формоутворююча ріжуча кромка 10 інструмента 3 знаходиться на продовженні радіусів кривизни 7 номінального евольвентного 6 профілю зубців оброблюваного колеса 4 так, що її початкова точка 5 описує при русі формоутворення обумовлений номінальний евольвентний профіль 6 зубця.

50 На фіг. 5 зображено конструктивне виконання інструмента для здійснення запропонованого методу. Інструмент працює єдиною ріжучою кромкою, яка є продовженням радіусів кривизни евольвентного профілю і розміщена на гвинтовій лінії з кроком, рівним кроку зубчатого колеса.

Робота верстата здійснюється в двопозиційному режимі.

55 На першій позиції (фіг. 2) здійснюється прорізка западин в умовах одиничного ділення комплектом дискових фрез при розташуванні інструментального шпинделя перпендикулярно повздовжній осі оброблюваного зуба. Процес прорізання западин здійснюється як при подачі "зверху вниз" (зустрічне фрезерування), так і при подачі "знизу вгору", після одиничного поділу (попутне фрезерування).

UA 110741 C2

Після закінчення прорізання всіх западин виконується переміщення інструментального шпинделя на другу позицію, після чого здійснюється поворот планшайби з інструментальним шпинделем 1 на кут підйому гвинтової лінії черв'ячних фрез.

- 5 На другій робочій позиції (фіг. 3) обробка проводиться в умовах безперервного обкату. При переміщенні інструменту 3, наприклад, вниз працює одна з комплекту черв'ячно-контурних фрез 3, при цьому обробляються праві чи ліві профілі на всіх зубцях. Після закінчення проходу "зверху вниз" відбувається переміщення інструментального шпинделя, і в роботу вступає друга фреза, яка здійснює обробку опозитного профілю, при ході фрезерного супорта "знизу вгору". Напрямок обертання деталі при обробці опозитних профілів протилежний напрямку обертання при першому переході, аналогічно для фрези.

- 10 Здійснення запропонованого методу обробки можливе на існуючих зубофрезерних верстатах з ЧПУ.

- 15 Перевагами обумовленого способу обробки евольвентних поверхонь зубців циліндричних зубчастих коліс є: зниження енергетичних витрат на процес обробки приблизно в 3...4 разів; підвищення ресурсу кінематичних ланцюгів верстата (зниження сили різання в 4...5 разів; чорнове прорізання зубців без участі кінематичних ланцюгів верстата; наявність реверсу черв'ячної ділильної пари при обробці лівих і правих профілів підвищує ресурс); збереження машинного часу обробки на рівні традиційного зубофрезерування черв'ячними фрезами.

- 20 Використання запропонованого способу лезової обробки евольвентних поверхонь зубців циліндричних зубчастих коліс дозволить знизити собівартість обробки в 1,5-2,5 разу.

Використанні джерела:

1. Кинематическая структура металлорежущих станков. / А.А. Федотенко, - М.: Машиностроение, 1970. - 403 с.
 2. Медведицков С.Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами. - М.: Машиностроение, 1981. - 104 с., ил.
 25 3. Сидоренко А.К. Червячные фрезы: Опыт НКМЗ. - М.: Машиностроение, 1980. - 83 с, ил.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

- 30 1. Спосіб фрезерування зубців циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем, що включає попереднє прорізання дисковими фрезами з наступним фрезеруванням черв'ячними фрезами, розташованими на загальному інструментальному шпинделі, який **відрізняється** тим, що черв'ячні фрези утворюють комплект з двох штук, встановлених опозитно один одному їх передніми гранями на відстані, тотожній модулю оброблюваного колеса, кожна з яких обробляє
- 35 однойменний евольвентний профіль зуба.
2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що попереднє прорізання дисковими фрезами виконується в умовах одиничного ділення при розташуванні інструментального шпинделя перпендикулярно повздовжній осі оброблюваного зуба, а фрезерування відбувається комплектом з двох черв'ячних фрез, які мають єдину ріжучу кромку, що є продовженням радіусів
- 40 кривизни оброблюваного колеса, при цьому, якщо перша фреза оброблює профіль при обертанні деталі, наприклад по годинниковій стрілці, то друга при обертанні в протилежному напрямку, а вісь інструментального шпинделя розташована під кутом θ до повздовжньої осі оброблюваного зуба, що визначається виразом:
- $\theta=90^\circ-\omega$,
- 45 де: ω - кут нахилу гвинтової лінії фрези, град.

UA 110741 C2

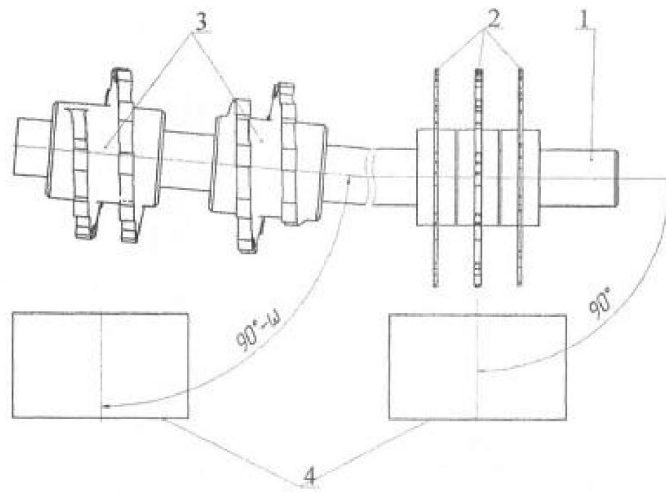


Fig. 1

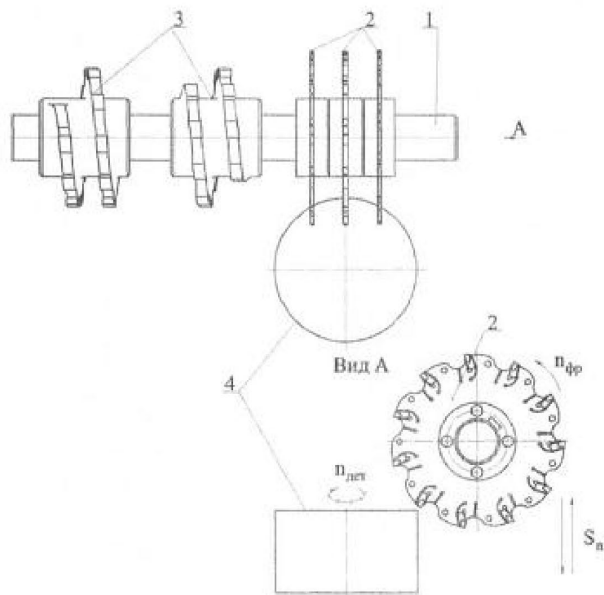
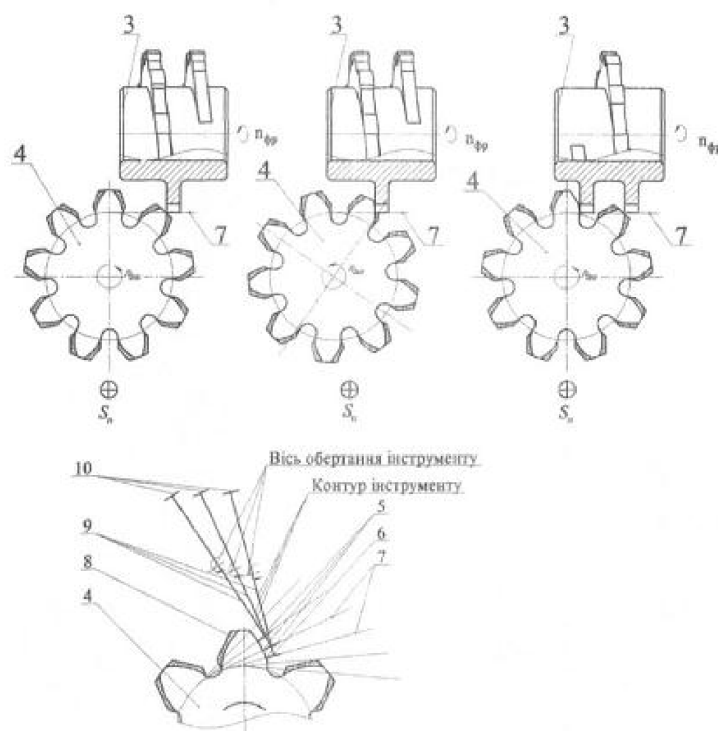
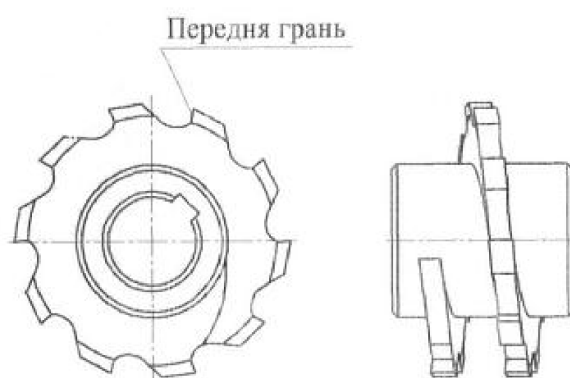


Fig. 2

UA 110741 C2



Фіг. 4



Фіг. 5

Комп'ютерна верстка А. Крулевський

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 Е

Результати дослідження процесу формоутворення
черв'ячно-контурного зубофрезерування

