

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри ММіР

к.т.н., доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

«_____» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Покращення якості обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс за рахунок використання методу черв’ячного- контурного зубофрезерування»

Виконав здобувач вищої освіти 2-го
року магістратури групи ГМ-23М-З
ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Максим ГОРПИНЧЕНКО

Керівник роботи к.т.н., ст. викладач

_____ Антон АПАРАКІН

Рецензент: к.т.н., доцент

_____ Руслан ОСІН

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-наукова програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА

Горпинченка Максима Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Покращення якості обробки евольвентних поверхонь
циліндричних зубчастих коліс за рахунок використання методу черв'ячного-
контурного зубофрезерування

2. Керівник роботи: _____ к.т.н., ст. викл., Антон АПАРАКІН

3. Строк подання роботи до захисту _____ « ____ » _____ 2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: покращення якості обробки евольвентних поверхонь
циліндричних зубчастих коліс середніх модулів 4...12 мм.

Завдання:

- визначити шляхи зниження впливу похибок традиційного черв'ячного зубофрезерування, шляхом зміни схеми формоутворення евольвентного профілю та взаємодії РК інструменту та ОП;
- дослідити вплив зміни схеми різання на точність і якість евольвентної ОП, розробити методику та провести аналіз в умовах моделювання;
- розробити варіант реалізації методу черв'ячного зубофрезерування, заснованого на альтернативній схемі взаємодії РК інструменту та ОП;
- дослідити та порівняти в умовах експерименту досягну точність та якість ОП, отриманих традиційною та альтернативною схемами взаємодії РК інструменту та ОП.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Антон АПАРАКІН		
РОЗДІЛ 2	Антон АПАРАКІН		
РОЗДІЛ 3	Антон АПАРАКІН		
РОЗДІЛ 4	Антон АПАРАКІН		
РОЗДІЛ 5	Ірина ЖУРИЛО		
ДОДАТКИ	Антон АПАРАКІН		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1	ВСТУП	Березень 2025	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Березень 2025	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Березень-Квітень 2025	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Квітень 2025	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Квітень-Травень 2025	вик.
6	РОЗДІЛ 5	Травень 2025	вик.
7	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Травень 2025	вик.
8	ДОДАТКИ	Травень 2025	вик.
	Графічна частина та оформлення	Травень 2025	вик.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2025 р.

Керівник роботи _____ Антон АПАРАКІН
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2025 р.

Здобувач _____ Максим ГОРПИНЧЕНКО
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Максим ГОРПИНЧЕНКО. Покращення якості обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс за рахунок використання методу черв'ячного-контурного зубофрезерування. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2025. – 83 с. Матеріали презентації 14 аркушів.

Метою роботи є покращення якості обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс середніх модулів 4...12 мм шляхом нейтралізації недоліків схеми різання традиційного черв'ячного зубофрезерування.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано технологічні засади сучасного стану методу черв'ячного зубофрезерування, верстатних та інструментальних засобів для його реалізації. Виділено основні недоліки методу та розроблено завдання дослідження. По описаним методикам проведено теоретичні та експериментальні дослідження процесу різання при черв'ячному зубофрезеруванні. Запропоновано метод, позбавлений недоліків традиційної технології. Проведено необхідні економічні розрахунки.

Актуальність. За останні роки значно збільшились вимоги до точності та якості обробки зубчастих коліс, що може бути досягнуто за рахунок підвищення точності зубообробного інструменту або вдосконаленням технології виготовлення зубчастих коліс з використанням інструменту нових конструкцій. Дослідження у роботі проводяться саме за останнім напрямком, отже кваліфікаційна робота є актуальною і відповідає тенденціям та реаліям сучасного виробництва.

Наукова новизна. Вдосконалено метод моделювання процесів формоутворення, що дозволяє досліджувати різні схеми взаємодії різальної кромки із поверхнями різання при обробці евольвентних профілів методами черв'ячного зубофрезерування.

Практичне значення. Запропонований метод черв'ячного-контурного зубофрезерування рекомендований до застосування при обробці шестерень до шестеренних насосів та моторів що працюють у реверсивному режимі, тому особливо чутливі до похибок евольвентного профілю протилежних зубців.

Ключові слова: черв'ячне зубофрезерування, евольвента, шестерня, фреза, формоутворення.

ABSTRACT

Maksym GORPYNCHENKO. Improving the quality of machining of involute surfaces of cylindrical gears by using the worm-contour gear milling method. Master's thesis: CUNTU, 2025. – 83 p. Presentation materials 14 drawings.

The purpose of the work is to improve the quality of machining of involute surfaces of cylindrical gears of medium modules 4...12 mm by neutralizing the disadvantages of the cutting scheme of conventional gear hobbing.

The qualification work analyzes the technological principles of the current state of the gear hobbing method, machines and tools for its implementation. The main disadvantages of the method are highlighted and the research tasks are developed. Theoretical and experimental studies of the cutting process during gear hobbing are carried out using the described methods. A method without the disadvantages of conventional technology is proposed. The necessary economic calculations are carried out.

Relevance. In recent years, the requirements for the accuracy and quality of gear processing have significantly increased, which can be achieved by increasing the accuracy of gear tools or improving the technology for manufacturing gears using tools of new designs. Research in the work is carried out in the latter direction, therefore, the qualification work is relevant and corresponds to the trends and realities of modern production.

Scientific novelty. The method of modeling the processes of shaping has been improved to allow studying various schemes of interaction of the cutting edge with cutting surfaces when processing involute profiles using gear hobbing methods.

Practical value. The proposed method of contour gear hobbing is recommended for use in processing gears for gear pumps and motors operating in reverse mode, therefore they are especially sensitive to errors in the involute profile of opposite teeth.

Key words: gear hobbing, involute, spur, milling cutter, shaping.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ	11
1.1 Аналіз технології нарізання зубців методом черв'ячного зубофрезерування	11
1.2 Аналіз налагоджуваних, вхідних та вихідних параметрів методу черв'ячного зубофрезерування	21
1.3 Висновки, мета і задачі дослідження	28
РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ	29
2.1 Програма досліджень	29
2.2 Методика дослідження шляхів зменшення поверхневих напружень та спотворень геометричної форми обробленої поверхні	29
2.3 Методика дослідження силового портрету на приводі шпинделя заготовки верстата під час зубофрезерування	32
2.4 Методика моделювання процесів різання при черв'ячному зубофрезеруванні	34
2.5 Методика експериментальних досліджень процесів різання	37
2.6 Висновки та рекомендації по розділу	39
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ	40
3.1 Допустимі варіанти системи взаємодії різальної кромки і оброблюваного евольвентного профілю	40
3.2 Аналіз шляхів зменшення поверхневих напружень та спотворень геометричної форми обробленої поверхні	47
3.3 Аналіз силового портрету на приводі шпинделя заготовки верстата під час зубофрезерування та можливостей зниження похибок	49
3.4 Моделювання процесів різання при черв'ячному зубофрезеруванні	50

3.5	Реалізація методу черв'ячно-контурного зубофрезерування, заснованого на контурній системі взаємодії різальної кромки та оброблюваної поверхні	53
3.6	Висновки та рекомендації по розділу	58
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ		60
4.1	Результати експериментальних досліджень процесів різання	60
4.2	Висновки та рекомендації по розділу	62
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ЧЕРВ'ЯЧНО-КОНТУРНОЇ ФРЕЗИ		63
5.1	Загальні вихідні дані	63
5.2	Визначення витрат на підготовку виробництва	64
5.3	Визначення собівартості та оптової ціни інструменту	65
5.4	Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)	68
5.5	Розрахунок показників економічної ефективності	72
5.6	Висновки	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ		76
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		77
ДОДАТКИ		81

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ ТА СКОРОЧЕНЬ

ГРК - головна різальна кромка;

ДПР - дотична поверхня різання;

НПР - нормальна поверхня різання;

ОП - оброблювана поверхня;

ПР - поверхня різання;

РК - різальна кромка.

ВСТУП

Актуальність роботи. За останні роки значно збільшилися вимоги до точності та якості обробки зубчастих коліс, що висуває особливі вимоги до конструкції, технології виготовлення та експлуатації зубообробного інструменту та обладнання.

Проведений аналіз вітчизняних та зарубіжних публікацій по темі кваліфікаційної роботи дає уявлення про сучасний стан індустрії зубообробки. Провідні підприємства-виробники різального інструменту у співпраці з науковими установами проводять інтенсивні роботи по вдосконаленню зуборізного інструменту (зокрема, створення твердосплавних черв'ячних фрез збірних конструкцій та вдосконаленню схем різання), обладнання, методів обробки. Впровадження результатів таких робіт значно підвищує конкурентоспроможність зубообробного інструменту.

Загалом, підвищення ефективності зубообробки за рахунок різального інструмента йде за наступними напрямками:

- збільшення швидкості різання і подачі;
- вдосконалення геометрії різальної частини інструмента;
- розробка нових видів інструменту, зокрема для нових методів зубообробки;
- більш повне використання різальних властивостей інструменту.

Підвищення точності та якості обробки може бути досягнуто за рахунок підвищення точності виготовлення зубообробного інструменту або вдосконаленням технології виготовлення зубчастих коліс з використанням інструменту нових конструкцій. Дослідження у роботі проводяться саме за останнім напрямком. Таким чином робота є актуальною і відповідає тенденціям та реаліям сучасного виробництва.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є покращення якості обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс середніх модулів 4...12 мм.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Визначити шляхи зниження впливу похибок традиційного черв'ячного зубофрезерування, шляхом зміни схеми формоутворення евольвентного профілю та взаємодії РК інструменту та ОП.

2. Дослідити вплив зміни схеми різання на точність і якість евольвентної ОП, розробити методiku та провести аналіз в умовах моделювання.

3. Розробити варіант реалізації методу черв'ячного зубофрезерування, заснованого на альтернативній схемі взаємодії РК інструменту та ОП.

4. Дослідити та порівняти в умовах експерименту досягну точність та якість ОП, що отримані традиційною та альтернативною схемами взаємодії РК інструменту та ОП.

Об'єкт дослідження – фрези черв'ячні модульні.

Предмет дослідження – процес різання та формоутворення, а саме вплив показників та параметрів процесу на якість та точність ОП.

Наукова новизна. Вдосконалено метод моделювання процесів формоутворення, що дозволяє досліджувати різні схеми взаємодії різальної кромки із поверхнями різання при обробці евольвентних профілів методами черв'ячного зубофрезерування.

Практичне значення. Запропонований метод черв'ячного-контурного зубофрезерування рекомендований до застосування при обробці шестерень до шестеренних насосів та моторів що працюють у реверсивному режимі, тому особливо чутливі до похибок евольвентного профілю протилежних зубців.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

1.1 Аналіз технології нарізання зубців методом черв'ячного зубофрезерування

1.1.1 Основні поняття про зубчасту передачу

Евольвентна циліндрична зубчата поверхня (рис. 1.1) відповідно до ISO 53:1998 визначена низкою геометричних параметрів, зокрема:

- модулем, m ;
- числом зубців, z ;
- параметрами вихідного контуру (кут профілю, α);
- коефіцієнтом зміщення вихідного контуру x .

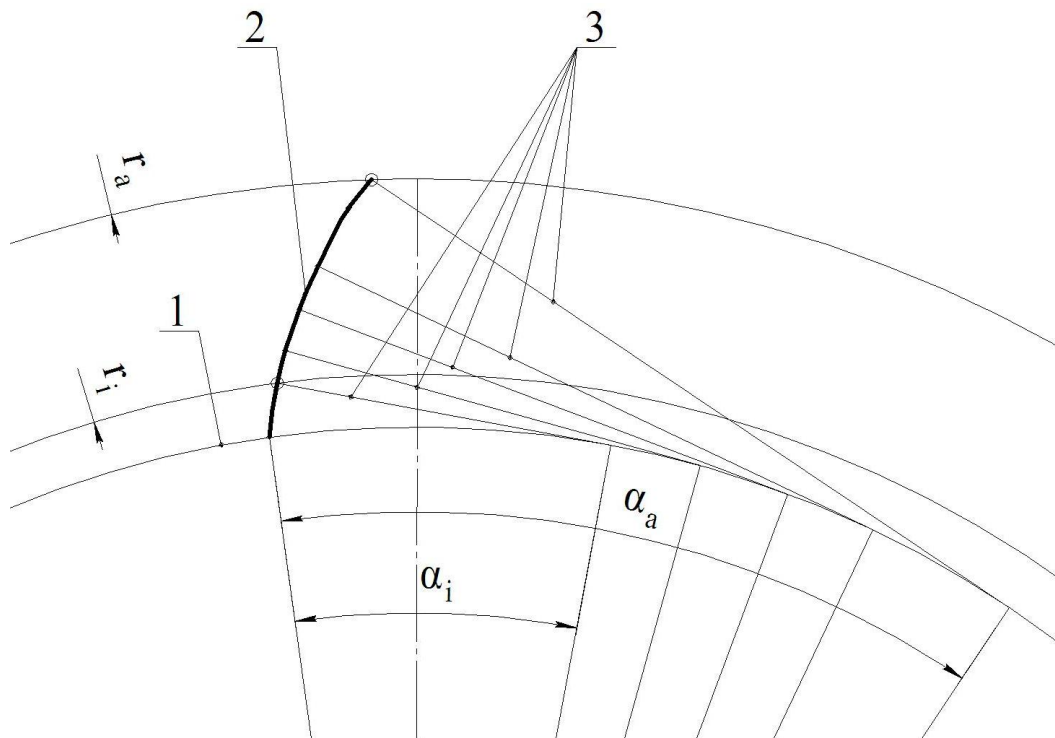


Рис. 1.1 Схема утворення евольвентного профілю

1 – основна окружність; 2 – евольвента; 3 – радіуси кривизни; α_a – кут розгорнутості евольвенти на вершині зубця; α_i – кут розвернутості евольвенти в точці початку активної частини профілю.

На підставі зазначених параметрів розраховуються виконавчі розміри зубчастого колеса (рис.1.2).