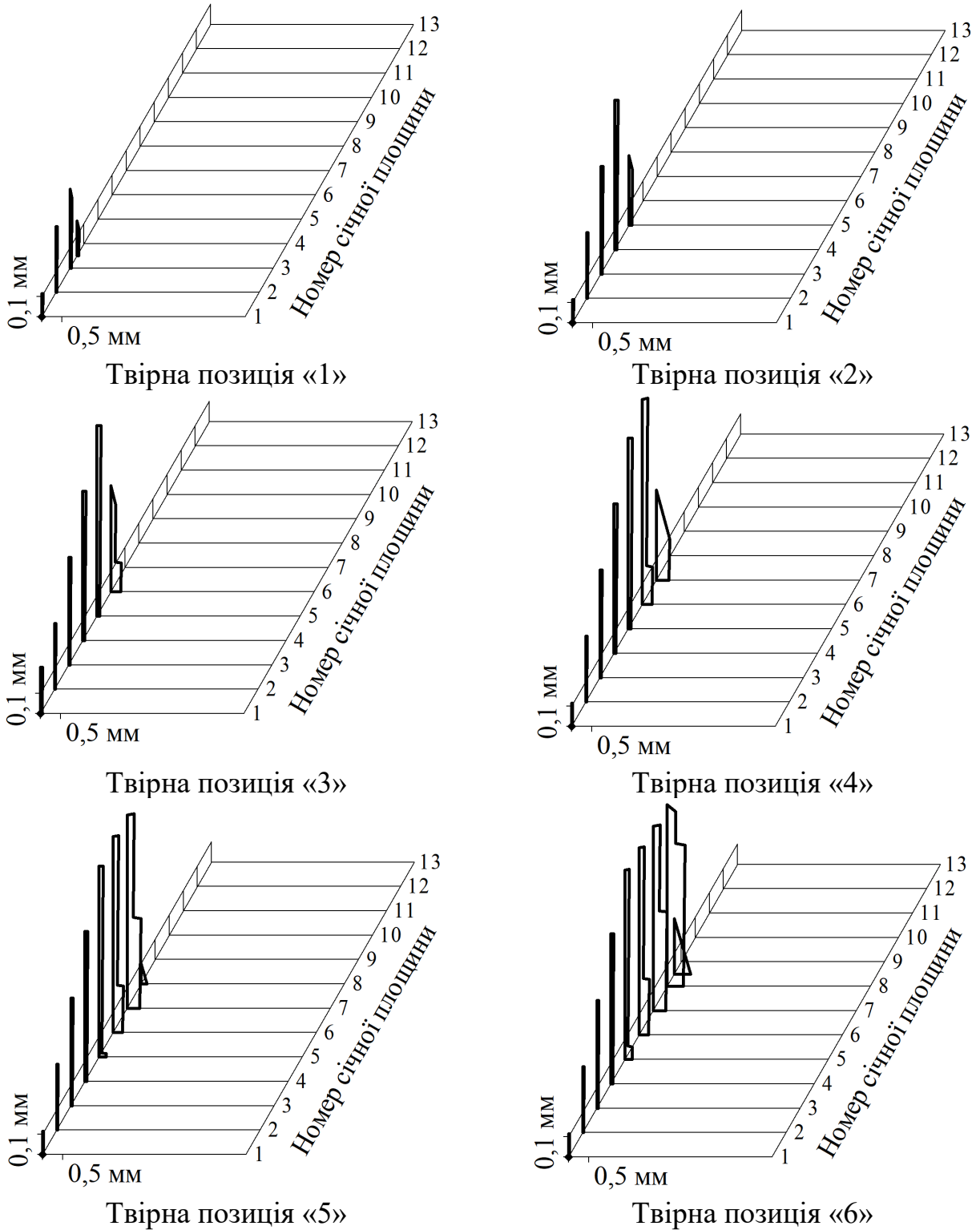
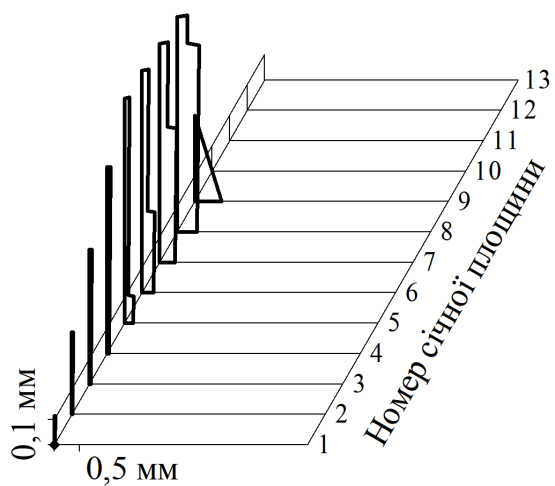
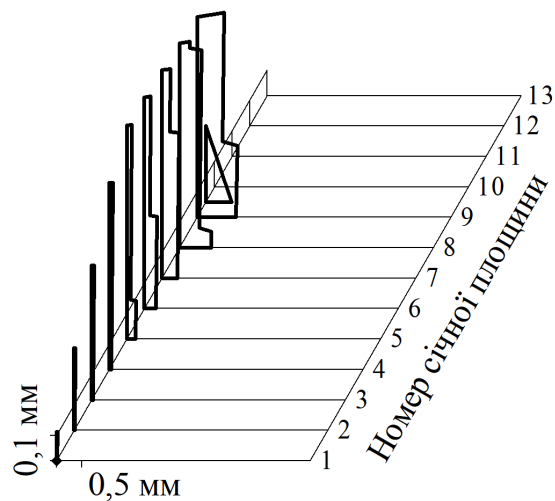


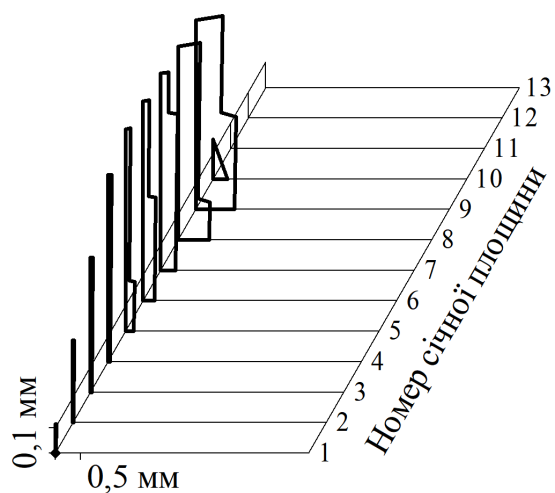
Рис. Е.1 Масштабна схема розміщення окремих площин перерізів по траєкторії руху зубця черв'ячно-контурної фрези



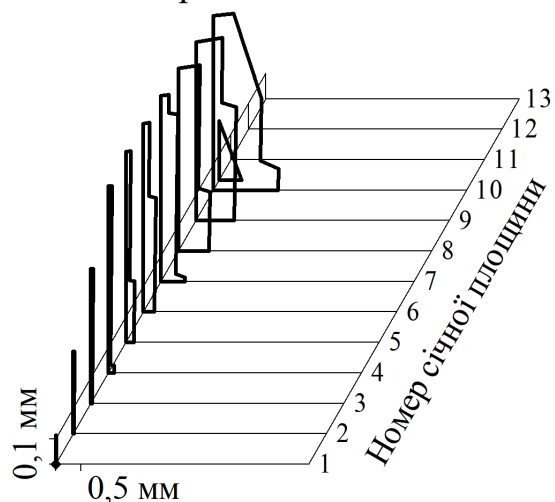
Твірна позиція «7»



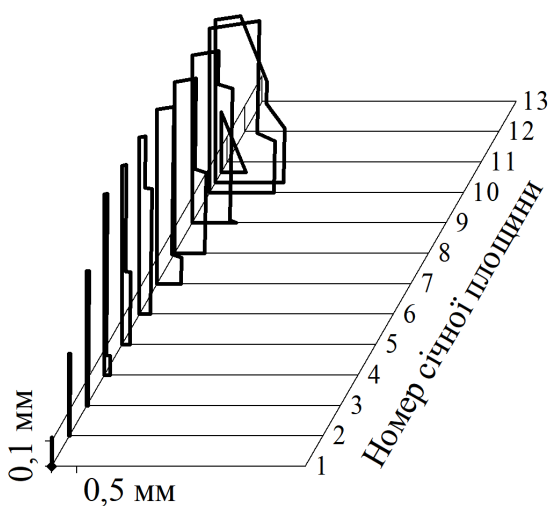
Твірна позиція «8»



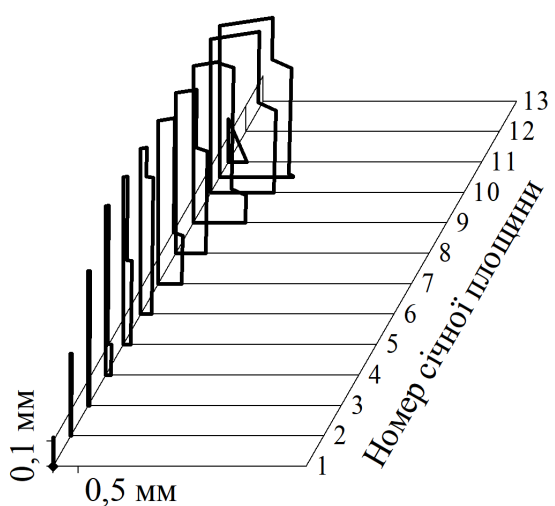
Твірна позиція «9»



Твірна позиція «10»

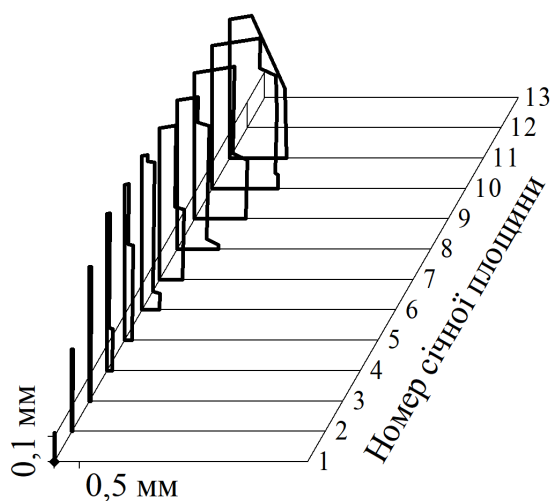


Твірна позиція «11»

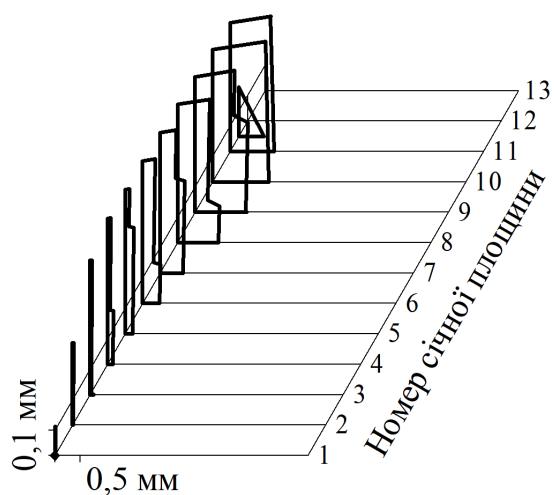


Твірна позиція «12»

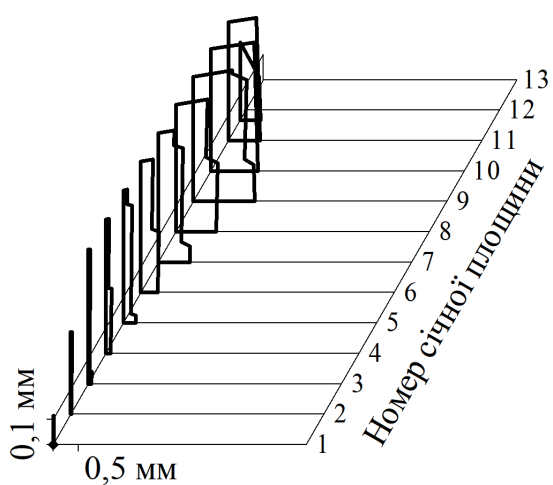
Рис. Е.1, аркуш 2



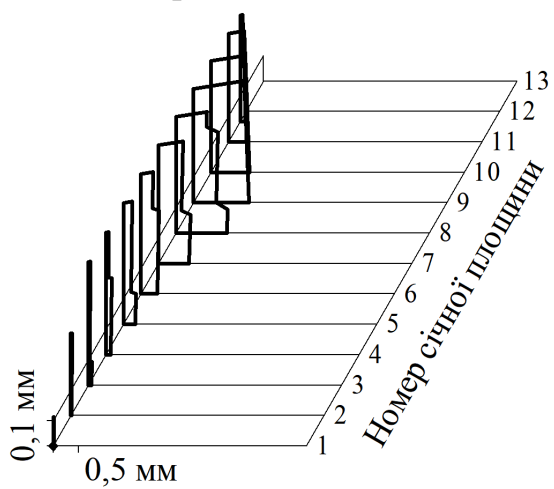
Твірна позиція «13»



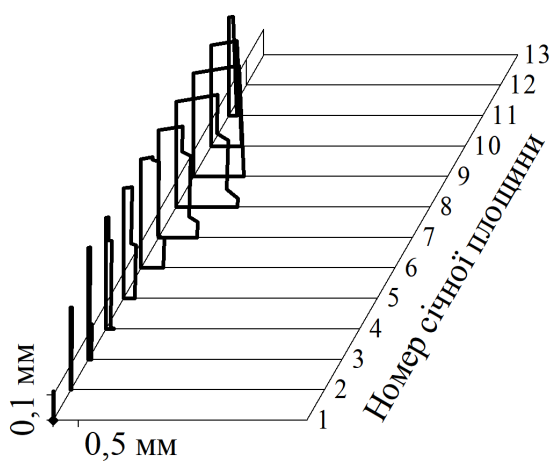
Твірна позиція «14»



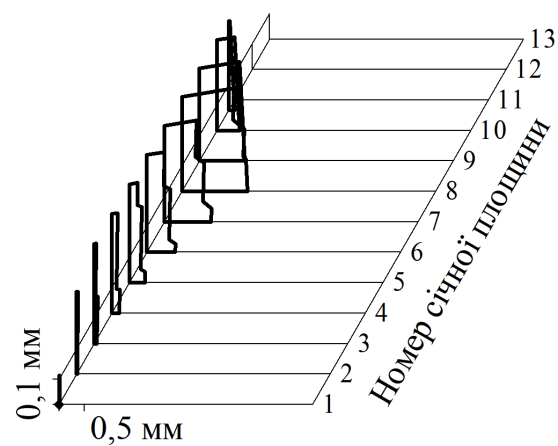
Твірна позиція «15»



Твірна позиція «16»

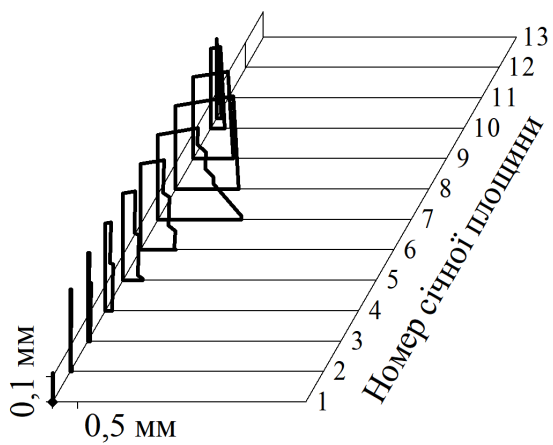


Твірна позиція «17»

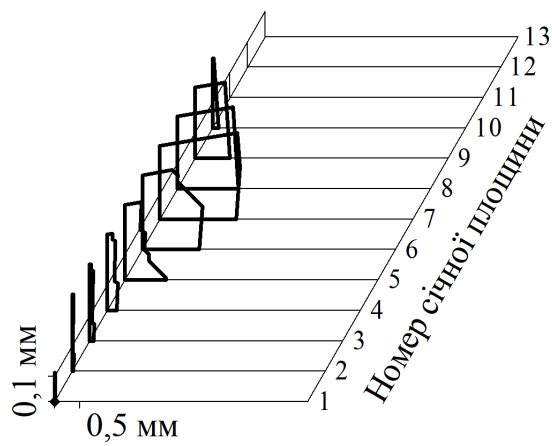


Твірна позиція «18»

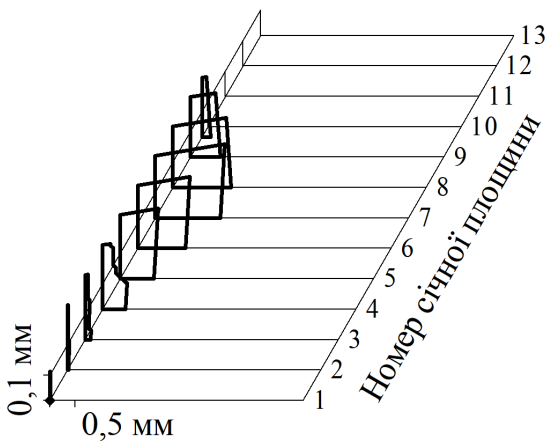
Рис. Е.1, аркуш 3



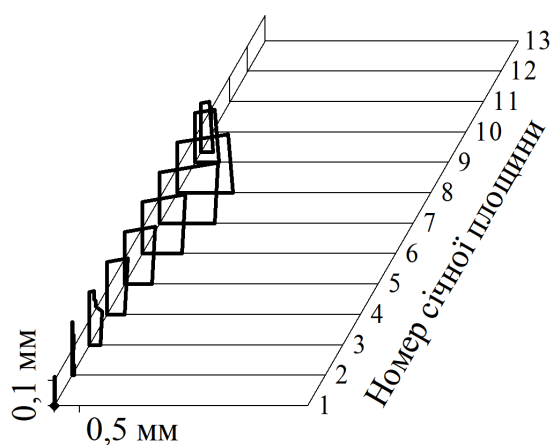
Твірна позиція «19»



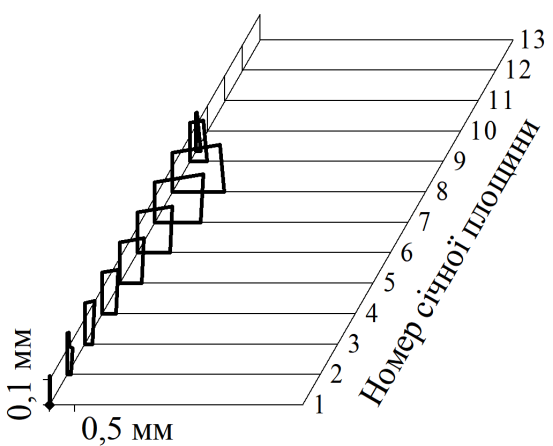
Твірна позиція «20»



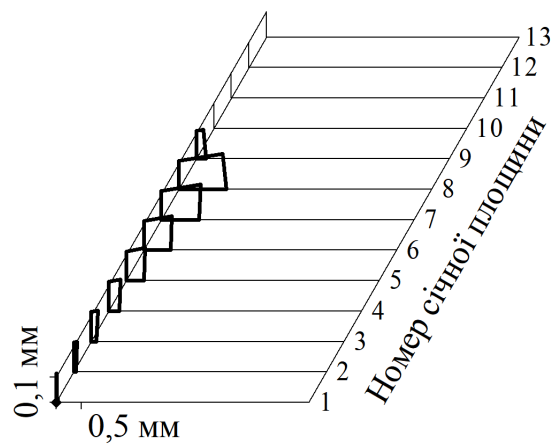
Твірна позиція «21»



Твірна позиція «22»

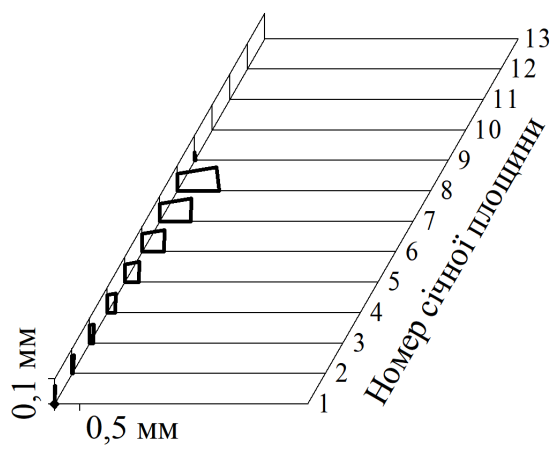


Твірна позиція «23»

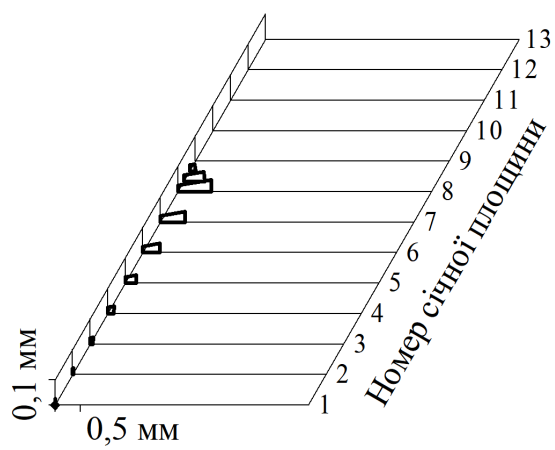


Твірна позиція «24»

Рис. Е.1, аркуш 4



Твірна позиція «25»



Твірна позиція «26»

Рис. Е.1, аркуш 5

ДОДАТОК Ж

**Результати дослідження параметрів одиничних зрізів
черв'ячно-контурного зубофрезерування**

Таблиця Ж.1

Ширина зрізаємого шару, мм

Твірна позиція	Радіальна січна площина, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
1	0,027	0,038	0,048	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,026	0,037	0,054	0,078	0,085	-	-	-	-	-	-
3	0,025	0,036	0,053	0,077	0,107	0,245	-	-	-	-	-
4	0,025	0,035	0,052	0,076	0,106	0,242	0,315	-	-	-	-
5	0,024	0,034	0,052	0,075	0,105	0,239	0,312	0,144	-	-	-
6	0,023	0,034	0,051	0,074	0,176	0,235	0,308	0,439	-	-	-
7	0,022	0,033	0,050	0,074	0,172	0,232	0,340	0,439	0,537	-	-
8	0,021	0,032	0,049	0,073	0,169	0,229	0,340	0,438	0,769	-	-
9	0,020	0,031	0,048	0,072	0,166	0,226	0,339	0,617	0,762	0,280	-
10	0,020	0,030	0,047	0,071	0,163	0,222	0,339	0,608	0,755	0,955	-
11	0,019	0,030	0,047	0,070	0,160	0,219	0,339	0,600	0,749	0,977	-
12	0,018	0,029	0,046	0,110	0,156	0,216	0,332	0,593	0,799	0,965	0,372
13	0,017	0,028	0,045	0,106	0,153	0,252	0,457	0,633	0,791	1,261	1,094
14	0,016	0,027	0,044	0,103	0,150	0,248	0,450	0,634	1,002	1,110	0,864
15	0,016	0,026	0,044	0,100	0,149	0,333	0,487	0,792	1,051	0,931	0,623
16	0,015	0,025	0,063	0,096	0,176	0,326	0,484	0,831	1,098	0,762	0,391
17	0,014	0,025	0,060	0,094	0,229	0,361	0,635	1,024	0,994	0,600	0,164
18	0,014	0,024	0,057	0,149	0,250	0,464	0,784	1,230	0,894	0,442	-
19	0,013	0,023	0,051	0,159	0,321	0,672	1,644	1,251	0,795	0,283	-
20	0,009	0,026	0,065	0,190	0,817	1,128	1,507	1,204	0,694	0,120	-
21	0,009	0,025	0,094	0,449	0,665	0,944	1,282	1,155	0,589	-	-
22	0,009	0,035	0,212	0,349	0,541	0,786	1,085	1,098	0,473	-	-
23	0,010	0,079	0,150	0,270	0,436	0,650	0,909	1,026	0,342	-	-
24	0,024	0,044	0,105	0,207	0,349	0,531	0,752	0,937	0,192	-	-
25	0,019	0,036	0,074	0,158	0,276	0,427	0,610	0,826	0,018	-	-
26	0,003	0,014	0,054	0,121	0,215	0,336	0,482	0,654	-	-	-

Товщина зрізасюмого шару, мм

Твірна позиція	Радіальна січна площа, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
1	0,114	0,324	0,388	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,114	0,324	0,532	0,738	0,344	-	-	-	-	-	-
3	0,114	0,324	0,532	0,738	0,942	0,523	-	-	-	-	-
4	0,114	0,324	0,532	0,738	0,942	1,011	0,444	-	-	-	-
5	0,114	0,324	0,532	0,738	0,942	0,967	0,952	0,101	-	-	-
6	0,114	0,324	0,532	0,738	0,933	0,922	0,908	0,892	-	-	-
7	0,114	0,324	0,532	0,738	0,887	0,877	0,864	0,849	0,339	-	-
8	0,114	0,324	0,532	0,738	0,842	0,832	0,820	0,812	0,807	-	-
9	0,114	0,324	0,532	0,738	0,800	0,787	0,776	0,762	0,747	0,156	-
10	0,114	0,324	0,532	0,737	0,754	0,746	0,732	0,733	0,704	0,688	-
11	0,114	0,324	0,532	0,714	0,709	0,702	0,699	0,689	0,679	0,677	-
12	0,114	0,324	0,532	0,669	0,663	0,657	0,654	0,646	0,636	0,635	0,170
13	0,114	0,324	0,532	0,623	0,618	0,612	0,610	0,602	0,602	0,594	0,562
14	0,114	0,324	0,532	0,577	0,572	0,571	0,566	0,566	0,560	0,555	0,533
15	0,114	0,324	0,531	0,531	0,527	0,526	0,521	0,522	0,511	0,507	0,485
16	0,114	0,324	0,487	0,485	0,485	0,481	0,483	0,479	0,482	0,461	0,438
17	0,114	0,324	0,441	0,439	0,439	0,436	0,438	0,442	0,436	0,414	0,390
18	0,114	0,324	0,395	0,393	0,393	0,395	0,399	0,406	0,390	0,368	-
19	0,114	0,323	0,349	0,349	0,351	0,355	0,360	0,366	0,345	0,321	-
20	0,114	0,303	0,302	0,303	0,308	0,314	0,341	0,321	0,299	0,275	-
21	0,114	0,256	0,257	0,258	0,277	0,283	0,291	0,276	0,253	-	-
22	0,114	0,210	0,212	0,222	0,227	0,233	0,240	0,231	0,207	-	-
23	0,114	0,165	0,170	0,173	0,177	0,183	0,189	0,186	0,161	-	-
24	0,114	0,120	0,121	0,124	0,128	0,134	0,139	0,140	0,115	-	-
25	0,072	0,072	0,074	0,076	0,080	0,085	0,090	0,094	0,033	-	-
26	0,025	0,025	0,027	0,029	0,032	0,036	0,041	0,047	-	-	-