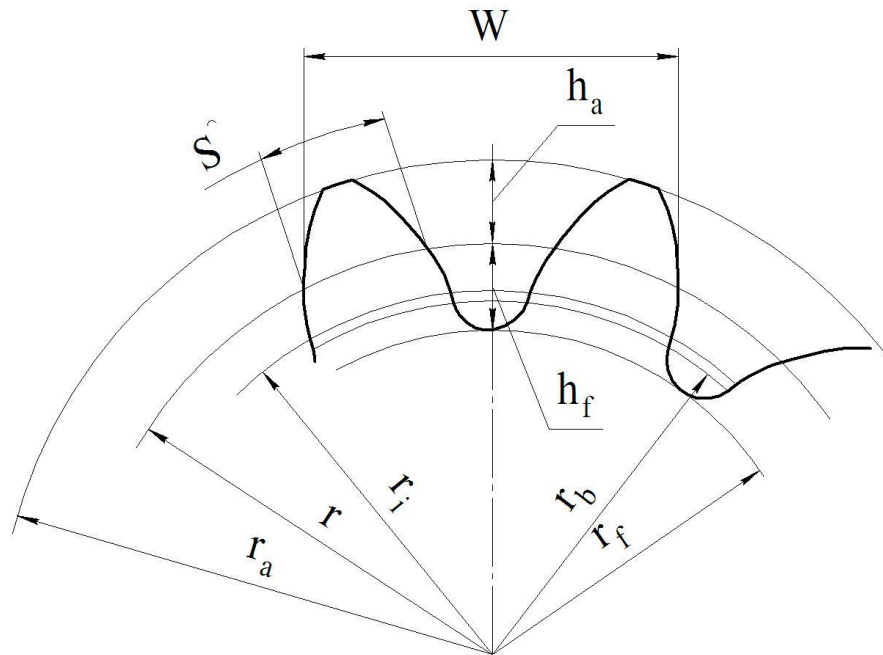


Рис. 1.2 Схема виконавчих розмірів зубчатої поверхні

r_f – окружність впадин; r_a – окружність виступів; r – початкова (ділильна) окружність;
 r_b – основна окружність; r_i – окружність початку активної частини;
 W - довжина загальної нормалі; S – товщина зубця; h_a – висота вершини (головки) зубця;
 h_f – висота основи (ніжки) зубця.

Обробка поверхні побудована на принципах повторення функціонування її в кінематичній парі, однієї з ланок якої є безпосередньо сама поверхня, а другою ланкою - формоутворюючий інструмент.

Процес черв'ячного формоутворення евольвентного профілю деталі повторює роботу кінематичної пари у вигляді черв'ячної передачі. При цьому інструмент являє собою кінематичну ланку - черв'як, а деталь кінематичну ланку - черв'ячне колесо.

Евольвентний профіль утворюється рядом послідовних положень сімейства бічних різальних кромок що розташовані на гвинтовій поверхні, та обертаються навколо власної геометричної вісі цієї поверхні. Кінематично пов'язана з інструментом деталь здійснює також обертання навколо власної геометричної вісі з передавальним відношенням:

$$i_x = \frac{k}{z},$$

де: z - число зубців деталі, шт.;

k - число заходів гвинтової лінії фрези.

1.1.2 Аналіз конструкції черв'ячної фрези

Черв'ячна фреза має форму циліндричного тіла із вісевим отвором (рис. 1.3), по зовнішньому циліндру розташовані зубці, які утворюють гвинтову поверхню. У перерізі зубці утворені прорізами у вигляді трапеції – стружковими канавками.

Для здійснення процесу різання, по різальним кромкам кожного зубця фрези утворено задні кути шляхом затилування двох бічних та вершинної різальної кромки. Обумовлені задні кути мають значення:

- на бічних різальних кромках: $\sim 2^\circ \dots 4^\circ$;
- на вершинній різальній кромці: $\sim 10^\circ \dots 12^\circ$.

Фрези виготовляються з швидкорізальної сталі Р6М5, Р6М5К5.

Під час роботи, як і будь які різальні інструменти, черв'ячні фрези зазнають зносу. Переточування та відновлення різальних властивостей черв'ячних фрез виконують по переднім поверхням, із наступним контролем виконаної операції по наступним показникам [37]:

- прямолінійність передньої грані в радіальному напрямку;
- похибка радіального кроку зубців (по гвинтовій поверхні);
- похибка окружного кроку зубців (по колу, за оберт).

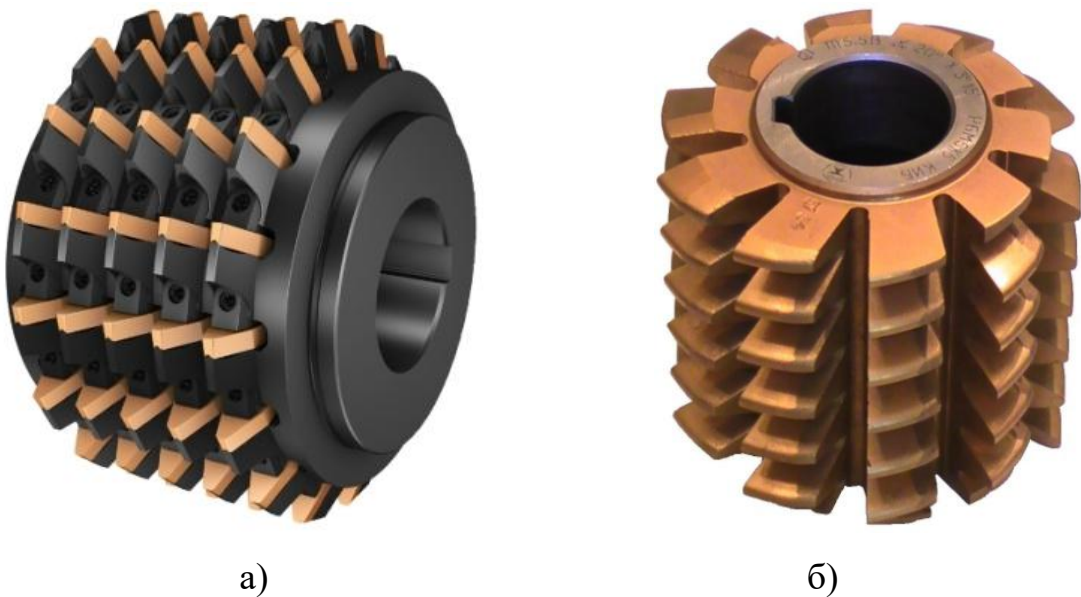


Рис. 1.3 Черв'ячна модульна фреза

а – збірна, з твердосплавними пластинами [33];
 б – суцільна фреза зі швидкорізальної сталі [20].

Черв'ячні фрези поділяються за класами точності, а стандартами [18] та [32, 36, 39] регламентуються їх конструктивні параметри (рис. 1.4), геометрична точність та шорсткість робочих поверхонь, матеріал.

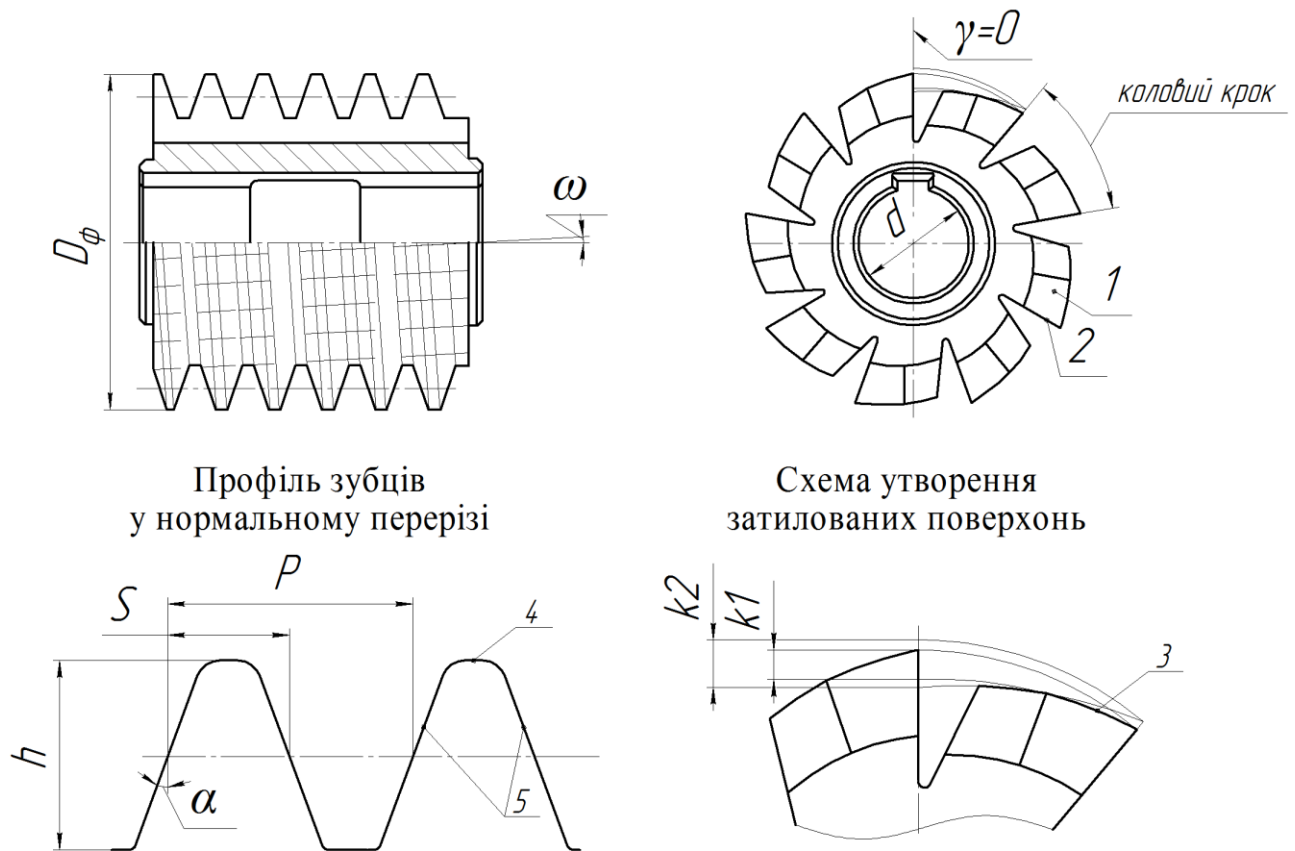


Рис. 1.4 Конструктивні параметри черв'ячної фрези

1 - задня грань бічної РК; 2 - передня грань; 3 - задня грань вершинної РК; 4 - вершинна різальна кромка; 5 - бічні різальні кромки; D_ϕ - зовнішній діаметр; ω - кут підйому гвинтової лінії фрези; γ - передній кут; d - діаметр отвору під оправку; α - кут профілю вихідного контуру; k_1 - затилювання шліфованої частини зубця фрези; k_2 - затилювання не шліфованої частини зубця фрези; h - висота зубця; S - товщина зубця на початковому циліндрі; P - осьовий крок.

1.1.3 Аналіз процесів зносу черв'ячної фрези

Знос зубців черв'ячних фрез відбувається як по передній так і по заднім граням (рис. 1.5). Переважним є знос по задній грані. Знос як правило нерівномірний в наслідок складних умов стружкоутворення при черв'ячному зубофрезеруванні [13, 14, 30].

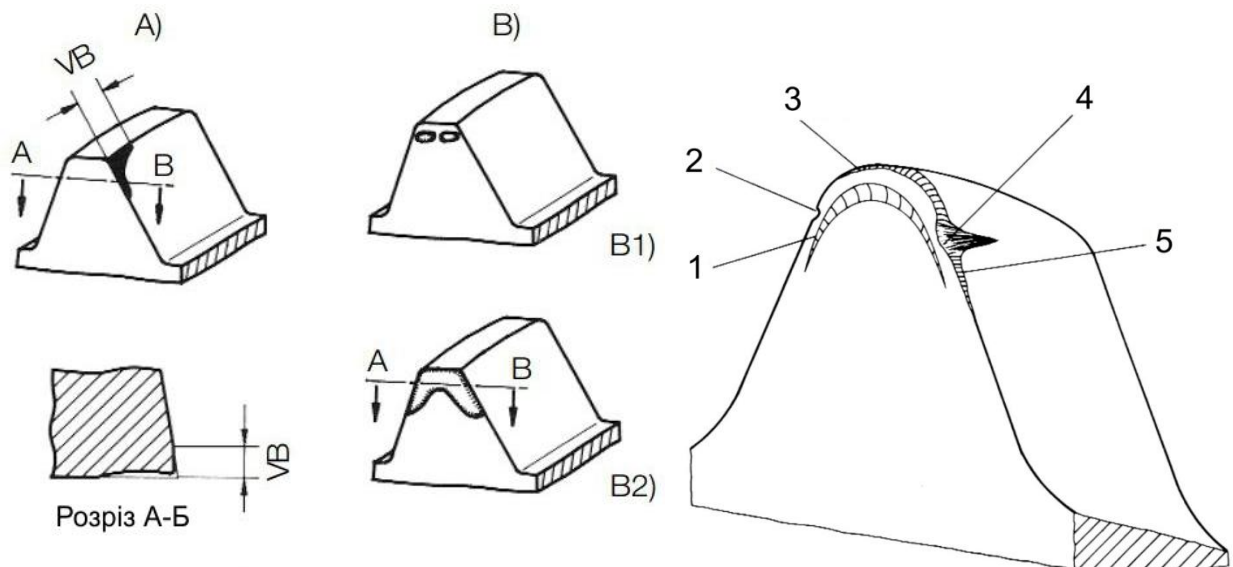


Рис. 1.5 Схема типового зносу зубця черв'ячної фрези

- а) знос по задній грані, шириною VB ; б) утворення лунки;
 б1) утворення лунки в кутах зубця; б2) повністю сформована лунка;
 1 – лунка; 2 – скол; 3 – скруглення вершинної різальної кромки;
 4 – знос по задній грані; 5 – округлення бічної різальної кромки.

На рис. 1.6 наведений процес послідовного РК. На підставі рис.1.6, а також на підставі виміру фактичних зон зносу можна теоретично визначити характер зносу.

Для теоретичного дослідження експериментальних даних по зносу поверхонь зубця фрези доцільно провести перетворення зубця в ортогональне призматичне тіло з розміщенням на його поверхні зон зносу.

Таке перетворення (рис. 1.7) дає можливість дослідити роботу сил різання в ортогональних проекціях і побудувати математичну модель зносу. При цьому доцільно побудову математичних моделей робити на кожному із зубців черв'ячної фрези, щоб визначити таким чином закономірність процесу зносу.

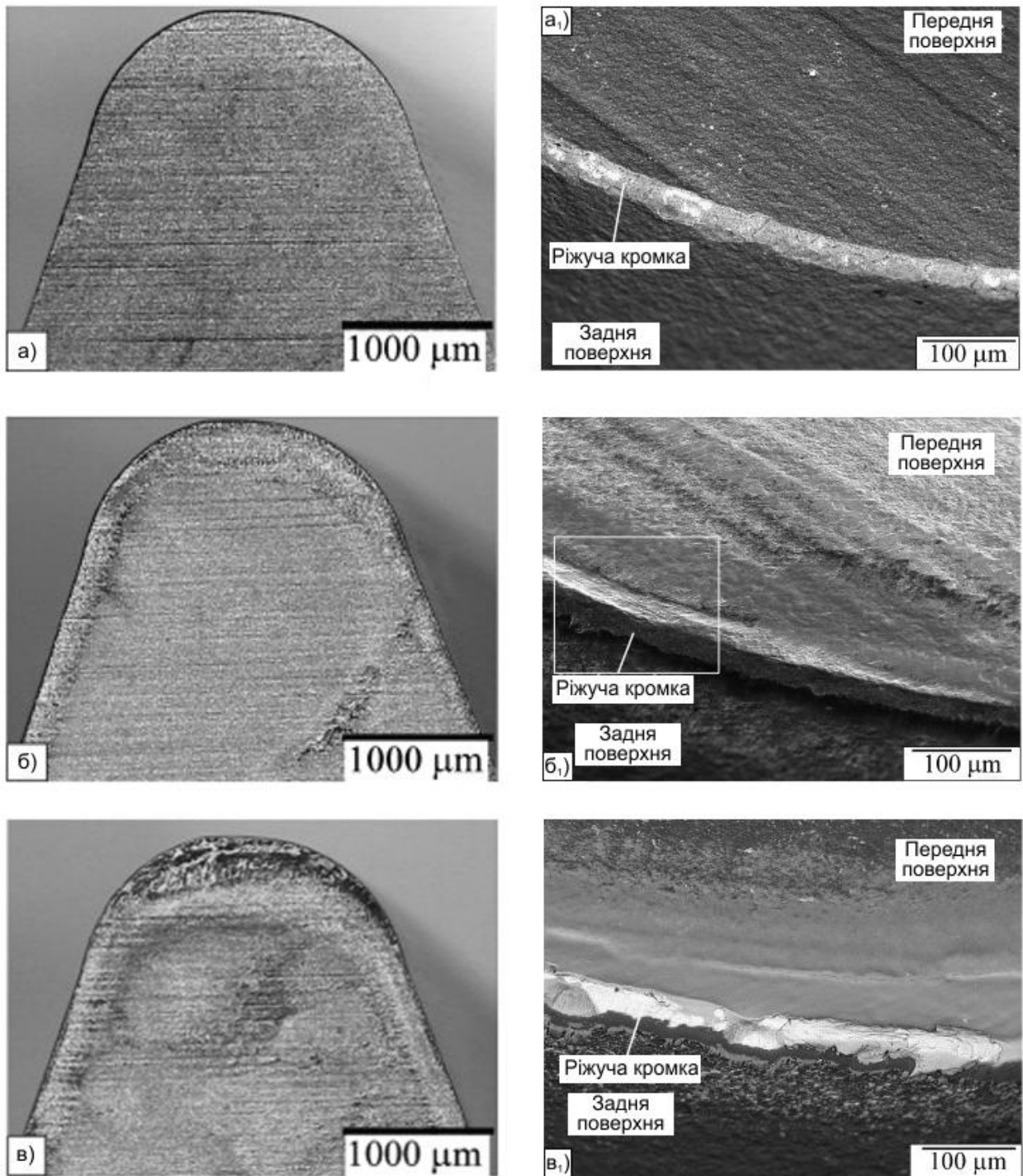


Рис. 1.6 Схема послідовного руйнування різальної кромки

а, а₁) профіль передньої грані після заточки та вид на різальну кромку;
 б, б₁) профіль передньої грані після прорізки сумарної ширини зубчастих коліс 50 мм та вид на різальну кромку; в, в₁) профіль передньої грані після прорізки сумарної ширини зубчастих коліс 150 мм та вид на різальну кромку.

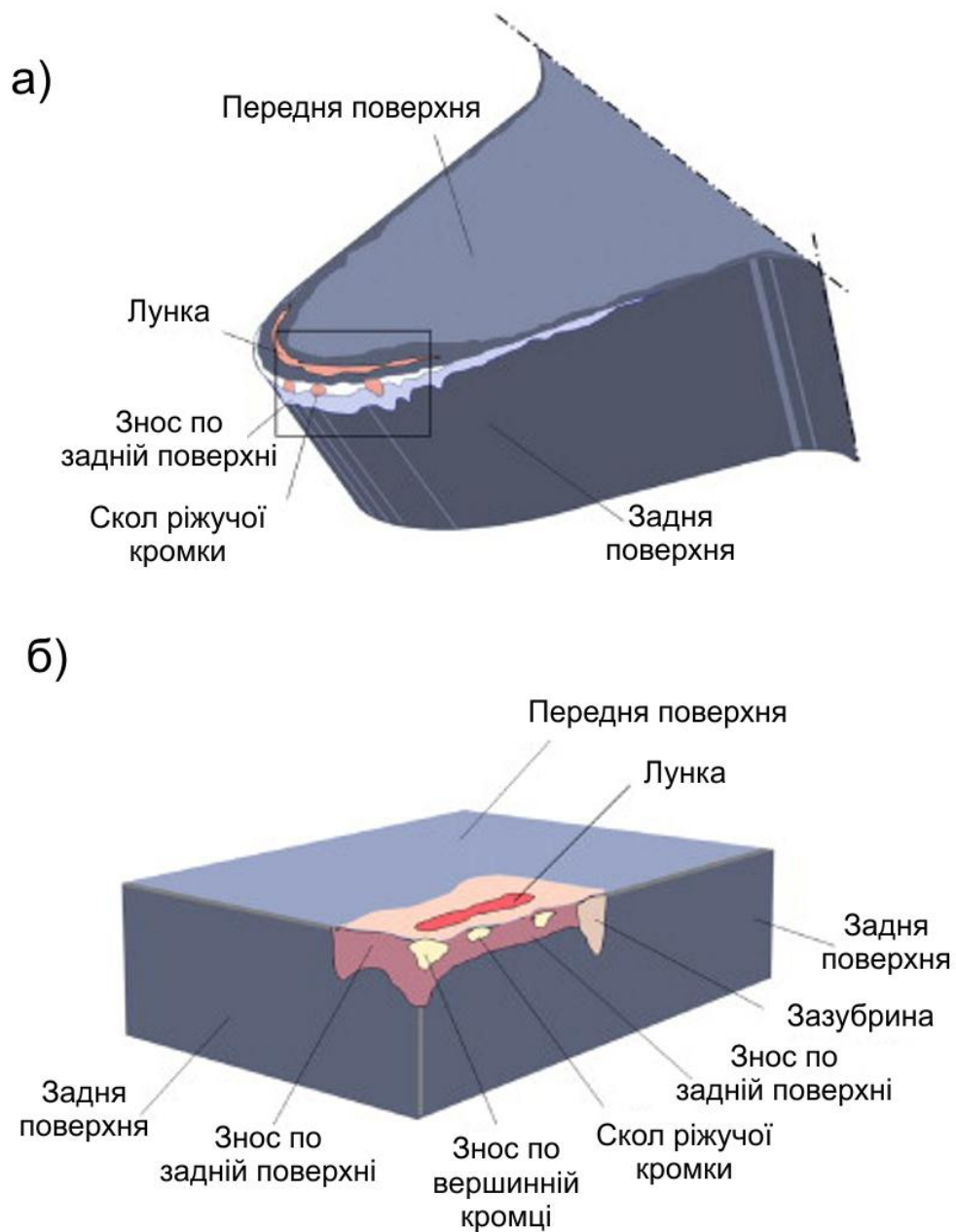


Рис. 1.7 Схема розміщення площин зносу

а) на реальних поверхнях зубця фрези;

б) в перетворенні зубця фрези в ортогональне призматичне тіло.

Поверхня зносу поділяється на декілька зон по діям напружень які виникають від сил різання. При накладанні на зубець черв'ячної фрези векторів фактичних сил різання які діють в межах передньої поверхні, а також із аналізу фактичних зон зносу поверхонь і різальних кромки, можна теоретично приблизно визначити в середовищі SolidWorks значення напружень.

Як видно з рис. 1.8, найбільші напруження, аж до 3400 Н/мм^2 , виникають в зоні, яка наближена до вершинної різальної кромки.

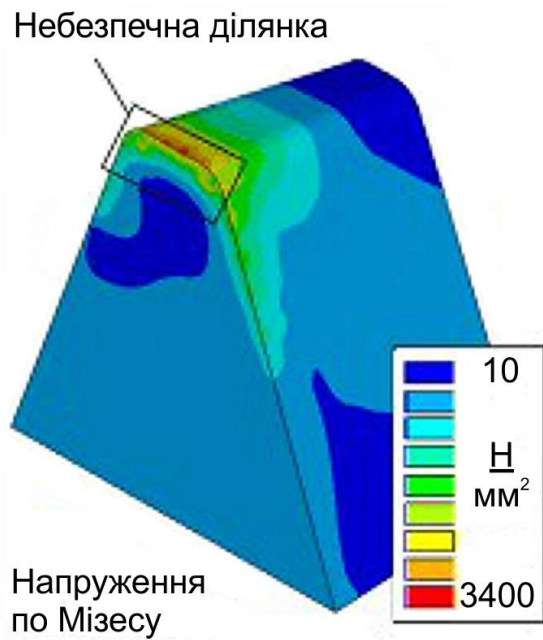


Рис. 1.8 Схема розміщення площин тиску на поверхнях зубця фрези.

1.1.4 Аналіз та принцип роботи зубофрезерних верстатів

Зубофрезерний верстат (рис.1.9) в традиційному виконанні складається з розміщених на станині вузлів, зокрема: супортна стійка, інструментальний супорт зі шпинделем інструменту, супорт виробу з ділильним столом, стійка контрпідтримки [1].

Інструментальний супорт переміщується по напрямних стійки у вертикальній площині, здійснюючи рух осьової подачі. Рух супроводжується обертанням фрези з частотою оборотів, відповідною заданій швидкості різання.

Супорт виробу з ділильним столом здійснює допоміжний рух (підведення і відведення деталі) в горизонтальній площині. Рух обкату здійснюється обертанням ділильного стола кінематично пов'язаного з обертанням інструментального шпинделя. У порожнинах інструментальної стійки і станини розміщені кінематичні ланцюги:

- ланцюг головного руху (обертання інструментального шпинделя);
- ланцюг обкату, кінематично узгоджує обертання інструментального шпинделя і ділильного стола;
- ланцюг осьових подач, що узгоджує обертання інструментального шпинделя і переміщення інструментального супорта у вертикальній площині.

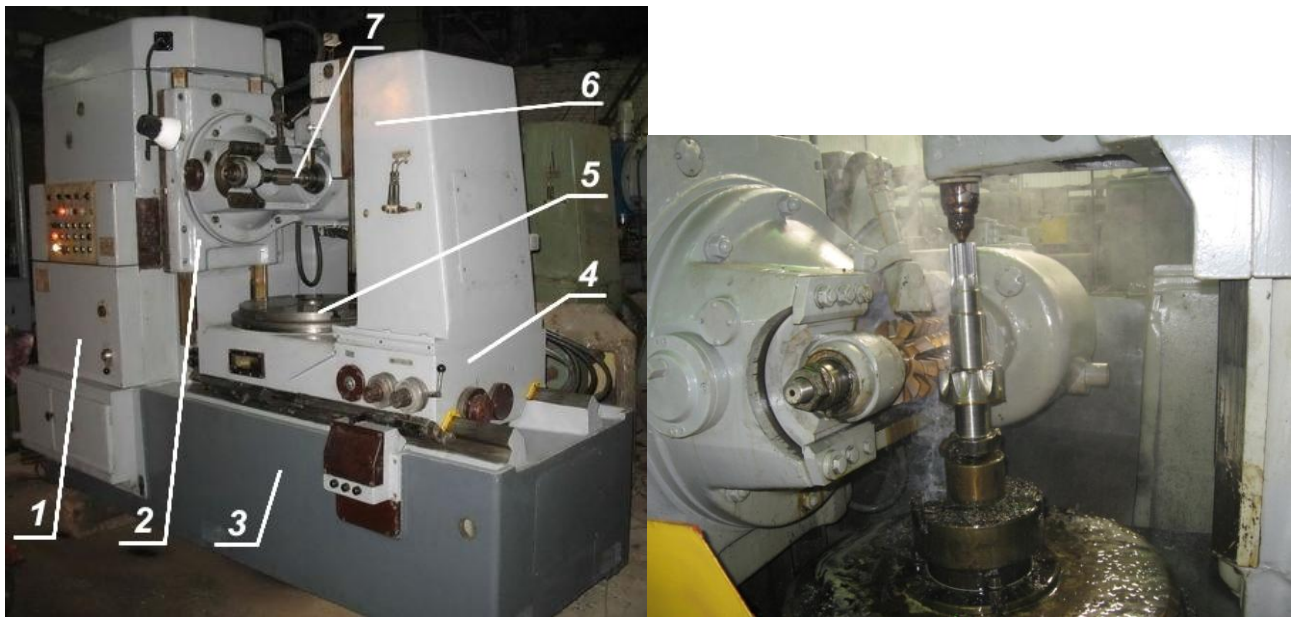


Рис. 1.9 Зовнішній вигляд і робоча зона зубофрезерного верстата

1 - супортна стійка; 2 - інструментальний супорт, 3 - станина; 4 - супорт виробу;
5 - ділильний стіл, 6 - стійка контрпідтримки; 7 - шпіндель інструмента.

Структурна схема зубофрезерного верстата представлена на рис. 1.10 [1]. Як видно, головний рух здійснюється від двигуна D_1 через орган налаштування i_v безпосередньо на інструментальний шпіндель 3. Ланцюг ділення кінематично зв'язує обертання інструментального шпинделя з обертанням оброблюваної деталі через гітару ділення i_x і виводиться на ділильну пару верстата 8, 9.