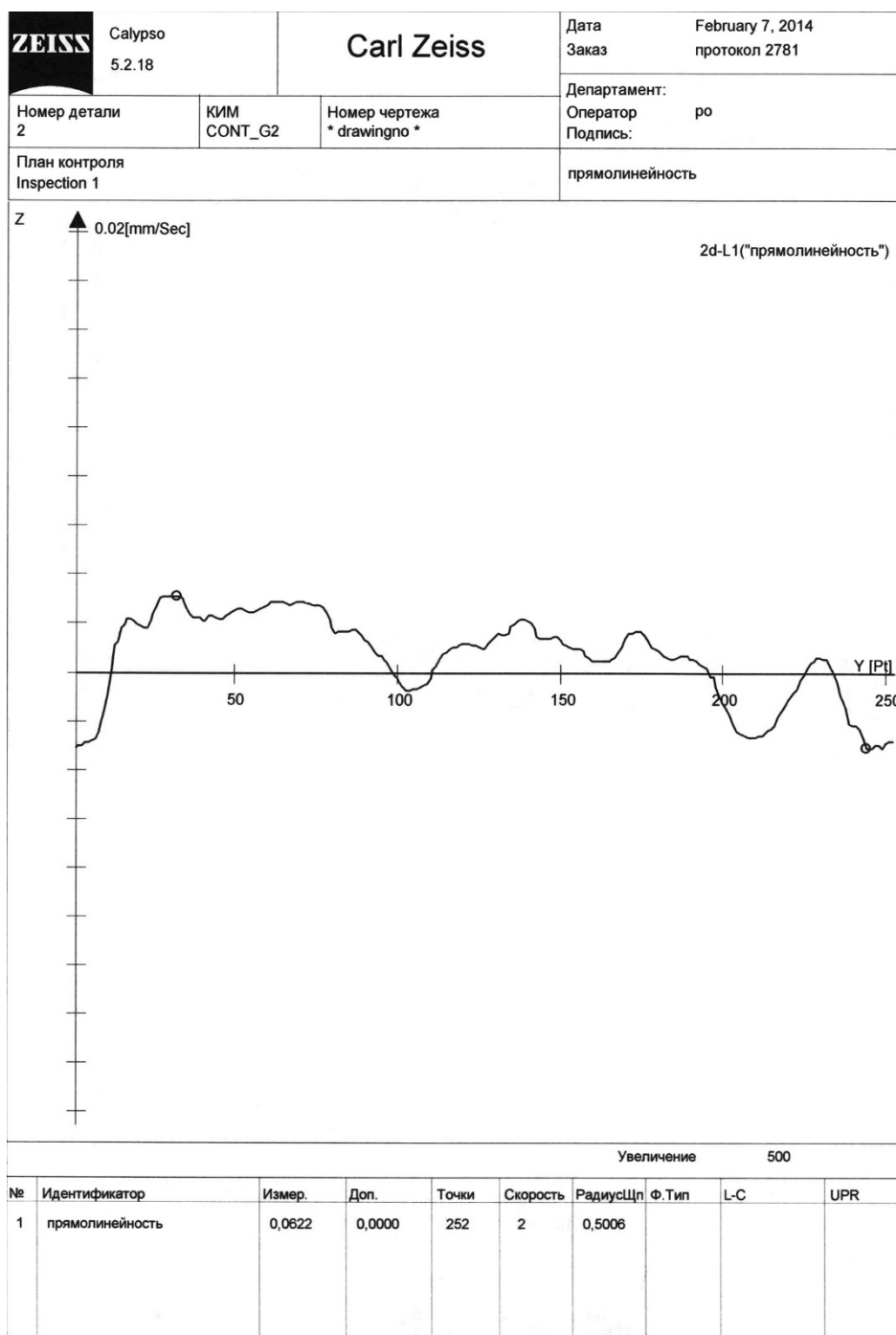
Таблиця Ж.3

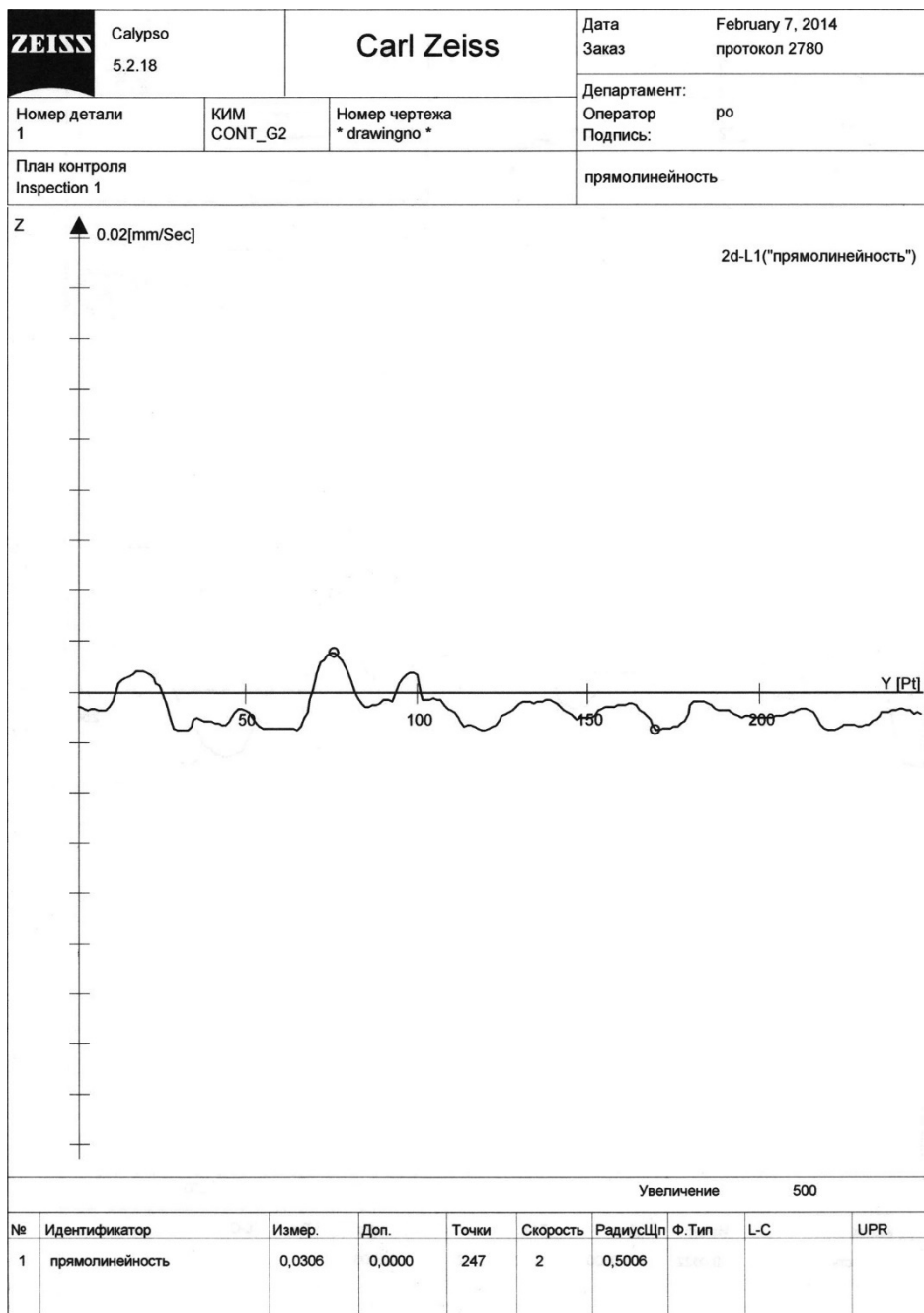
Недеформована площа перетину зрізаного шару, мм²

Твірна позиція	Радіальна січна площа, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
1	0,003	0,010	0,016	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,003	0,010	0,024	0,048	0,025	-	-	-	-	-	-
3	0,003	0,010	0,023	0,047	0,085	0,074	-	-	-	-	-
4	0,003	0,010	0,023	0,047	0,085	0,149	0,105	-	-	-	-
5	0,002	0,009	0,022	0,046	0,086	0,148	0,228	0,007	-	-	-
6	0,002	0,009	0,022	0,045	0,089	0,147	0,229	0,331	-	-	-
7	0,002	0,009	0,022	0,045	0,088	0,146	0,226	0,330	0,091	-	-
8	0,002	0,008	0,021	0,044	0,087	0,145	0,224	0,345	0,492	-	-
9	0,002	0,008	0,021	0,044	0,086	0,144	0,223	0,351	0,489	0,022	-
10	0,002	0,008	0,020	0,045	0,085	0,142	0,226	0,349	0,487	0,588	-
11	0,002	0,008	0,020	0,046	0,084	0,141	0,238	0,347	0,485	0,702	-
12	0,002	0,007	0,019	0,045	0,083	0,140	0,236	0,345	0,517	0,698	0,032
13	0,002	0,007	0,019	0,045	0,082	0,148	0,234	0,349	0,519	0,696	0,522
14	0,002	0,007	0,019	0,044	0,082	0,151	0,233	0,372	0,514	0,580	0,434
15	0,002	0,007	0,020	0,043	0,084	0,149	0,243	0,369	0,543	0,441	0,280
16	0,001	0,006	0,020	0,042	0,089	0,147	0,253	0,390	0,490	0,324	0,152
17	0,001	0,006	0,019	0,042	0,087	0,162	0,262	0,413	0,399	0,225	0,048
18	0,001	0,006	0,019	0,047	0,090	0,165	0,288	0,456	0,319	0,143	-
19	0,001	0,006	0,017	0,044	0,097	0,192	0,387	0,416	0,249	0,075	-
20	0,001	0,006	0,019	0,050	0,134	0,315	0,489	0,350	0,187	0,021	-
21	0,001	0,005	0,021	0,087	0,187	0,262	0,355	0,286	0,133	-	-
22	0,001	0,006	0,040	0,081	0,123	0,178	0,246	0,226	0,087	-	-
23	0,001	0,012	0,028	0,049	0,077	0,115	0,161	0,169	0,048	-	-
24	0,001	0,007	0,014	0,026	0,041	0,067	0,097	0,114	0,019	-	-
25	0,001	0,002	0,006	0,012	0,021	0,033	0,049	0,066	0,000	-	-
26	0,000	0,000	0,001	0,003	0,006	0,010	0,016	0,024	-	-	-

ДОДАТОК И

Результати обмірів непрямої лінійності на координатно-вимірювальній машині Contura G2 (CARL ZEISS)