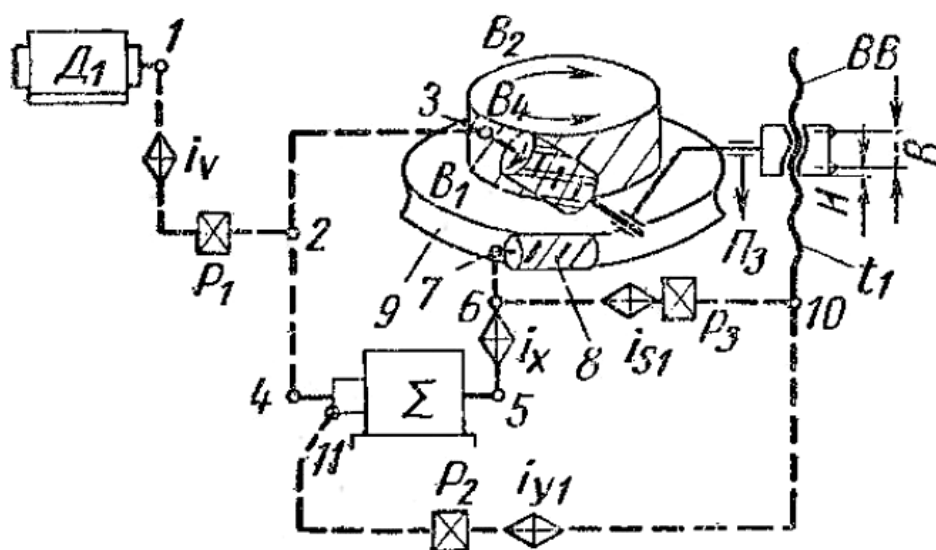


Рис. 1.10 Структурна схема зубофрезерного верстата.

Ланцюг осьової подачі отримує привод від ланцюга ділення через гітару осьових подач i_s і передає рух ходовому гвинту 10, який переміщує інструментальний супорт.

У разі обробки на верстаті шестерень із гвинтовими зубцями використовується диференціал (механізм, що підсумовує рухи) 5, який кінематично пов'язує ланцюг осьової подачі і ланцюг ділення для додання заготовці додаткового довороту, необхідного для формоутворення гвинтового зубця.

Із розвитком сучасних верстатних систем, зубофрезерні верстати (рис. 1.11) також почали оснащуватися системами ЧПУ. Серед основних тенденцій у конструюванні цих верстатів фірмами-виробниками [19, 25] було виділено поступову відмову від ділильних ланцюгів механічного типу, натомість використання уніфікованих мехатронних верстатних модулів з прямим приводом, а саме - інструментального шпінделя [22, 41] та шпінделя виробу [21, 34, 40].



Рис. 1.11 Сучасний зубофрезерний верстат з ЧПУ [25].

1.2 Аналіз налагоджуваних, вхідних та вихідних параметрів методу черв'ячного зубофрезерування

1.2.1 Аналіз схеми встановлення та переміщень інструменту

Фреза встановлюється таким чином (рис. 1.12), що б між геометричними осями інструмента і деталі був витриманий кут θ , град. [27]:

$$\theta = 90^\circ - \omega,$$

де ω - кут нахилу гвинтової лінії черв'ячної фрези, град.

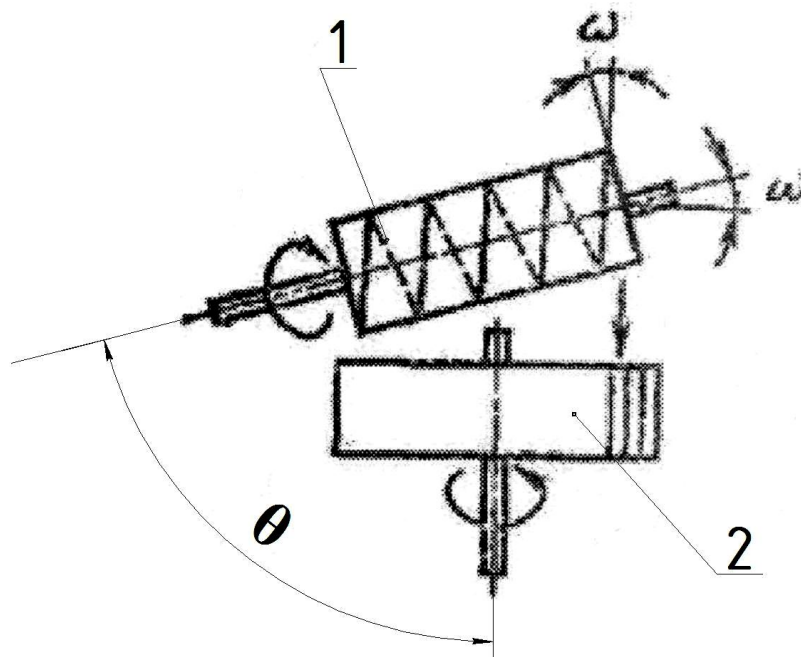


Рис. 1.12 Установка фрезы на кут гвинтової лінії

1 - фреза; 2 - оброблювана деталь; ω - кут підйому гвинтової лінії;
 θ - кут установки вісі фрези відносно вісі деталі.

Фреза повинна бути віддалена від торця деталі на відстань $l_{вр}$, мм:

$$l_{вр} = (1,1 \div 1,2) \sqrt{t(D_\phi - t)},$$

де t – глибина оброблюваної міжзубової западини, мм;

D_ϕ – діаметр черв'ячної фрези, мм.

Кінцеве положення фрези щодо деталі визначається величиною перебігу l_n , яка визначається з виразу, мм:

$$l_n = 3 \div 5.$$

Схема механічної обробки та розрахункові переміщення показані на рис.1.13 [27, 37]:

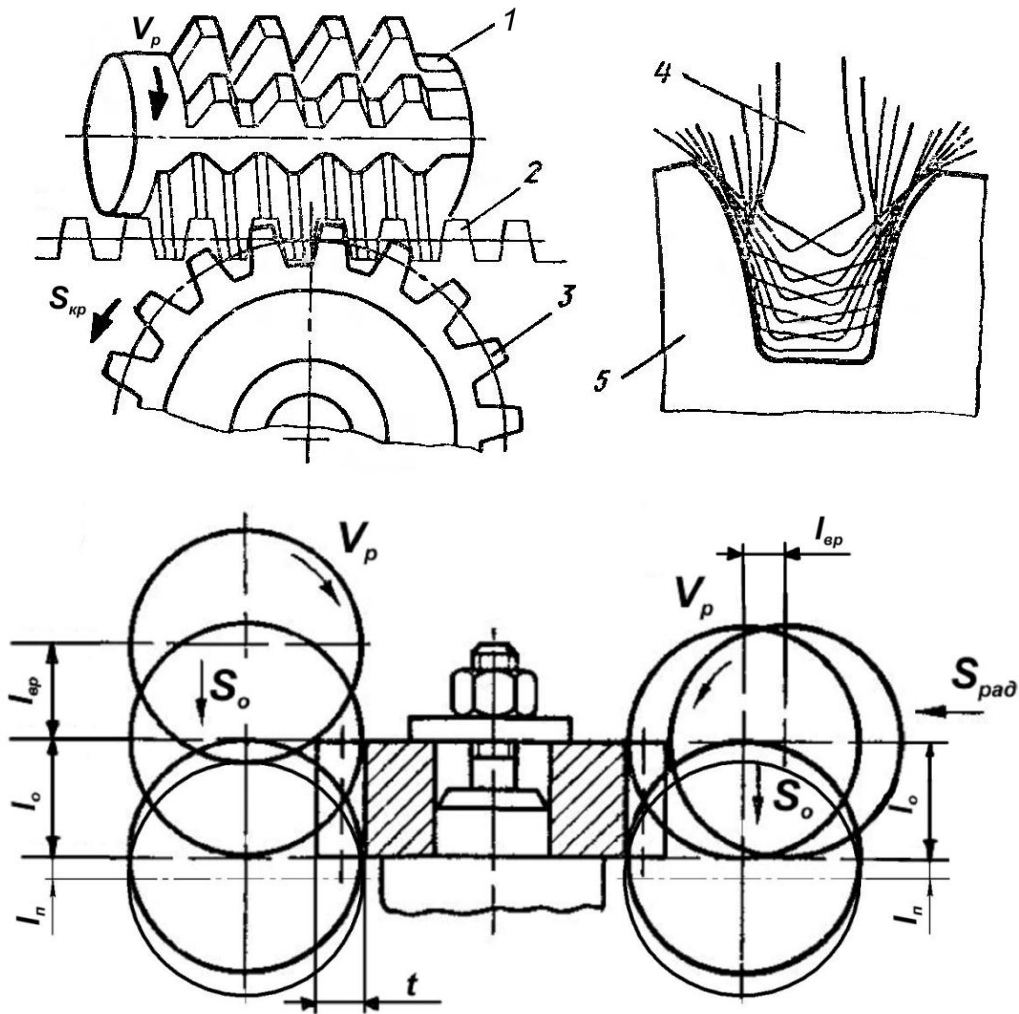


Рис. 1.13 Схема механічної обробки

1 - черв'ячна фреза; 2 - вихідна зубчаста рейка; 3 - зубчасте колесо;
4 - сімейство бічних РК зубця черв'ячної фрези; 5 - зубець оброблюваного колеса.

1.2.2 Аналіз схем різання при черв'ячному зубофрезеруванні

Схеми різання вершинної та бічних різальних кромek приведені на рис. 1.14 та рис. 1.15.

Як видно зі схеми рис. 1.15, зубець черв'ячної фрези, при обробці однієї міжзубової впадини, працює спочатку в умовах зустрічного фрезерування, а потім – попутного. Це може бути джерелом похибки обробки.

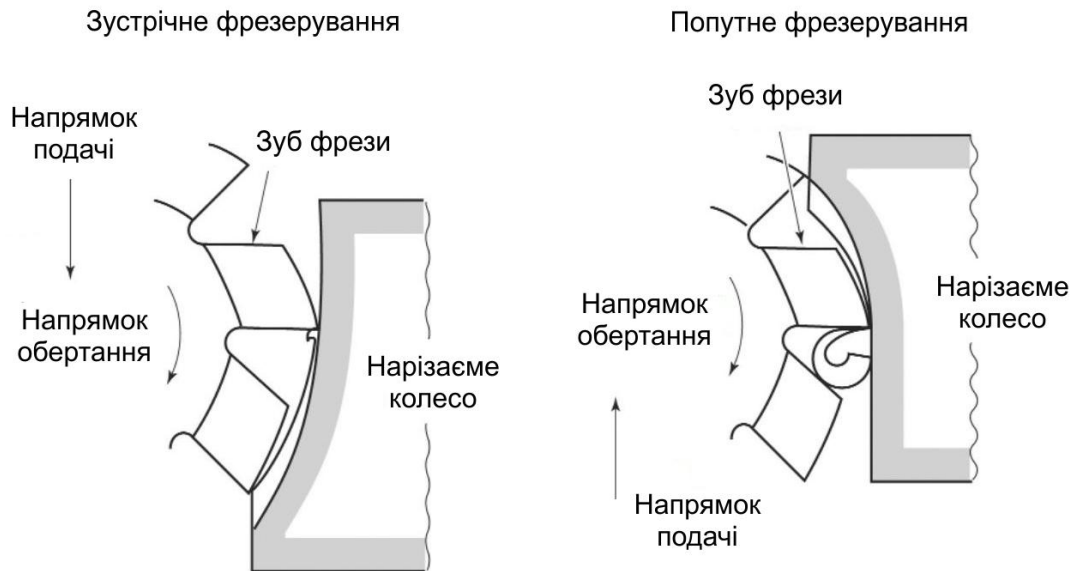


Рис. 1.14 Схеми різання вершинної різальної кромки.

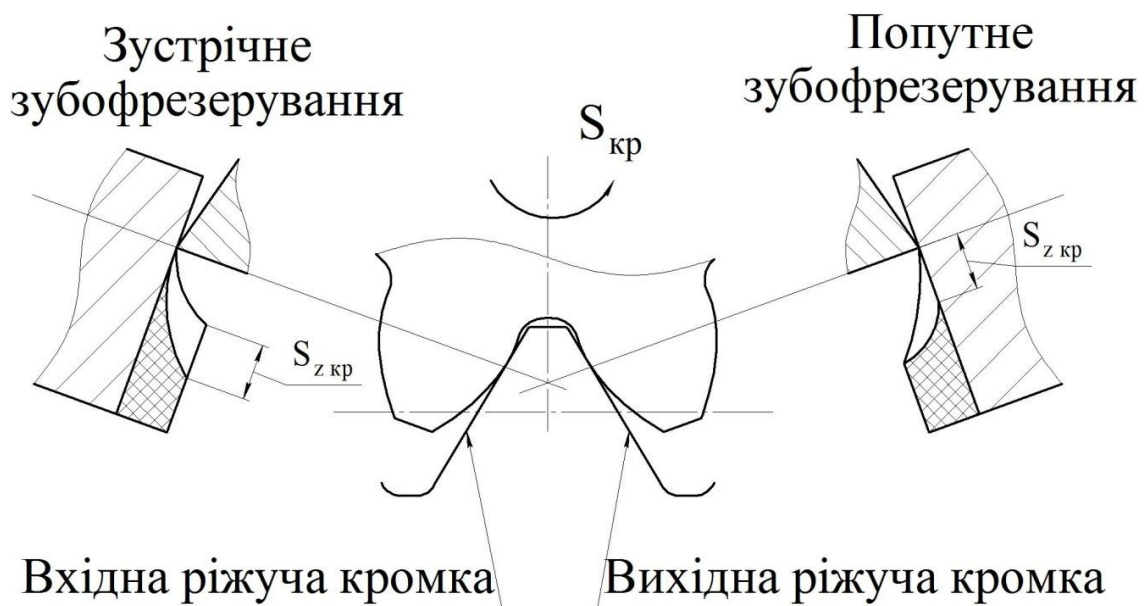


Рис. 1.15 Схеми різання бічних різальних кромок.

1.2.3 Аналіз режимів різання

Швидкість різання V при черв'ячному зубофрезеруванні визначається за емпіричною формулою [27], м/хв:

$$V = \frac{C}{T^{0.33} S_o^{0.5} m^{0.1}},$$

де T - стійкість фрези, год.;

C – коефіцієнт, що залежить від матеріалу оброблюваної деталі;

S_o - осьова подача, мм/об. дет;

m – модуль, мм.

Параметри, що входять в дану формулу визначаються за нормативними таблицями режимів різання.

Критичні значення швидкості різання:

- для фрез із швидкорізальних сталей - в межах 25...30 м/хв;
- для фрез із твердих сплавів (збірні черв'ячні фрези) в межах 70...90 м/хв.