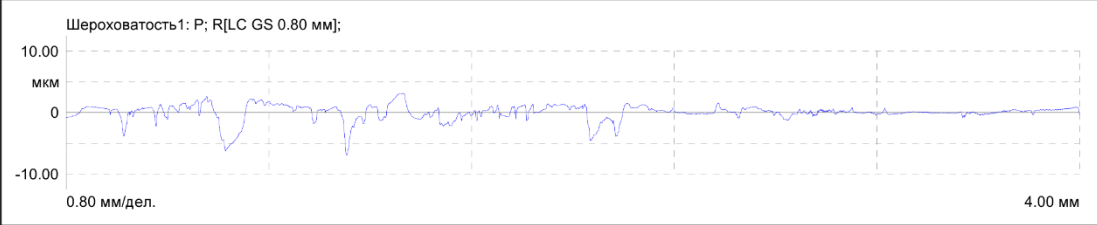
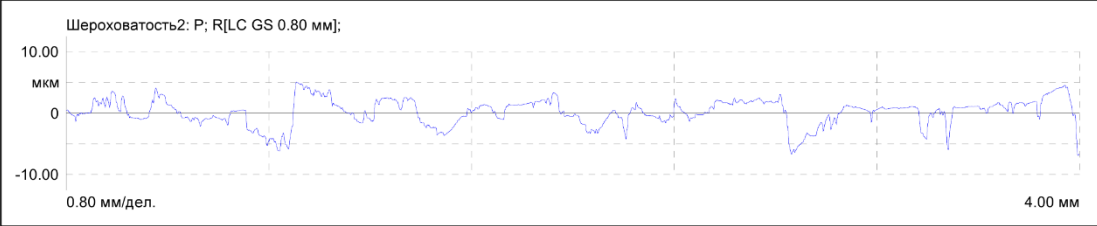

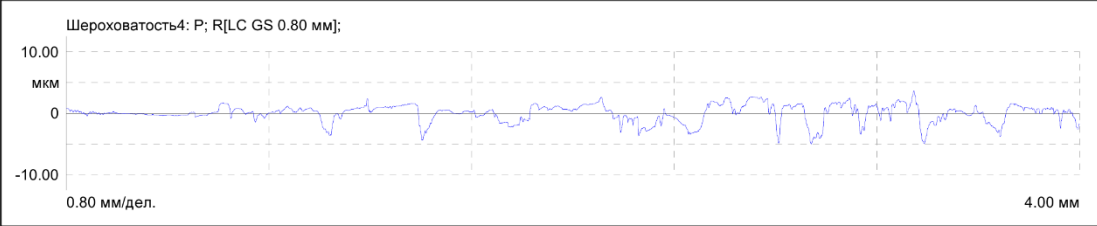



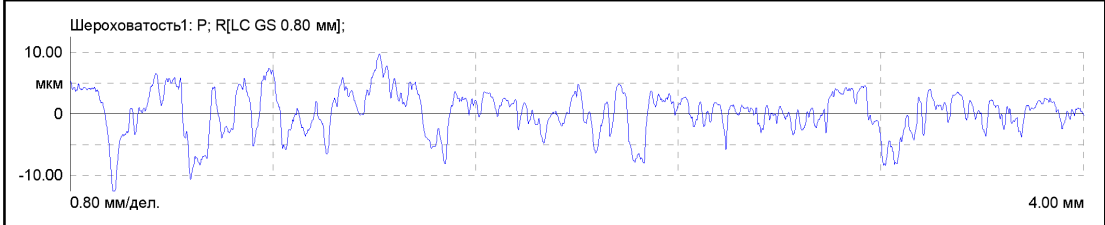
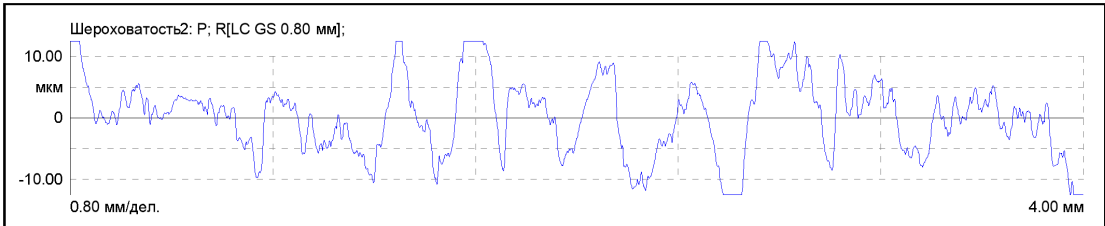
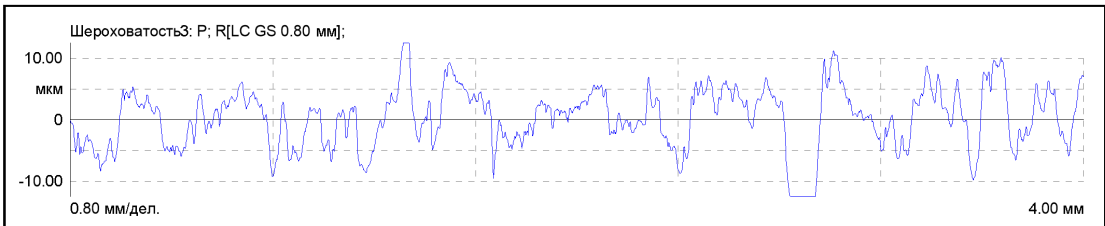
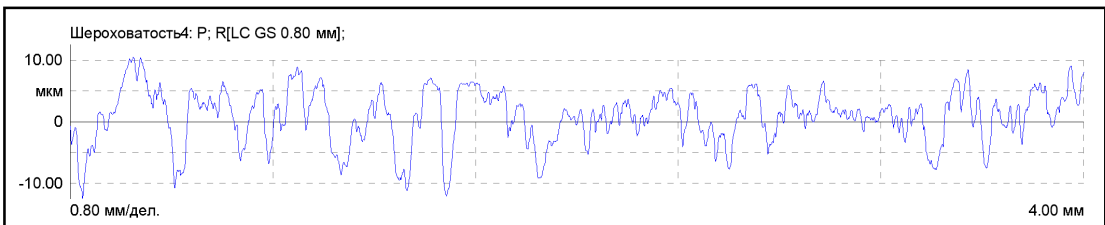


ДОДАТОК К

Результати обмірів шорсткості на координатно-вимірювальній машині

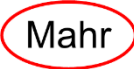
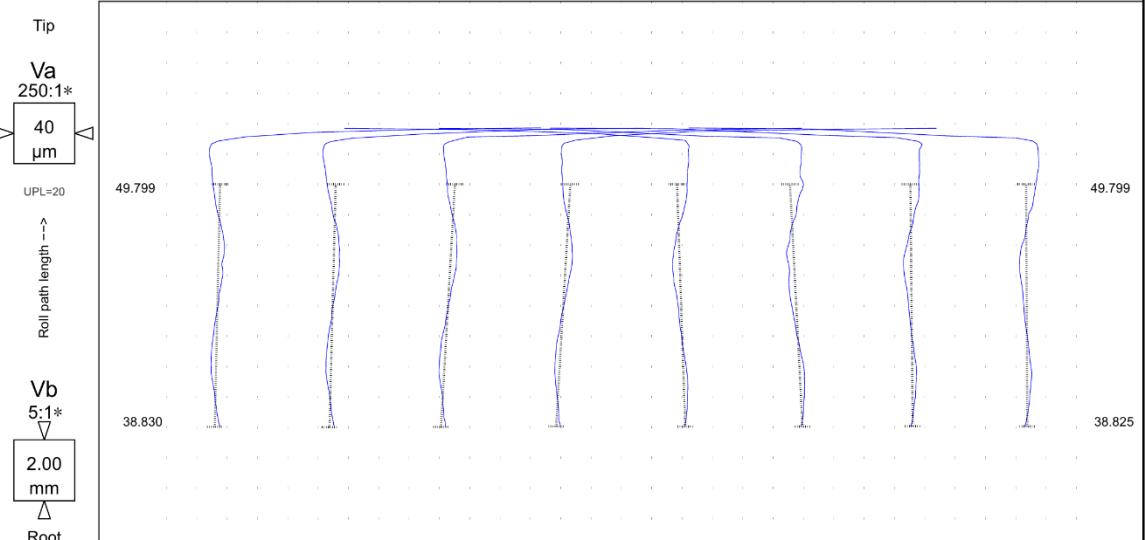
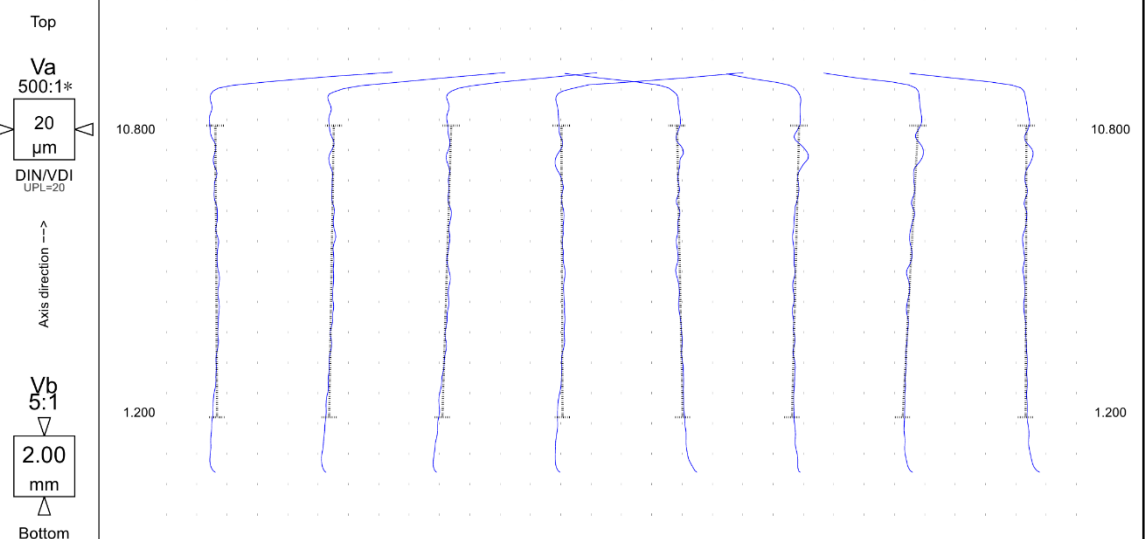
Mahr MarForm MMQ 400

		MarWin 5.00-06 SP 2	Частное АО "Гидросила АПМ"	19.11.2015 1 14:59:59 Контролер: Босенко Подпись:
Деталь:		Номер чертежа:		Цикл обработки:
GD25 Nr. 3269/12		Протокол №1377		
Комментарий: вдоль				
Измерительный прибор: MarTalk Устройство подачи: DriveUnit.GD 25 Адаптер: MFW-250:2 (#7188) -0.3 %			Lt: 5.60 мм Ls: 2.50 мкм VB: +/-250.0 мкм Vt: 0.50 мм/с Точки: 11200	
Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм]; 				
Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм]; 				
Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм]; 				
Шероховатость4: P; R[LC GS 0.80 мм]; 				
Параметры шероховатости- Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 0,8346 мкм 0,0000 0,0000				
Параметры шероховатости- Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 1,6542 мкм 0,0000 0,0000				
Параметры шероховатости- Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 1,8512 мкм 0,0000 0,0000				
Параметры шероховатости- Шероховатость4: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 1,0589 мкм 0,0000 0,0000				

	MarWin 5.00-06 SP 2	Частное АО "Гидросила АПМ"	19.11.2015 1 15:06:38 Контролер: Босенко Подпись:
	Деталь:	Номер чертежа:	Цикл обработки:
GD25 Nr. 3269/12		Протокол №1377	
Комментарий: поперек			
Измерительный прибор MarTalk Устройство подачи: DriveUnit.GD 25 Адаптер: MFW-250:2 (#7188) -0.3 %		Lt: 5.60 мм Ls: 2.50 мкм VB: +/-250.0 мкм Vt: 0.50 мм/с Точки: 11200	
Шероховатость1: P; R[LC GS 0.80 мм]; 			
Шероховатость2: P; R[LC GS 0.80 мм]; 			
Шероховатость3: P; R[LC GS 0.80 мм]; 			
Шероховатость4: P; R[LC GS 0.80 мм]; 			
Параметры шероховатости - Шероховатость 1: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 2,7420 мкм 0,0000 0,0000			
Параметры шероховатости - Шероховатость 2: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 5,0555 мкм 0,0000 0,0000			
Параметры шероховатости - Шероховатость 3: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 3,0803 мкм 0,0000 0,0000			
Параметры шероховатости - Шероховатость 4: P; R[LC GS 0.80 мм]; Ra 2,5385 мкм 0,0000 0,0000			

ДОДАТОК Л

Результати обмірів параметрів зубчастих коліс на координатно-вимірювальній машині MAHR GMX 275

	GMX 275 05.13_0.0	Reference Probe - -		01.02.16 15:38:44 Operator: Signature:	100						
Workpiece: -		Drawing No.: -		Operation: -							
-		-		-							
-		-		-							
Comments:											
Protokol # 044 Detal # 1											
No. of teeth	9	Base diameter	42.2861 mm	VDI/Tol.din3962							
Normal module	5.0000 mm	Normal Press. angle	20.0000 °	Qnom= 8	Qact= 8						
Face width	12.0000 mm	Helix angle	0.0000 °								
Probe stylus diameter	1.9989 mm	Addend. modif.	0.7740								
Profile variation											
+ <-- Left flank Right flank --> +											
Tip					Right flank --> +						
Va 250:1*					40 µm						
UPL=20					Roll path length						
Vb 5:1*					2.00 mm						
Root					Root						
[µm]	Tol.	10	7	4	1	1	4	7	10	Tol.	
Fa	20.0	8.9	8.9	11.9	11.6	10.2	11.8	10.1	10.8	20.0	
fHa	12.0/+12.0	-3.5	-4.1	-9.2	-9.4	-5.5	-8.3	-1.5	-0.8	12.0/+12.0	
ffa	16.0	8.7	9.5	9.0	9.1	11.3	13.6	10.6	11.1	16.0	
fHam= -6.5 Wobble= 5.9 Qnom= 8 Qact= 8						fHam= -4.0 Wobble= 7.5 Qnom= 8 Qact= 8					
Lead-tooth alignment variation											
+ <-- Left flank Right flank --> +											
Top					Right flank --> +						
Va 500:1*					20 µm						
DIN/VDI UPL=20					Axis direction						
Vb 5:1					2.00 mm						
Bottom					Bottom						
[µm]	Tol.	10	7	4	1	1	4	7	10	Tol.	
Fb	18.0	3.2	3.3	4.2	3.3	3.0	5.3	6.2	3.5	18.0	
fHb	16.0/+16.0	0.6	-1.5	-2.9	0.3	1.8	-2.3	-5.1	-0.3	16.0/+16.0	
ffb	9.0	2.9	2.7	2.6	3.2	3.3	4.9	3.5	3.4	9.0	
fHbm= -0.9 Wobble= 3.5 Qnom= 8 Qact= 4						fHbm= -1.5 Wobble= 6.9 Qnom= 8 Qact= 6					

ДОДАТОК М

**Методика графоаналітичного визначення налагоджувальних розмірів
інструментального блоку при диференційованому попередньому
прорізанні западин комплектом дискових фрез**

Для визначення положення чистових по дну западини фрез необхідно задатися:

- мінімальним значенням піднутрення по перехідній кривій zr_{min} , мм;
- радіусом заокруглення різальної кромки r_c , мм.

Утворення припуску чистовими по дну западини фрезами пояснюється на рис. М.1.

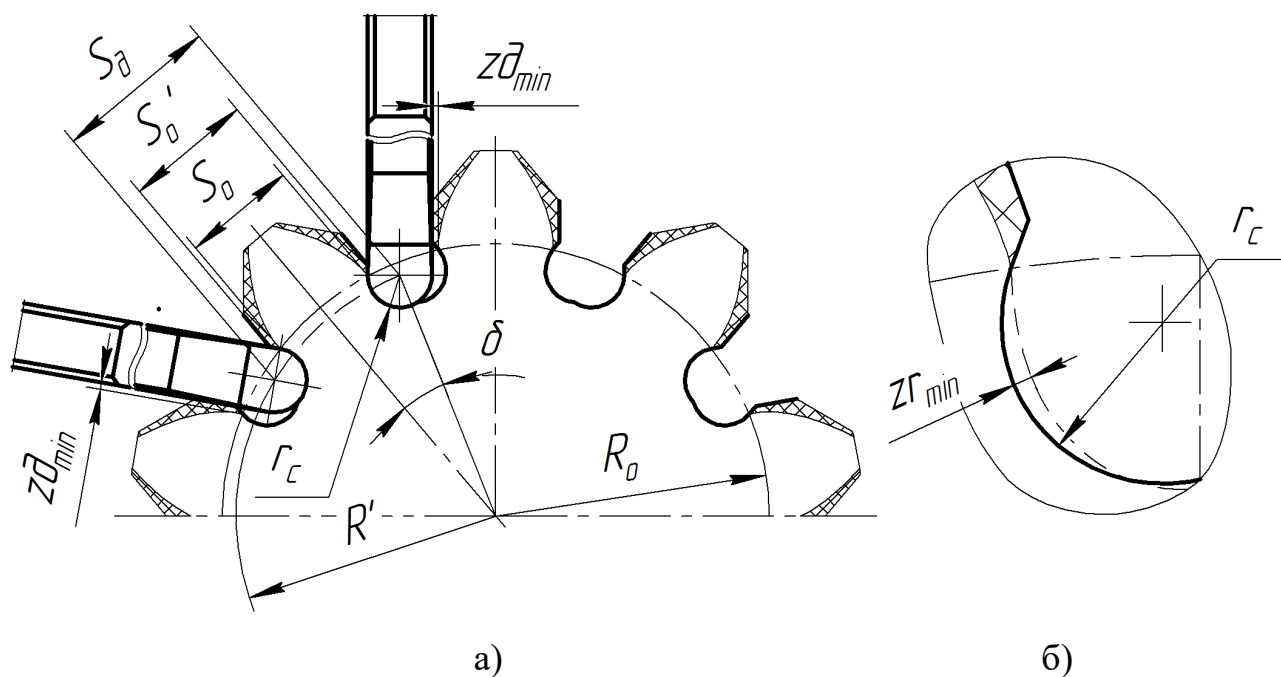


Рис. М.1 Утворення міжзубової западини

а) схема до визначення розмірів; б) утворення піднутрення;

S_d – відстань між центрами радіусів фрез; zr_{min} – мінімальне значення піднутрення; $z\delta_{min}$ – мінімальне значення припуску по товщині зубця на сторону; r_c – радіус заокруглення різальної кромки; R_o – радіус основного кола зубчастого колеса; R' – відстань між центрами радіусів фрез та геометричним центром деталі; S_o – товщина зубця колеса по дузі основного кола; S_o' – товщина зубця заготовки; δ – кут між віссю зубця та прямою, що з'єднує геометричну вісь зубчастого колеса та центр радіуса заокруглення різальної кромки фрези.

Значення розміру S_d буде рівне:

$$S_d = S_o + 2(r_c - zr_{min}), \quad (\text{М.1})$$

де S_o – товщина зубця по дузі основного кола, мм;

r_c – радіус заокруглення різальної кромки, мм;

zr_{min} – мінімальне значення піднутрення, мм.

Товщина зубця по дузі основної окружності розраховується по формулі:

$$S_o = 2R_o \cdot \left(\frac{S_n}{d_n} + inv\alpha_n \right), \quad (M.2)$$

де r_o – радіус основної окружності зубчастого колеса, мм;

S_n – товщина зубця по дузі початкової окружності, мм;

d_n – діаметр початкової окружності, мм;

$inv\alpha_n$ – евольвентна функція кута зачеплення.

Розрахунок складових формули наведено у джерелі [84].

Відстань між центрами радіусів фрез та геометричним центром деталі R' визначається по формулі:

$$R' = m(z - 2,5) + r_c, \quad (M.3)$$

де m – модуль зубчастого колеса, мм;

z – кількість зубців зубчастого колеса, шт.;

r_c – радіус заокруглення різальної кромки, мм.

Кут δ визначається з формули:

$$\delta = \frac{2\pi}{z} - \arcsin \frac{0,5 \cdot S_o'}{R'}. \quad (M.4)$$

Товщина зубця заготовки S_o' визначається з виразу:

$$S_o' = S_o + 2 \cdot z\delta_{min}, \quad (M.5)$$

де $z\delta_{min}$ – мінімальне значення припуску на головці зубця, мм.

Визначимо положення фрез які профілюють головку зубця. Для цього необхідно задатися наступними вхідними даними:

- мінімальним значенням припуску zr_{min} , мм;
- головним кутом в плані фрези φ , град.

Головний кут в плані φ вводиться з метою раціоналізації форми припуску та зручності контролю та вимірювання отриманої заготовки.

Утворення припуску підрізними фрезами показано на рис. М.2.

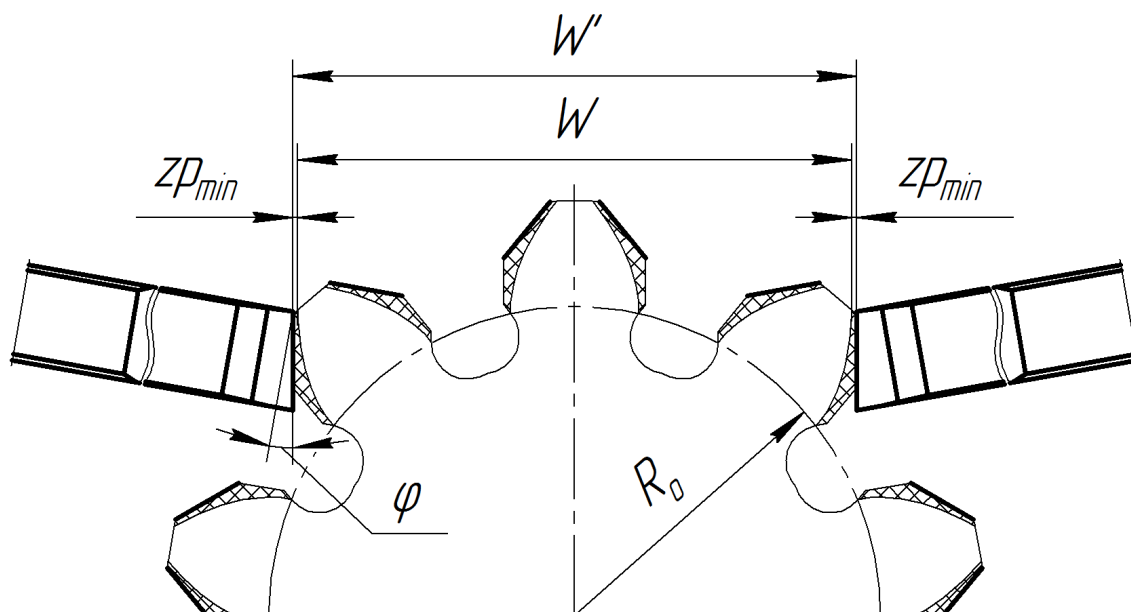


Рис. М.2 Утворення припуску профілюючими фрезами

W' – довжина загальної нормалі заготовки; $z p_{min}$ – мінімальне значення припуску на сторону зубця; φ – головний кут в плані; W – довжина загальної нормалі зубчастого колеса; R_o – радіус основного кола.