Рекомендовані режими різання для черв'ячних фрез з швидкорізальної сталі та твердого сплаву наведено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Найменування		Позначення	Одиниця виміру	Числове значення
Швидкість різання	Швидкорізальна сталь	V_p	м/хв.	20...30
	Твердий сплав			80...100
Подача осьова	Чорнова	S_o	мм/об. деталі	2...3
	Чистова			1,0...1,5
Припуск	Чорновий	Z_i	мм	-
	Чистовий			0,1...0,2m

Рекомендовані значення вісєвої подачі для фрези з твердого сплаву наведено у табл. 1.2 [26]:

Таблиця 1.2.

Модуль	Діаметр фрези, мм	Ефективне число зубців	Радіальна глибина різання	Осьова подача, мм/об		
				$z < 50$	$z = 50-100$	$z > 100$
4	100	9	9	1,0-1,7	1,7-3,5	3,5-6,5
	150	14	9	2,5-4,0	4,0-5,8	5,8-9,0
	210	20	9	4,0-6,5	6,5-8,0	8,0-13,0
5	100	9	11,25	0,8-1,6	1,6-3,4	3,9-6,4
	150	14	11,25	1,7-2,9	2,9-5,7	5,7-8,8
	210	20	11,25	2,5-3,5	3,5-7,0	7,0-11,5
6	120	8	13,5	0,7-1,2	1,2-3,3	3,3-5,7
	150	14	13,5	1,6-2,5	2,5-5,5	5,5-8,2
	210	20	13,5	1,8-3,5	3,5-6,0	6,0-10,0
7	150	12	15,75	1,4-2,4	2,4-4,4	4,4-7,6
	210	18	15,75	1,5-3,2	3,2-5,5	5,5-9,5
8	150	12	18	1,1-2,1	2,1-3,7	3,7-6,2
	210	18	18	1,3-3,0	3,0-5,5	5,5-9,0

Виходячи з певного значення швидкості різання розраховується частота обертів інструментального шпинделя n :

$$n = \frac{1000V}{\pi D_{\phi}}.$$

Осьова подача S_o залежить від категорії жорсткості верстата і модуля оброблюваної деталі. Значення її вибирається за таблицями нормативів режимів різання та за рекомендаціями виробників зубообробного інструмента.

1.2.4 Аналіз припуску на обробку

При нарізуванні зубів по суцільному матеріалу (рис. 1.16, а) припуск Z_i визначається з виразу, мм:

$$Z_i = t,$$

де t - глибина оброблюваної западини між зубцями, мм.

При нарізуванні попередньо оброблених зубців (рис. 1.16, б) припуск на сторону зубця визначається за формулою, мм:

$$Z_i^{min} = R_a + T + F'_i + f_f + F_{\beta},$$

де R_a - шорсткість після попередньої обробки;

T - глибина дефектного шару матеріалу;

F'_i - кінематична похибка попередньої обробки;

f_f - похибка профілю зубця після попередньої обробки;

F_{β} - похибка напрямку зубця після попередньої обробки.

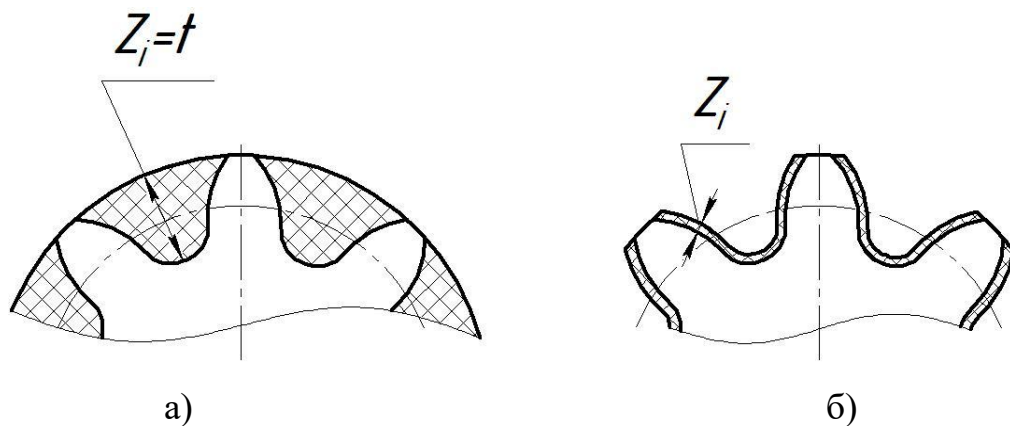


Рис. 1.16 Схема припуску при зубофрезеруванні

а) при обробці по суцільному матеріалу; б) при чистовій обробці.

1.2.5 Визначення основного часу обробки

Основний час при черв'ячному зубофрезеруванні розраховується за формулою, хв [27]:

$$t_o = \frac{(l_o + l_{вр} + l_{п})}{S_o n q t} z i,$$

де l_o - довжина нарізуваного зубчастого вінця, мм;

$l_{вр}$ - довжина врізання, мм;

$l_{п}$ - довжина перебігу, мм;

z - число зубців нарізуваного зубчастого колеса;

S_o - вісева подача, мм/об;

n - число обертів фрези за хвилину;

q - число заходів черв'ячної фрези;

i - число проходів.

1.2.6 Вимірювальні та контрольовані параметри зубчастого колеса

Параметри зубчастого колеса, які використовуються в якості вихідних даних для налагодження вимірювальної техніки:

- модуль m , мм;
- кількість зубців z , шт;
- кут профілю α° ;
- коефіцієнт зміщення x , мм;
- діаметр впадини d_i , мм;
- діаметр основного кола d_o , мм;
- зовнішній діаметр d_e , мм;
- довжина загальної нормалі W , мм.

Програма контролю параметрів зубчастого колеса після чистового зубофрезерування зведена до табл. 1.3. Як видно з табл. 1.3, використання координатно-вимірювальної машини (КВМ) дає змогу контролювати значну кількість параметрів зубчастого вінця за одну операцію.

Таблиця 1.3.

№ п/п	Контрольований параметр	Позначення	Засіб вимірювання
1.	Коливання довжини загальної нормалі	F_{rw}	нормалемір
2.	Коливання вимірювальної міжвісєвої відстані, за оберт	F_i''	міжцентромір
3.	Коливання вимірювальної міжвісєвої відстані, на одному зубці	f_i''	
4.	Похибка напрямку зубця	F_β	координатно-вимірювальна машина
5.	Похибка евольвентного профілю	f_{fa}	
6.	Похибка нахилу профілю	f_{Ha}	
7.	Накопичена похибка кроків	F_p	
8.	Радіальне биття зубчастого вінця	F_r	
9.	Коливання довжини загальної нормалі	R_w	

На рис. 1.17 приведена типова евольвентограма, отримана на КВМ.

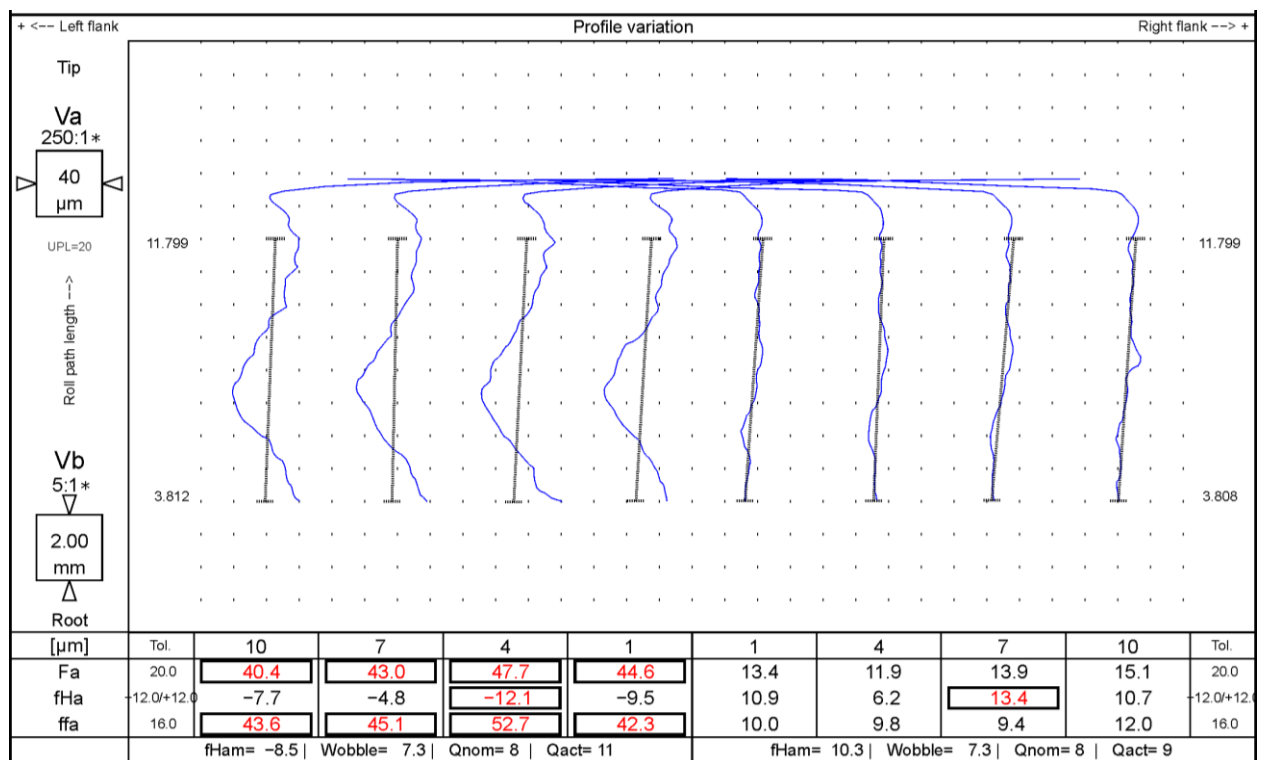


Рис. 1.17 Типова евольвентограма зубчастого колеса, обробленого способом черв'ячного зубофрезерування.

Різній характер спотворень правих та лівих евольвентних профілів обробленого зубчастого колеса характерний для черв'ячного зубофрезерування, з огляду на різні умови різання, як показано на рис. 1.15.

1.3 Висновки, мета і задачі дослідження

Аналіз літературних джерел показав, що на точність та якість обробки при черв'ячному зубофрезеруванні впливає велика кількість технологічних чинників. Серед таких: складні умови різання, невідне стружкоутворення, високі показники значень сили різання і, як наслідок, висока енергоємність процесу. Також, всі перелічені негативні чинники впливають на ресурс дороговартісного різального інструменту із складною геометрією та на ресурс вузлів зубофрезерних верстатів.

Описані у розділі проблеми черв'ячного зубофрезерування спонукають до помітного та значного прогресу у розвитку верстатних систем. Що стосується процесу черв'ячного зубофрезерування, незважаючи на велику кількість досліджень по даній тематиці, то присутнє технологічне відставання у питаннях удосконалення схеми різання, зниження енергоємності процесу та забезпечення точності та якості обробки.

Метою досліджень кваліфікаційної роботи є покращення якості обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс середніх модулів 4...12 мм.

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

- визначити шляхи зниження впливу похибок традиційного черв'ячного зубофрезерування, шляхом зміни схеми формоутворення евольвентного профілю та взаємодії РК інструменту та ОП;
- дослідити вплив зміни схеми різання на точність і якість евольвентної ОП, розробити методику та провести аналіз в умовах моделювання;
- розробити варіант реалізації методу черв'ячного зубофрезерування, заснованого на альтернативній схемі взаємодії РК інструменту та ОП;
- дослідити та порівняти в умовах експерименту досягну точність та якість ОП, отриманих традиційною та альтернативною схемами взаємодії РК інструменту та ОП.

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ

2.1 Програма досліджень

Дослідження методу зубофрезерування у роботі, що мають теоретичний характер, проводяться за приведеними напрямками:

- 1) аналіз схеми взаємодії різальних кромок фрези та ОП, зокрема:
 - а) дослідження поверхневих напружень, які виникають на ОП, в залежності від прийнятої системи взаємодії РК та ОП;
 - б) дослідження силового портрету на приводі шпинделя заготовки верстата в процесі зубофрезерування з використанням різних систем взаємодії РК та ОП;
- 2) моделювання процесу різання методом зубофрезерування із дослідженням:
 - а) впливу похибки наладки та встановлення черв'ячної фрези на точність оброблюваної поверхні;
 - б) характеру та величини мікронерівностей, які виникають в результаті обробки методами черв'ячного зубофрезерування.

Також, у роботі проводиться експериментальне дослідження процесів різання:

- 1) обробка зразка деталі згідно досліджуваних схем різання;
- 2) обмір зразка та аналіз параметрів обробленої поверхні.

2.2 Методика дослідження шляхів зменшення поверхневих напружень та спотворень геометричної форми обробленої поверхні

Дослідження покликане віднайти можливості по зменшенню похибок обробленої евольвентної поверхні зубчастого вінця, обробленого методом черв'ячного зубофрезерування, шляхом зміни схеми взаємодії РК та ОП.

Аналіз відомих робіт по теорії різання на предмет класифікації поверхонь оброблюваної деталі в залежності від їх взаємодії із різальною кромкою інструмента не дав вичерпної відповіді. Існуюча класифікація [8] наводить поняття «поверхня різання» та «оброблена поверхня», однак для приведеного дослідження цього не достатньо.

По цій причині, варто прийняти доповнену класифікацію у вигляді умовних припущень, з метою повнішого відображення характеристик поверхонь, які приймають участь у процесі різання:

- 1) поверхня різання (ПР) - поверхня, що взаємодіє із різальним інструментом;
- 2) в залежності від виду взаємодії ПР із різальною кромкою інструменту, ПР поділяються на:
 - а) нормальна поверхня різання (НПР) – різальна кромка інструменту розташовується дотично, а сили різання діють по нормалі до неї;
 - б) дотична поверхня різання (ДПР) – різальна кромка розташовується перпендикулярно, а сили різання – діють дотично до неї;
- 3) в залежності від призначення, по закінченню обробки, ПР можуть поділятися на:
 - а) функційні – що взаємодіють із поверхнями інших деталей у виробі чи вузлі;
 - б) вільні – що не взаємодіють із поверхнями інших деталей у виробі чи вузлі;

Для спрощення схеми різання в умовах дослідження, розглядається токарна обробка підрізним різцем, як показано на рис. 2.1.

Як видно із схеми рис. 2.1, інтенсивні навантаження, які сприймаються головною різальною кромкою від складових сили різання F_x і F_z , утворюють складний напружений стан на НПР та ДПР.