Як видно з рис. М.2, завдяки введенню головного кута в плані φ створені умови для визначення припуску аналогічно визначенню довжини загальної нормалі. Отже, загальне значення розміру W' буде рівне:

$$W' = W + 2 \cdot z p_{min}, \quad (\text{М.6})$$

де W – довжина загальної нормалі зубчастого колеса, виміряна по трьом зубцям, мм;

$z p_{min}$ – мінімальне значення припуску на сторону зубця, мм.

Формула розрахунку довжини загальної нормалі по трьом зубцям наведена у джерелі [84].

ДОДАТОК Н

Методика графоаналітичного визначення налагоджувальних розмірів інструментального блоку при диференційованому попередньому прорізанні западин комбінованим комплектом фрез

Методика визначення розмірів припуску чистовими по дну западини фрезами пояснюється у додатку М.

До налагоджувальних параметрів при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні слід віднести:

- відстань A між віссю фрези та заготовки;
- відстань B між віссю заготовки та початковою точкою формуючої різальної кромки фрези;
- налагодження черв'ячно-контурної фрези по попередньо обробленій западині.

Утворення припуску пояснюється схемою рис. Н.1.

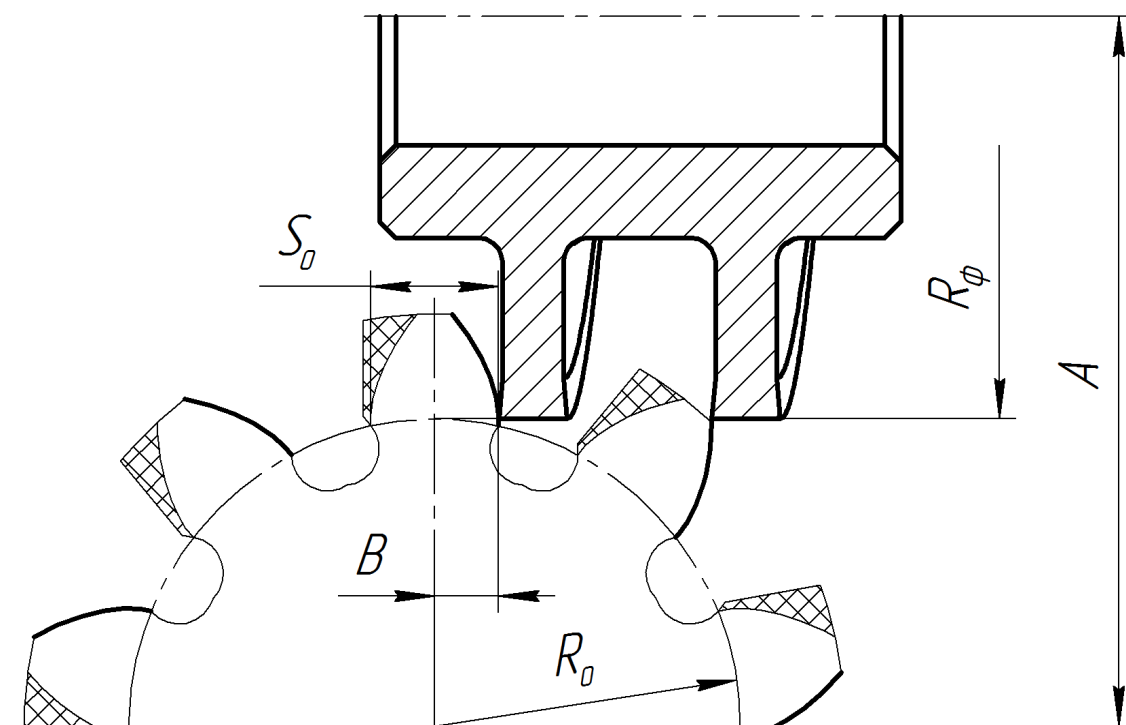


Рис. Н.1 Утворення припуску черв'ячно-контурною фрезою

R_o – радіус основного кола; S_o – товщина зубця по дузі основного кола;
 R_ϕ – радіус фрези; A – відстань між віссю фрези та заготовки; B – відстань між віссю заготовки та початковою точкою формуючої різальної кромки фрези.

Виходячи зі схеми рис. Н.1, міжвісева відстань буде рівна:

$$A = R_{\phi} + R_o, \quad (\text{Н.1})$$

де R_{ϕ} – радіус фрези, мм;

R_o – радіус основного кола, мм.

Відстань між віссю заготовки та початковою точкою формоутворюючої різальної кромки фрези B розраховується по формулі:

$$B = \frac{S_o}{2} + zw_{min}, \quad (\text{Н.1})$$

де S_o – товщина зубця по дузі основного кола, мм;

zw_{min} – мінімальне значення припуску на сторону зубця по довжині загальної нормалі, мм.

Методика налагодження черв'ячно-контурної фрези по попередньо обробленій западині наведена у додатку А.

ДОДАТОК П

Патент України на корисну модель №102901





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **102901** (13) **U**

(51) МПК

B23F 21/16 (2006.01)**B24B 5/36** (2006.01)

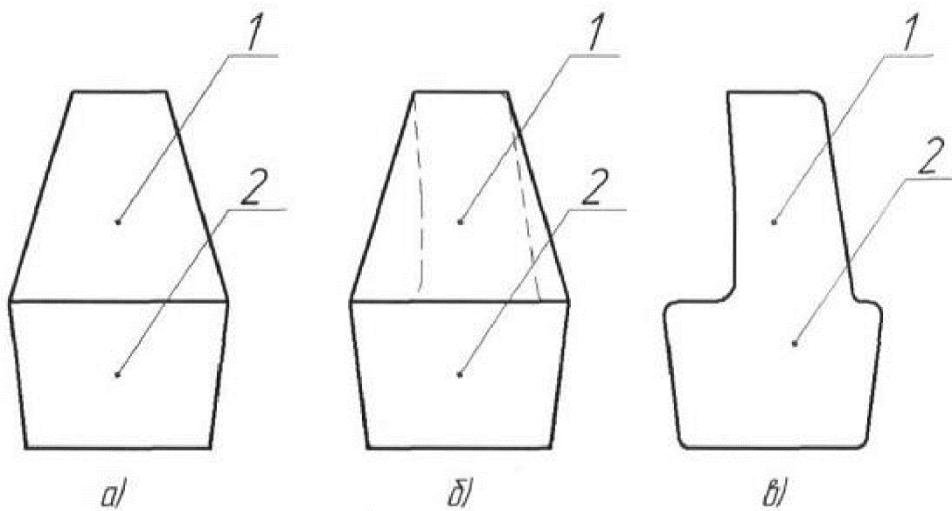
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2015 04926	(72) Винахідник(и): Підгаєцький Михайло Матвійович (UA), Апаракін Антон Русланович (UA)
(22) Дата подання заявки: 20.05.2015	(73) Власник(и): КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, пр. Університетський, 8, м. Кіровоград, 25006 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 25.11.2015	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 25.11.2015, Бюл.№ 22	

(54) ЗБІРНА ЧИСТОВА ЧЕРВ'ЯЧНА ФРЕЗА**(57) Реферат:**

Збірна черв'ячна фреза для чистової обробки евольвентних профілів зубчастих коліс складається із корпусу та ріжучого елемента. Ріжучий елемент виконаний як гвинтове тіло з кроком, рівним кроку зубчастого колеса, з поперечним перерізом, наближеним до двох з'єднаних трапецій, що входять у контакт своїми більшими основами. При цьому перша формує частину гвинтового тіла з комплектом ріжучих зубців і стружкових канавок між ними, а друга формує частину гвинтового тіла з базовою поверхнею.



Фиг. 1

UA 102901 U

Корисна модель належить до галузі машинобудування, до обробки металів різанням, точніше, до збірних конструкцій черв'ячних фрез, і може бути застосована для чистової обробки зубофрезеруванням зубців зубчастих коліс в умовах обкату.

У загальному випадку відсутній чітко виділений клас черв'ячних чистових фрез. Існуючі черв'ячні фрези для попередньої або чистової обробки конструктивно не відрізняються від виконання стандартних черв'ячних фрез загального призначення.

Відомі збірні конструкції черв'ячних фрез. Конструкції являють собою корпус та змінні елементи, наприклад вставні ножі (рейки), зубці, пластини [1].

Відомі конструкції складених черв'ячних фрез мають ряд недоліків, в тому числі:

- складність виготовлення внаслідок необхідності дотримання високої точності елементів;
- збільшені габаритні розміри внаслідок необхідності розміщення елементів кріплення ріжучих елементів;

- можливість послаблення кріплення ріжучих ножів, внаслідок недостатньої жорсткості кріплення, в процесі різання.

В основу корисної моделі покладено розширення технологічних можливостей, зниження собівартості черв'ячної фрези для чистової обробки.

Поставлена задача вирішується шляхом запропонованої черв'ячної фрези, у спіральному пазу корпусу якої встановлюється ріжучий елемент.

Фреза призначена для чистового нарізання зубців. Ріжучий елемент виконаний у вигляді гвинтового тіла, а в корпусі виконаний базовий гвинтовий паз для його розміщення.

Особливості запропонованої конструкції збірної черв'ячної фрези пояснюються графічними зображеннями.

На фіг. 1 зображено поперечний переріз ріжучого елемента 3 фрези, який по формі наближений до двох з'єднаних трапецій, що входять в контакт своїми більшими основами, при цьому перша трапеція 1 формує частину гвинтового тіла з комплектом ріжучих зубців і стружкових канавок між ними, а друга трапеція 2 формує частину гвинтового тіла з базовою поверхнею. З огляду на технологічні та функційні чинники, кінцева форма ріжучого елемента 3 має конструктивні відмінності від оговорених трапецій.

На фіг. 2 зображено конструктивне виконання ріжучого елемента 3. Фреза працює єдиною ріжучою кромкою, яка є продовженням радіусів кривизни евольвенти і розміщена на гвинтовій лінії з кроком, який визначається за формулою:

$$P = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha,$$

де: m - модуль нарізаного колеса;

α - кут вихідного профілю.

Довжина ріжучої кромки визначається з можливості розміщення її в крайній точці западини зуба і визначається відношенням:

$$B \approx 0,85 m.$$

Зовнішній діаметр фрези приблизно дорівнює діаметру черв'ячної фрези для аналогічного модуля:

$$D = D_{\text{черв.}}$$

Кількість зубів фрези приймається, виходячи з можливості їх розміщення на гвинтовій лінії і зручності заточування.

Геометрія ріжучої частини:

- допоміжний кут в плані $\phi_1 = 2 \dots 5^\circ$;

- головний передній кут $\gamma = 5^\circ$;

- головний задній кут $\alpha = 10^\circ$.

Довжина гвинтової лінії: $\approx 1,5$ оберта.

На фіг. 3 зображено корпус 4 фрези, в якому виконаний базовий гвинтовий паз 5 з перерізом трапецеїдальної форми, що повторює переріз базової частини 2 ріжучого елемента 3, для розміщення останнього в ньому і закріплення, наприклад, методом склеювання. Склеювання ріжучого елемента та корпусу фрези знизить вимоги до точності їх виготовлення, а також знизить ймовірність виникнення тріщин. На відміну від механічного кріплення, клейове з'єднання має високу жорсткість, що позитивно відобразиться на стійкості інструмента.

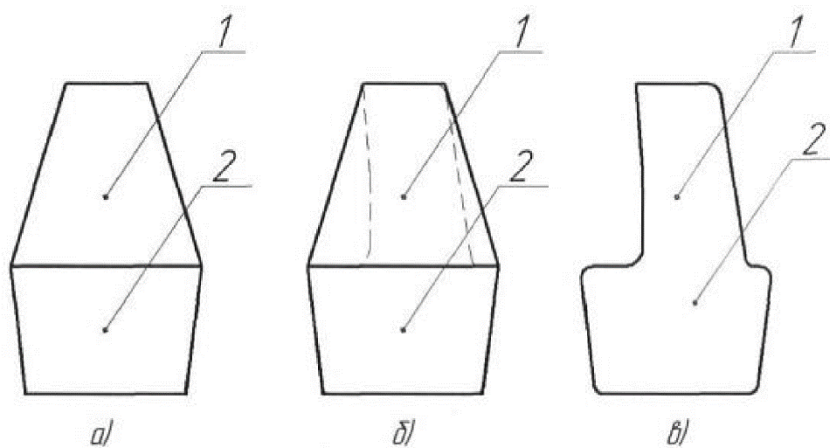
На фіг. 4 зображено тривимірну модель черв'ячної фрези в зборі.

Список використаної літератури:

1. Еланова Т.О. Прогрессивная технология зубообработки: Аналит. Обзор. - М.: ВНИИТЭМР, 1990 г. - 48 стр.

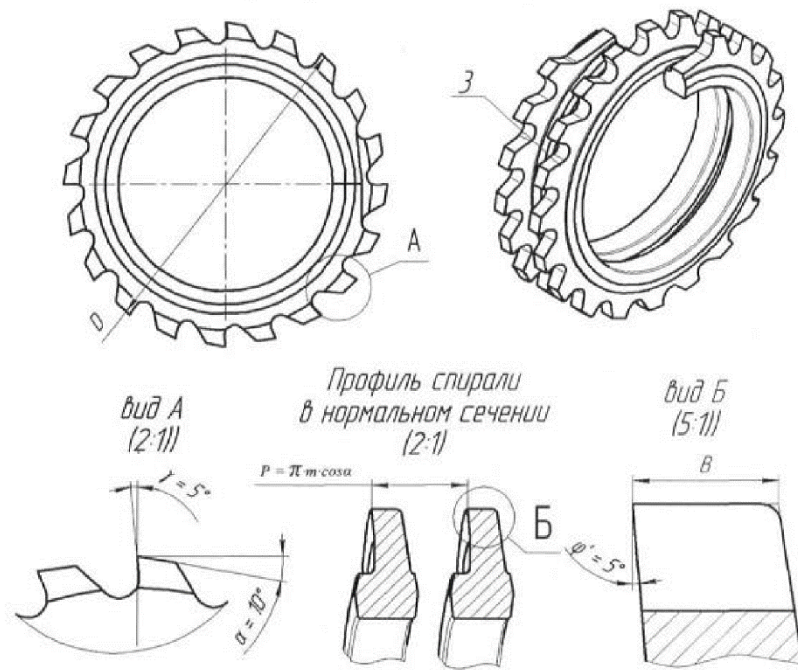
ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 5 1. Збірна черв'ячна фреза для чистової обробки евольвентних профілів зубчастих коліс, що складається із корпусу та ріжучого елемента, яка **відрізняється** тим, що ріжучий елемент виконаний як гвинтове тіло з кроком, рівним кроку зубчастого колеса, з поперечним перерізом, наближеним до двох з'єднаних трапецій, що входять у контакт своїми більшими основами, при цьому перша формує частину гвинтового тіла з комплектом ріжучих зубців і стружкових канавок між ними, а друга формує частину гвинтового тіла з базовою поверхнею.
- 10 2. Збірна черв'ячна фреза за п. 1, яка **відрізняється** тим, що в корпусі виконаний базовий гвинтовий паз з перерізом трапецеїдальної форми, що повторює переріз базової частини ріжучого елемента, для розміщення останнього в ньому і закріплення, наприклад, методом склеювання.

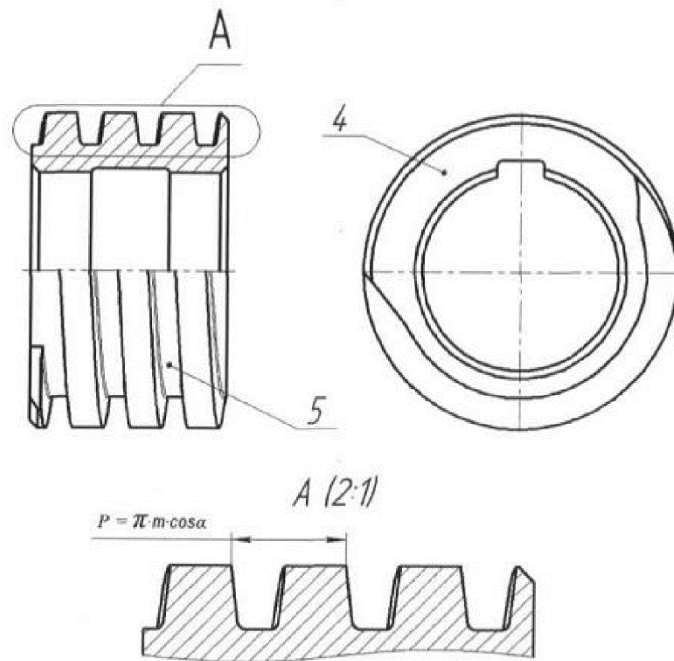


Фіг. 1

UA 102901 U

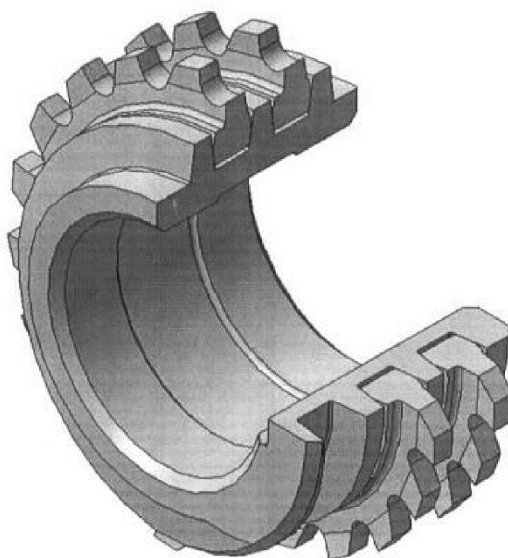


Фиг. 2



Фиг. 3

UA 102901 U



Фіг. 4

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 Р

Акт впровадження окремих результатів дисертаційної роботи

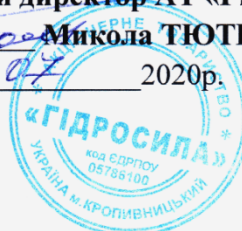
ЗАТВЕРЖУЮ

Технічний директор АТ «Гідросила»

Микола ТЮТЮШКІН

« 8 » 07 2020р.

АКТ



апробації та впровадження результатів дослідження при виготовленні дослідних зразків

На АТ «Гідросила» передано, з метою подальшого впровадження у виробництво, окремі матеріали дисертаційної роботи Апаракіна А.Р., асистента кафедри «Металорізальні верстати та системи» Центральноукраїнського національного технічного університету під назвою «Підвищення ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс за рахунок зміни схеми різання», зокрема:

1) методику визначення налагоджувальних розмірів блоку інструментів для виконання попереднього прорізання западин шестерень, з метою утворення припуску під чистове зубофрезерування;

2) конструкцію збірної черв'ячної фрези (пат. України № 102901), яка знижує використання інструментального матеріалу та собівартість інструменту;

3) проект технології черв'ячно-контурного зубофрезерування (пат. України № 110741), яка має перспективи у виробництві шестерень гідравлічних машин середніх та крупних модулів, особливо тих, що працюють в режимі реверсивних гідромоторів і повинні мати однакову геометричну форму різнойменних профілів.

Апробація технології по п. 3 здійснювалась на зубофрезерному верстаті моделі 53Д30П інв. № 05459, з використанням черв'ячно-контурної фрези 2510-6102. Оброблювався комплект деталей $m=5$ $z=9$, з матеріалу сталь 18ХГТ ГОСТ 4543-71, твердістю НВ 190...220. Вимірювання здійснювалось на КВМ Mahr GMX 275.

Аналіз наведених матеріалів інженерно-технічними працівниками підприємства дозволяє зроби висновок про можливість використання матеріалів дисертації на підприємстві та при розробці технічного завдання для проекту верстата і технології обробки шестерень гідравлічних насосів і моторів середніх та крупних модулів в умовах гнучкого або серійного виробництва.

Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії:
Головний технолог

Віктор ГОДРОЖА

Члени комісії:
Головний механік

Сергій БРАТУХІН

Науковий консультант
з інженерної механіки СГТ

Кирил ЩЕРБИНА

Handwritten signatures and dates:
 07.07.2020
 8.07.2020

ДОДАТОК С

Список робіт, опублікованих за темою дисертації

Наукові роботи, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Підгаєцький М. М. Підвищення точності зубообробки шляхом розділення поверхонь, що взаємодіють з інструментом в процесі різання / М. М. Підгаєцький, А. М. Кириченко, А. Р. Апаракін // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. – Кіровоград: КНТУ, 2014. – Вип. 27. – с. 13-19.

2. Підгаєцький М. М. Порівняльний аналіз кінематики процесу при традиційному та черв'ячно-контурному чистовому зубофрезеруванні шестерень, що використовуються у сільськогосподарській техніці / М. М. Підгаєцький, А. М. Кириченко, А. Р. Апаракін // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин". – Кіровоград: КНТУ, 2014. – Вип. 44. – с. 149-153.

3. Підгаєцький М.М. Динамічний та кінематичний синтез системи черв'ячно-контурного зубофрезерування / М. М. Підгаєцький, А. Р. Апаракін // Журнал "Науковий вісник НГУ". Серія: Геотехнічна і гірнича механіка, машинобудування. – Дніпро: НГУ, 2017. – №3 с. 54-62 (*SciVerse Scopus, Index Copernicus, Ulrich's Web, Research Bib, EBSCO, категорія «А» Переліку наукових фахових видань України, квартиль Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank*).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

4. Підгаєцький М.М. Підвищення точності зубообробки, шляхом розділення поверхонь, що взаємодіють з інструментом в процесі різання / М.М. Підгаєцький, А.М. Кириченко, А.Р. Апаракін // Матеріали III міжнародної

науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій". – 2014. – с. 129-130.

5. Апаракін А.Р. Передумови створення методу диференційованого попереднього прорізання западин зубчастих коліс / Апаракін А.Р., Підгаєцький М.М. // Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем". – Том 1. – 2017. – с. 104-105.

6. Підгаєцький М.М. Синтез концептуальної схеми зубообробного центру для обробки шестерень в умовах гнучкої технології на базі черв'ячно-контурного зубофрезерування / М.М. Підгаєцький, А.Р. Апаракін // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції "Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво". – 2017. – с.144-146.

7. Апаракін А.Р. Порівняння процесів стружкоутворення черв'ячного та черв'ячно-контурного зубофрезерування за допомогою комп'ютерної моделі кінематики / Апаракін А.Р., Підгаєцький М.М. // Матеріали X міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем". – Том 1. – 2020. – с. 123-125.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

8. Пат. 84471 Україна, МПК В23F 19/00. Спосіб лезової обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс після попереднього прорізання впадин. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2013 04277; заявл. 05.04.2013; опубл. 25.10.2013. Бюл. №20.

9. Пат. 102901 Україна, МПК В23F 21/16, В24В 5/36. Збірна чистова черв'ячна фреза. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2015 04926; заявл. 20.05.2015; опубл. 25.11.2015. Бюл. №22.

10. Пат. 110741 Україна, МПК В23F 21/14, В23F 21/16, В23F 5/22. Спосіб фрезерування зубців циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2014 07893; заявл. 14.07.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. №3.

11. Пат. 140800 Україна, МПК В23F 21/00, В24F 21/16. Черв'ячно-контурна фреза зі змінними ріжучими пластинами. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р.; заявник і патентотримач Центральноукраїнський національний технічний університет. Заявка № u 2019 08898; заявл. 23.07.2019; опубл. 10.03.2020. Бюл. №5.