Також видно, що на НПР мають місце нормальні напруження стиснення $\sigma_{\text{ст}}$ від складової сили різання F_x , а також дотичні напруження зрізу (зсуву) $\tau_{z\text{с}}$ від дії складової сили різання F_z .

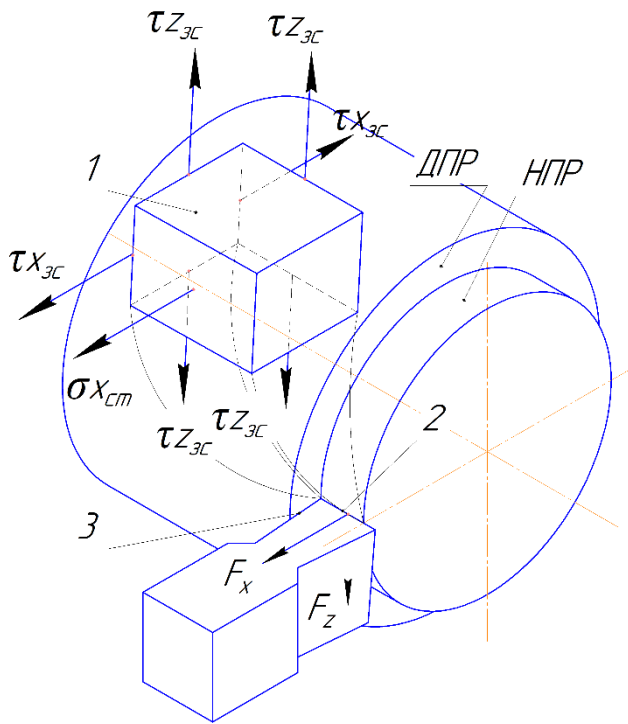


Рис. 2.1 Поверхневі напруження
при токарній обробці

1 – шару матеріалу, який знімається;
2 – ГРК; 3 – допоміжна РК; F_x, F_z –
складові сили різання; $\tau_{z_{zc}}$ – дотичні
напруження зсуву; $\sigma_{x_{ст}}$ – нормальне
напруження стискування; ДПР – дотична
ПР; НПР – нормальна ПР.

Усі напруження, які виникають на ПР можна визначити по формулам теорії опору матеріалів [12].

Загальні напруження, в умовах складного напруженого стану, на НПР визначають по формулі, МПа:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{x_{ст}}^2 + 4\tau_{x_{zc}}^2}. \quad (2.1)$$

Дотичні напруження від дії складових сили різання F_x і F_z , які виникають на ДПР, визначаються по формулі, МПа:

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

Дослідження проводиться для конструкційної сталі 40Х, граничні напруження якої рівні [2]:

$$[\sigma_{ст}] = 320 \text{ МПа};$$

$$[\tau_{zc}] = 125 \text{ МПа}.$$

В результаті проведеного дослідження має бути отримано порівняльні значення напружень на НПР та ДПР під час обробки різанням, та визначено оптимальну схему взаємодії РК та ОП для зубофрезерування.

2.3 Методика дослідження силового портрету на приводі шпинделя заготовки верстата під час зубофрезерування

Дослідження проводиться з метою зниження похибок евольвентного профілю деталі, які викликані різними умовами обробки правих та лівих профілів в межах однієї міжзубової западини.

Значний вплив на це явище чинить величина та напрямок сили різання, а особливо наявність зміни напрямку сили різання. Вплив цих чинників на вузли зубофрезерного верстату можуть викликати негативне явище, яке має назву силове розмикання кінематичних пар. Задля зменшення динамічної складової у похибці обробки, кінематичні пари і ланцюги зубофрезерного верстату повинні знаходитись в постійному контакті, тобто замикатися утворюваною під час обробки силою різання [6].

Описуючи вплив складових сили різання та моментів на вузли зубофрезерного верстату, зокрема на шпіндель виробу, приймаємо наступні припущення:

- 1) величина сил різання для порівнювальних методів – однакова;
- 2) дія сил різання спрямована по нормалі до РК;
- 3) до порівняння враховуються сили різання (або складові сил різання), які можуть утворювати крутний момент на шпінделі виробу;
- 4) сили, складові сил чи моменти різання, що утворюють деформацію оброблюваної деталі не враховуються, з огляду на відсутність впливу на кінематику процесу обробки різанням.

При проведенні дослідження розглядаються дві схеми силового портрету, зокрема:

- при традиційному чистовому черв'ячному зубофрезеруванні, рис. 2.2;
- при обробці черв'ячною фрезою, ГРК якої розташовується нормально до ОП та при обробці переміщується еквідістантно ОП, рис. 2.3.

Проаналізувавши приведені схеми можна зробити висновки про вплив системи взаємодії РК та ОП на кінематичну точність зубофрезерних верстатів з черв'ячною ділильною парою.

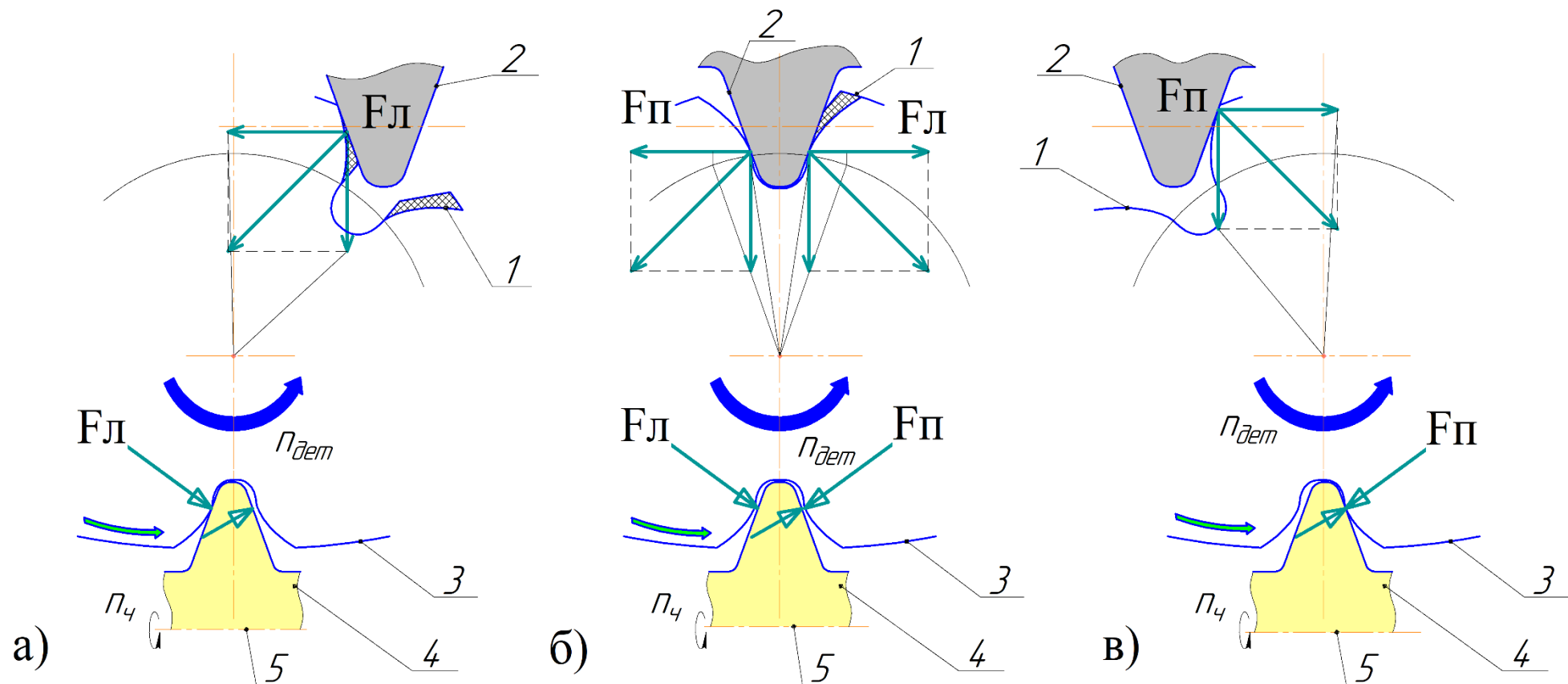


Рис. 2.2 Схема векторів сил різання та моментів під час обробки методом традиційного черв'ячного зубофрезерування

а) формоутворення правого евольвентного профілю до початкового кола;

б) положення одночасної обробки правого і лівого профілю; в) формоутворення лівого евольвентного профілю.

1 – оброблювана деталь; 2 – профіль зубця черв'ячної фрези; 3 – профіль черв'ячного колеса ділильної пари зубофрезерного верстата;

4 – профіль черв'яка ділильної пари; 5 – вісь обертання черв'яка;

$F_{\text{Л}}$, $F_{\text{П}}$ – сили різання направлені, відповідно, вліво та право;

$n_{\text{дет}}$ – обертання оброблюваної деталі; $n_{\text{ч}}$ – обертання черв'яка ділильної пари.

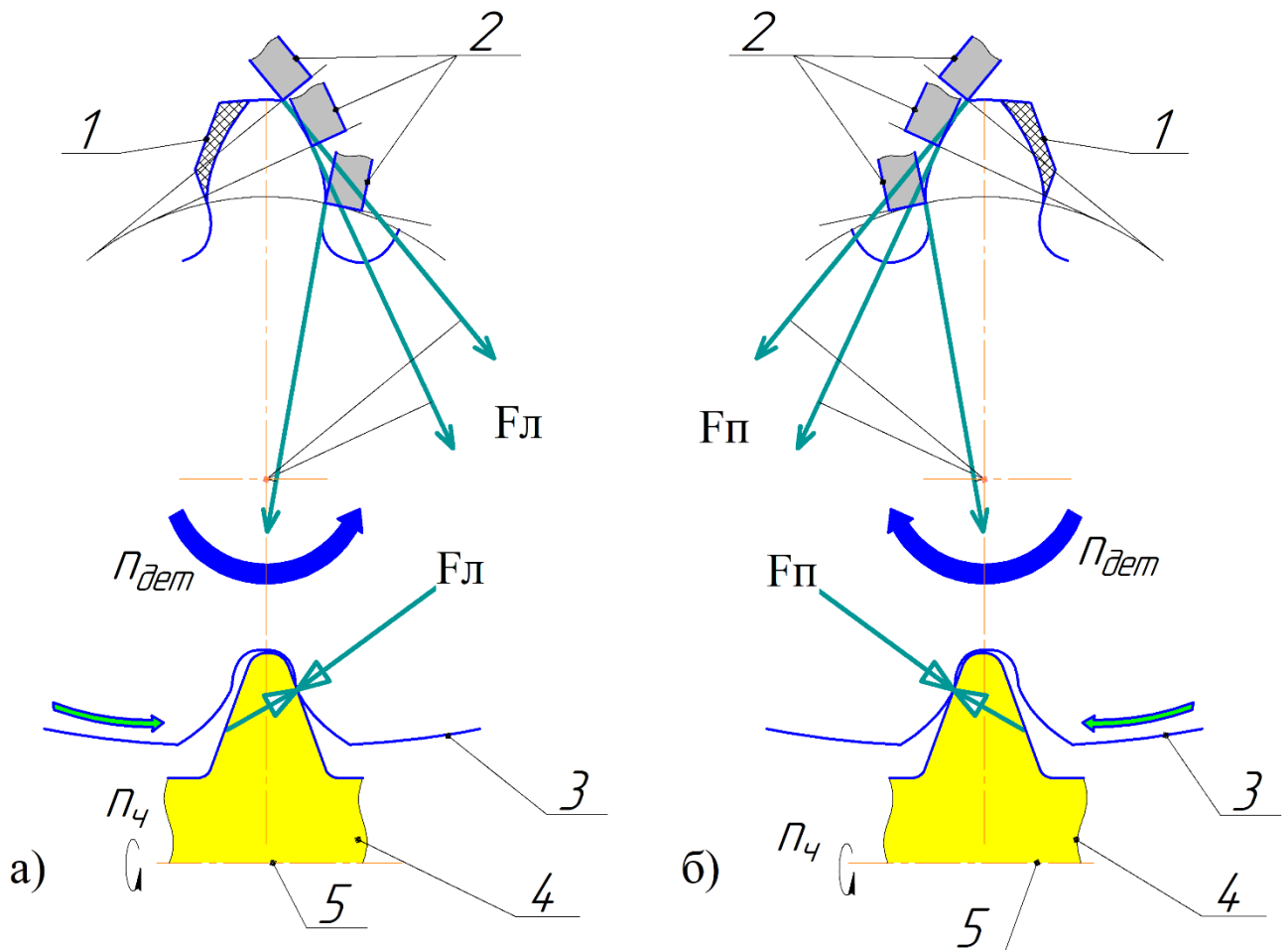


Рис. 2.3 Схема векторів сил різання та моментів при обробці черв'ячною фрезою, ГРК якої розташовується нормально до ОП

а) формоутворення правого профілю; б) формоутворення лівого профілю;
 1 – оброблювана деталь; 2 – профіль зубця фрези; 3 – профіль черв'ячного колеса ділильної пари зубофрезерного верстата; 4 – профіль черв'яка ділильної пари; 5 – вісь обертання черв'яка; F_L , F_P – сили різання, відповідно, лівонаправлена та правонаправлена; m_{det} – напрямок обертання оброблюваної деталі; m_{ch} – напрямок обертання черв'яка.

2.4 Методика моделювання процесів різання при черв'ячному зубофрезеруванні

2.4.1 Загальні положення про моделювання процесів черв'ячного зубофрезерування

Дослідження черв'ячного зубофрезерування, які проводяться в умовах реальних процесів (теоретично і, особливо, експериментально) не мають універсального застосування, так як процес зубофрезерування має багато факторів впливу, що ускладнює оцінку процесів різання. З огляду на складні кінематику, умови різання та формоутворення, досліджувати процеси

черв'ячного зубофрезерування ефективніше всього в умовах моделювання процесу [16, 17, 23].

Для дослідження в умовах моделювання необхідно сформулювати вимоги до моделей, із забезпеченням адекватності модельованих процесів до реальних. Вимоги до моделювання процесів черв'ячного зубофрезерування, що застосовуються в кваліфікаційні роботі, наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Характеристика	Модель методу черв'ячного зубофрезерування	
	традиційне, чистове	ГРК фрези розташовується нормально до ОП
Розташування різальної кромки	дотично до оброблюваної поверхні	по нормалі до оброблюваної поверхні
Джерело робочої подачі	обертання оброблюваної деталі	
Форма заготовки	дискової форми	
Форма припуску	конусна, більшої товщини на основі	наближена до паралелограма
Розташування інструменту відносно оброблюваної деталі	робочий рух інструменту перпендикулярний вісі обертання оброблюваної деталі	
Ширина РК інструменту	3 припуску	1,5 припуску
Подача	S мм/подв. хід	$S/2$ мм/подв. хід

Схеми моделей методів черв'ячного зубофрезерування показано на рис. 2.4.

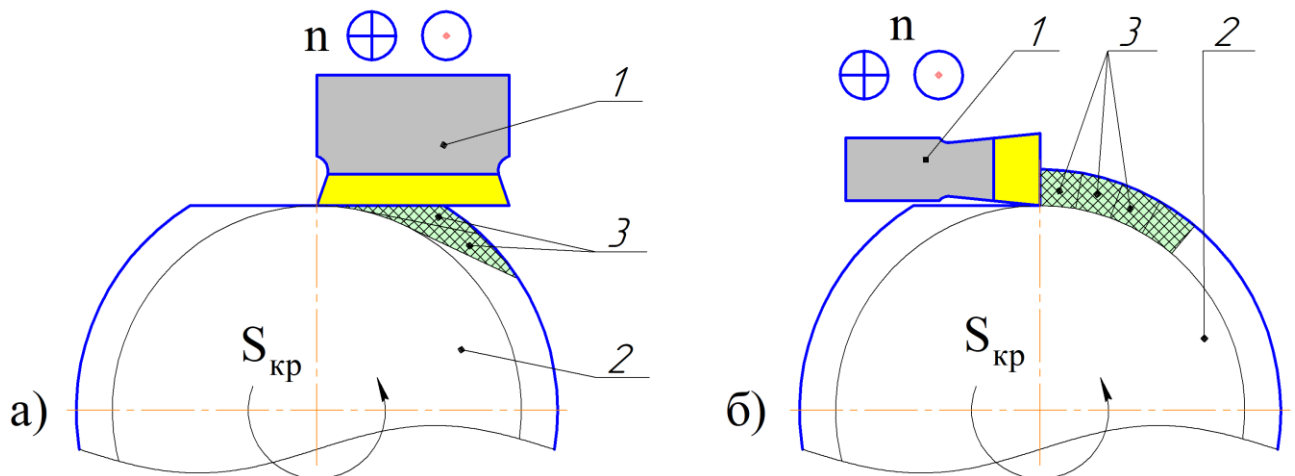


Рис. 2.4 Моделі методів черв'ячного зубофрезерування

а) традиційного, чистового; б) при якому ГРК фрези розташовується нормально до ОП;
1 – різальний інструмент; 2 – оброблювана деталь; 3 – припуск, що знімається за хід інструменту.

Забезпечення вимог табл. 2.1, в процесі моделювання, забезпечить адекватність модельованих процесів різання і формоутворення до реальних.

2.4.2 Методика моделювання впливу похибки наладки та встановлення черв'ячної фрези на точність оброблюваної поверхні

Дослідження проводиться з метою визначення впливу похибки наладки та встановлення черв'ячної фрези на точність оброблюваного зубчастого вінця.

Моделі, описані у р. 2.4.1, є основою для вивчення впливу радіальної похибки встановлення черв'ячної фрези. Обумовлені моделі підлягають впливу аналогу радіального биття фрези на оправці – різальний інструмент під час моделювання зазнає періодичного коливання у протилежному від оброблюваної деталі напрямку, і назад. Величина впливу такого коливання на точність оброблюваного профілю виражається у величині спотворення теоретичного профілю.

На основі результатів проведеного моделювання можна робити висновки про величину впливу схеми взаємодії РК інструменту та ОП на точність обробки.

2.4.3 Методика моделювання мікронерівностей, які виникають в результаті обробки методами черв'ячного зубофрезерування

Метою дослідження є визначення величини впливу схеми взаємодії РК інструменту та ОП на характер мікронерівностей, які виникають в результаті обробки методами черв'ячного зубофрезерування.

Основою для вивчення впливу схеми взаємодії РК інструменту та ОП на характер мікронерівностей є моделі, описані у р. 2.4.1.

Процес моделювання полягає у обробці деталі визначеного радіусу R , згідно описаних у р. 2.4.1 схем. Величина мікронерівностей фіксується розміром елементів h , які утворюються в результаті послідовних врізань інструменту у тіло заготовки, при постійному повороті її на кут φ .

На основі результатів проведеного моделювання можна робити висновки про вплив схеми взаємодії РК інструменту та ОП на характер залишкових мікронерівностей на обробленій поверхні.

2.5 Методика експериментальних досліджень процесів різання

Експериментальне дослідження проводиться з метою визначення степені впливу схеми взаємодії РК та ОП на напруження в поверхневому шарі обробленої поверхні.

Перелік обладнання, що застосовувалося під час дослідження, наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Найменування	Тип	Позначення	Примітки
Верстат	Токарно-гвинторізний	1К62	-
Різальний інструмент	Різець прохідний	-	матеріал різальної частини -
	Різець підрізний	-	сплав Т15К6
Засоби вимірювання	Мікроскоп інструментальний	БМИ-1	отримання збільшених зображень оброблених поверхонь
	Координатно-вимірвальна машина	Carl-Zeiss Contura G2	обмір відхилення від прямолінійності оброблених поверхонь
	Ультразвуковий дефектоскоп	УЗД-10	визначення глибини наклепаного шару

Експериментальне дослідження проводилось в наступній послідовності.

На першому етапі виконувалась обробка дослідних зразків на токарно-гвинторізному верстаті. Схеми обробки показані на рис. 2.5, на яких видно, що обробка одного дослідного зразка велась різцем, ГРК якого дотична до ОП (рис. 2.5, а), іншого – різцем, ГРК якого розташована по нормалі до ОП (рис. 2.5, б). Матеріал заготовки – сталь 45.

Після обробки дослідних зразків, виконувалось визначення глибини наклепаного шару матеріалу методом ультразвукової дефектоскопії. Методика визначення глибини наклепаного шару матеріалу за допомогою ультразвукового дефектоскопу УЗД-10 наступна:

- 1) підготовка: нанесення контактної рідини (масло індустріальне І-5) на ОП;

- 2) налаштування УЗД-10: робоча частота (7...10 МГц), калібрування пристрою на еталонному зразку;
- 3) сканування: встановити похилий п'єзоелектричний перетворювач та переміщати його по обробленій поверхні дослідного зразка;
- 4) аналіз: по зміні часу пробігу ультразвукової хвилі визначити межу ущільненого шару матеріалу дослідного зразка;
- 5) заключення: розрахунок глибини ущільнення h за формулою:

$$h = v \cdot \frac{t}{2}, \quad (2.3)$$

де v – швидкість звуку у металі, м/с;

t – час проходження відлуння, с.

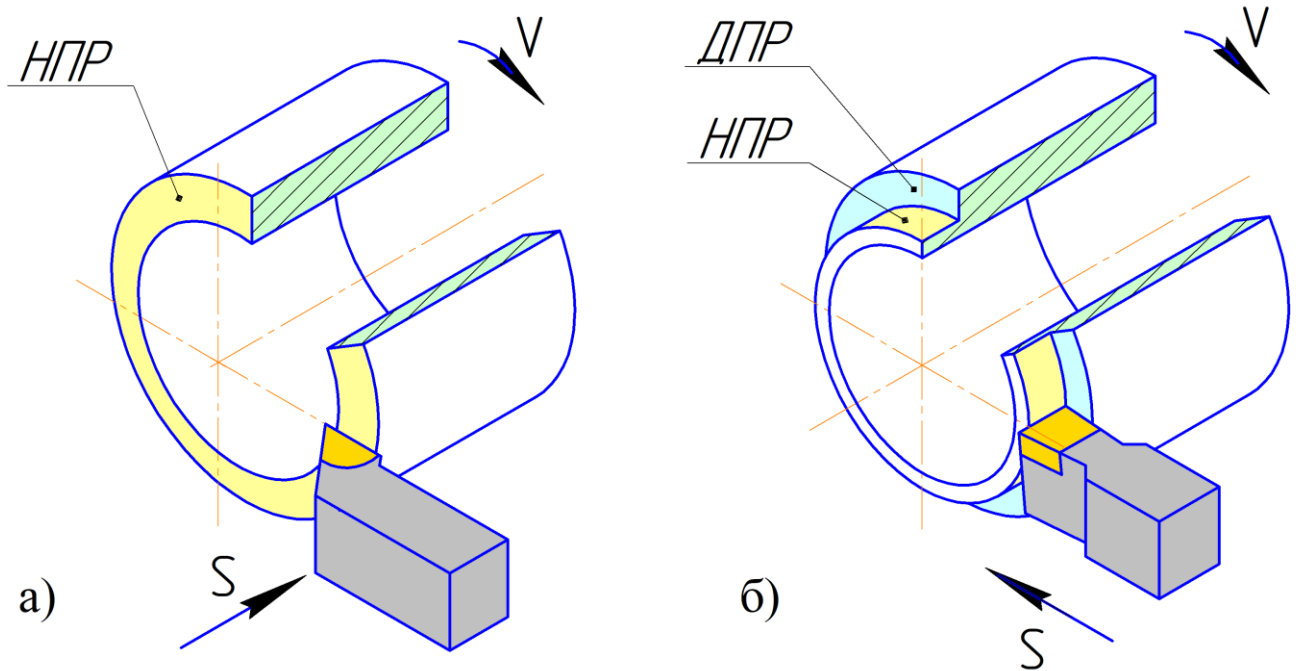


Рис. 2.5 Схеми обробки дослідних зразків при дотичній ГРК інструменту до ОП (а) та при ГРК інструменту розташованій по нормалі до ОП (б).

V – головний рух різання; S – напрямок подачі.

Усі вхідні параметри дослідження представлено у табл. 2.3 зліва, вихідні параметри – справа.

Таблиця 2.3.

Параметри дослідження						
Вхідні				Вихідні		
Назва	Позн.	Од. виміру	Чис. знач.	Назва	Позн.	Од. виміру
дотична ГРК інструменту до ОП						
Частота обертання шпінделя	n	об/хв	500	Шорсткість	R_a	мкм
Подача	S	мм/об	0,1	Відхилення від прямолінійності	—	мм
Глибина різання	t	мм	4	Глибина наклепу	h	мкм
ГРК інструменту розташована по нормалі до ОП						
Частота обертання шпінделя	n	об/хв	500	Шорсткість	R_a	мкм
Подача	S	мм/об	0,1	Відхилення від прямолінійності	—	мм
Глибина різання	t	мм	4	Глибина наклепу	h	мкм

2.6 Висновки та рекомендації по розділу

1. У розділі приводиться методика теоретичного дослідження впливу зміни системи взаємодії РК інструменту та ОП на зменшення поверхневих напружень та спотворень геометричної форми обробленої поверхні.

2. Приводиться методика теоретичного дослідження силового портрету на приводі шпінделя заготовки верстата під час зубофрезерування, яка розглядає вплив силового розмикання кінематичних ланцюгів шпінделя виробу на точність оброблюваної деталі.

3. Сформовано вимоги до моделювання процесів різання при зубофрезеруванні, які забезпечать адекватність модельованих процесів до реальних, наведено схеми різання. На основі розроблених моделей, розроблено методики по дослідженню впливу похибки наладки та встановлення черв'ячної фрези на точність обробки та методику моделювання мікронерівностей.

4. Розроблено методику експерименту для дослідження впливу системи взаємодії РК інструменту із ОП на поверхневі напруження у матеріалі.

Рекомендації: провести теоретичні та експериментальні дослідження процесів різання при зубофрезеруванні згідно розроблених методик.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ

3.1 Допустимі варіанти системи взаємодії різальної кромки і оброблюваного евольвентного профілю

Характерною рисою формоутворення евольвентного зубчастого вінця при механічній обробці класичними, відомими, методами є те, що утворена поверхня являється множиною ліній, які описують у наближенні теоретичний профіль. Тому кожен зуборізний інструмент має визначену форму вихідного профілю, який при обробці в умовах безперервного обкату розповсюджується згідно визначеної закономірності на тіло заготовки, із утворенням (рис. 1.2) евольвентного профілю зубців, перехідної кривої та дна міжзубової западини.

У кваліфікаційній роботі розглядаються два варіанти системи взаємодії РК та ОП, тобто схеми формоутворення евольвентного профілю.

Перша схема відповідає традиційному черв'ячному зубофрезеруванню, за якого утворення евольвентного профілю проходить шляхом послідовних різів заготовки різальними кромками інструменту (черв'ячною фрезою), які розташовуються дотично до ОП, як на рис. 3.1, а.

Друга, альтернативна, схема передбачає утворення евольвентного профілю при переміщенні РК із формоутворюючою точкою на ній, при цьому сама РК розташовується по нормалі до ОП. Сума твірних положень РК, а саме множина положень їх формоутворюючих точок, і утворює в результаті евольвентний профіль, як видно з рис. 3.1, б.

Очевидно, що різні умови формоутворення та саме процесу різання будуть мати різний вплив на точність та якість обробленого евольвентного профілю зубчастого вінця. Особливо це стосується методу традиційного черв'ячного зубофрезерування, при якому, як видно з рис. 3.1, а, РК та ОП співпадають.

На етапі досліджень задаємося визначеннями систем взаємодії різальної кромки інструменту і оброблюваного евольвентного профілю:

- 1) профільна – система, за якої РК інструменту дотична до ОП;
- 2) контурна – за якої РК інструменту розташована по нормалі до ОП.

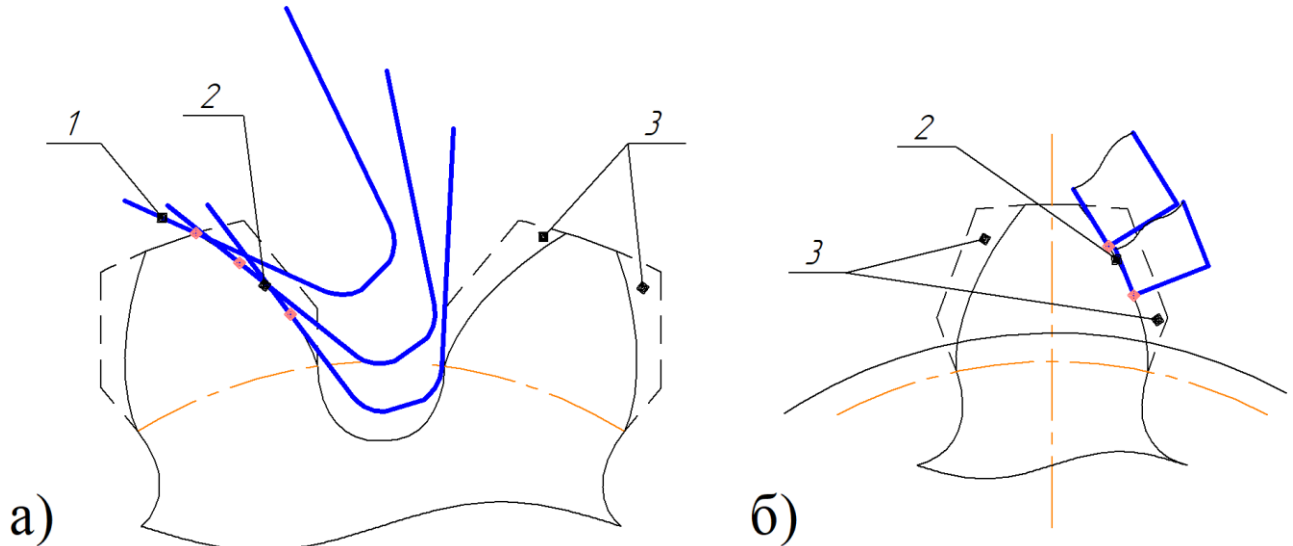


Рис. 3.1 Допустимі варіанти системи взаємодії РК інструменту та ОП

а) профільна система; б) контурна система.

1 – формоутворююча РК; 2 – теоретичний евольвентний профіль; 3 – операційний припуск.

3.1.1 Аналіз впливу допустимих варіантів системи взаємодії РК і оброблюваного евольвентного профілю на сталість процесу різання

Дослідимо вплив системи взаємодії РК і ОП на параметри припуску що зрізається та коливання сил різання, а отже на точність обробки.

В параметричній формі рівняння евольвенти має вигляд [3]:

$$\begin{aligned} y &= r \cdot \sin \varphi - r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi \\ x &= r \cdot \cos \varphi + r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (3.1)$$

де r – радіус основного круга;

φ – кут розгорнутості евольвентного профілю.

Шляхом диференціювання приведенного рівняння (3.1), визначаємо рівняння дотичних та нормалей до евольвенти:

- дотична до евольвентного профілю:

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

- нормаль до евольвентного профілю:

$$(-r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi) \cdot (X - r \cdot \cos \varphi - r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi) + \\ + (r \cdot \cos \varphi + r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi) \cdot (Y - r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi) = 0, \quad (3.3)$$

де X, Y – координати точки при визначенні дотичних чи нормалей, що обумовлюють величину поверхні різання.

Схеми утворення дотичних та нормалей приведено на рис. 3.2.

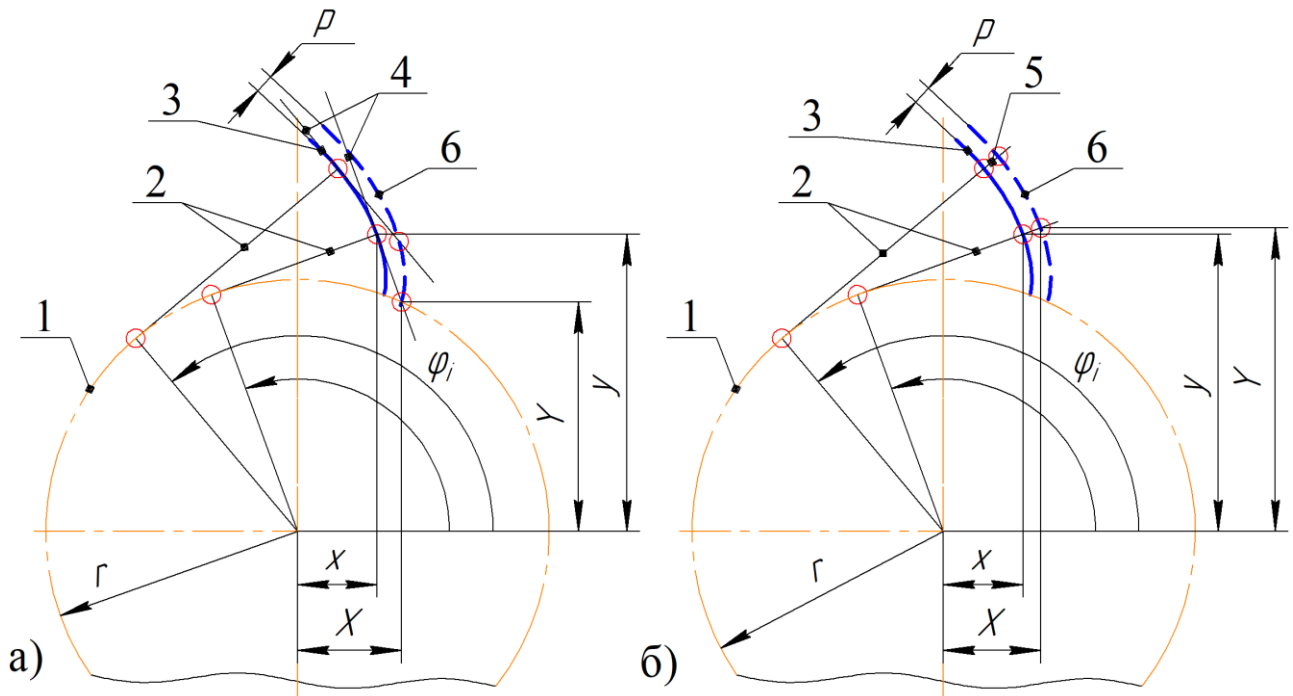


Рис. 3.2 Схема формоутворення евольвентного профілю

а) за профільної системи взаємодії РК та ОП; б) за контурної системи;

1 – основне коло зубчастого вінця; 2 – нормалі до евольвенти; 3 – евольвента;

4 – дотичні до евольвенти, ОП що співпадає з ПР;

5 – нормалі до евольвенти (ОП), які утворюють ПР; 6 – контур припуску;

X, Y – координати точки, що лежить на продовженні нормалей 2 до евольвенти 3;

x, y – координати точки на евольвенті; r – радіус основного кола; p – розмір припуску.

Довжина дотичної до евольвенти, поз. 4, визначається 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 - кут розгорнутості евольвентного профілю набуває значень від $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = \varphi_{max}$.

В свою чергу довжина нормалі, поз. 5, рівна припуску на обробку p .

Як видно зі схеми, рис. 3.2, а, за умов профільної системи взаємодії РК та ОП, значення припуску на обробку будуть коливатися відповідно значення довжини дотичної $Y - y$ в межах кута розгорнутості евольвентного профілю $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = \varphi_{max}$, цим самим викликаючи динамічні коливання сил різання і пружні деформації верстатної технологічної системи. Це все буде мати суттєвий вплив на точність та якість обробки евольвентного профілю.

Стосовно варіанту контурної системи взаємодії РК та ОП значних коливань припуску на обробку p не спостерігається. Такий варіант посприє зменшенню динамічних навантажень під час обробки, тим самим підвищивши якість та точність обробленого евольвентного профілю.

3.1.2 Аналіз схем різання допустимих варіантів системи взаємодії різальної кромки і оброблюваного евольвентного профілю

Для здійснення аналізу профільної та контурної систем, слід навести декілька припущень:

- 1) під час обробки, робочий рух виконується перпендикулярно до різальної кромки, для обох систем;
- 2) переміщення ОП відбувається у двох напрямках, взаємно перпендикулярних:
 - а) тангенціальний напрямок переміщення S_t – обертання навколо геометричної вісі евольвентної поверхні;
 - б) радіальний напрямок переміщення S_r – перпендикулярно до тангенціального напрямку переміщення S_t ;
- 3) усі перелічені вектори переміщень мають змогу додаватися лиш при паралельності (або наближеності до паралельності) напрямків та не мають змоги – при перпендикулярності (або наближеності до перпендикулярності);

4) взаємодія паралельних векторів (або наближених до паралельності) визначається як:

- а) попутна, при співпадінні напрямків;
- б) зустрічна, при не співпадінні напрямків.

Відповідно до обумовлених варіантів системи взаємодії різальної кромки і оброблюваного евольвентного профілю та прийнятих припущень, розглянемо схеми рис. 3.3 ...3.5

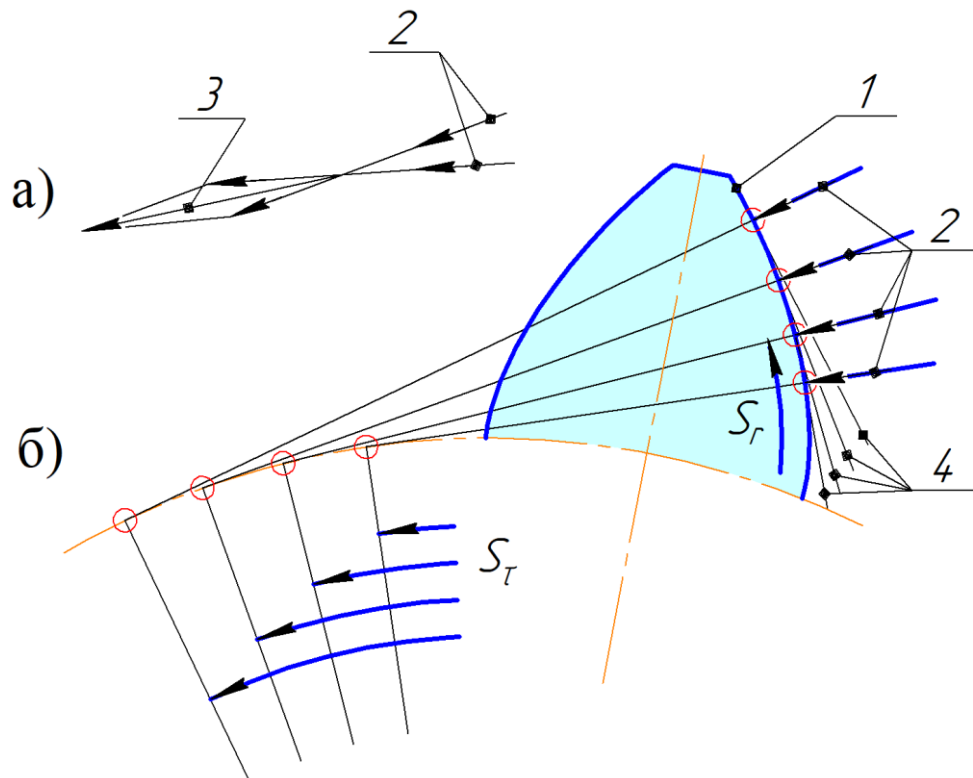


Рис. 3.3 Взаємодія РК та лівого евольвентного профілю за умов профільної системи

- а) схема взаємодії векторів; б) розташування векторів при обробці;
- 1 – евольвентний профіль оброблюваного зубця; 2 – вектори переміщення РК;
- 3 – рівнодіючий вектор переміщень РК; 4 – сліди положень РК при обробці профілю;
- S_τ – вектор тангенціального напрямку переміщення ОП;
- S_r – вектор радіального напрямку переміщення ОП.

На схемі рис. 3.3 видно, що профільна система взаємодії РК та ОП, при обробці лівого евольвентного профілю утворює попутну взаємодію, з огляду на співпадіння напрямків векторів що взаємодіють – тангенціального переміщення ОП S_τ та рівнодіючого вектору переміщення РК (поз. 3).

В свою чергу, на рис. 3.4 показано, як за профільної системи взаємодії РК та ОП, при обробці правого евольвентного профілю утворюється зустрічна взаємодія. Як видно, напрямки дії векторів S_r та рівнодіючого вектору переміщення РК (поз. 3) не співпадають.

Отже, в межах однієї міжзубової западини мають місце різні умови різання. Таке явище є джерелом різних по характеру спотворень ОП правого і лівого евольвентних профілів, по причині різних умов стружкоутворення.

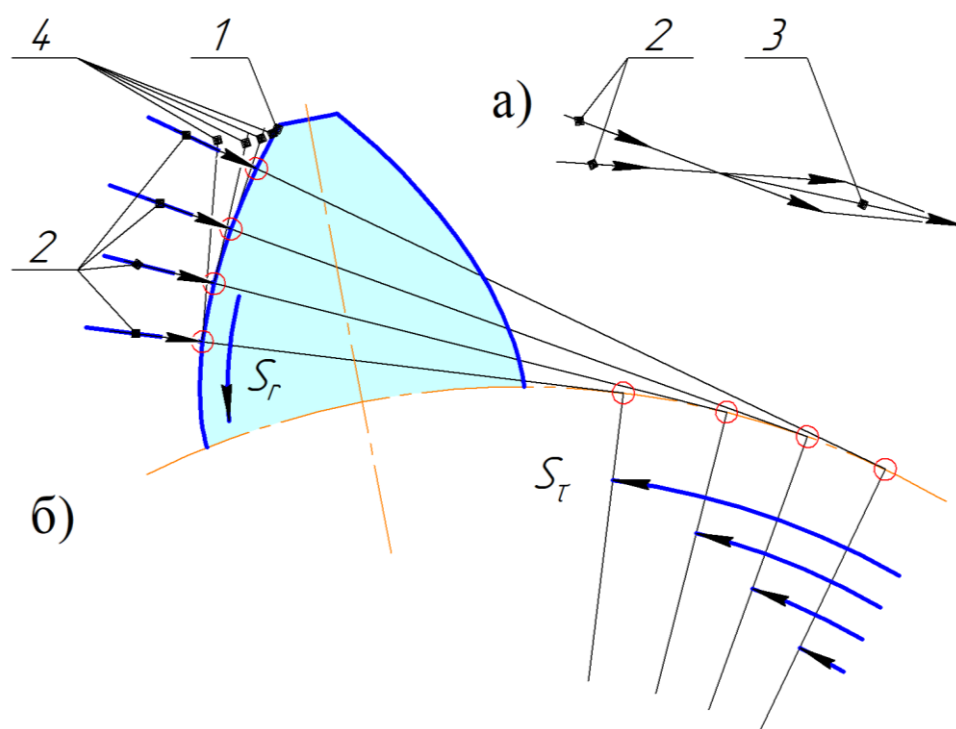


Рис. 3.4 Взаємодія РК та правого евольвентного профілю за умов профільної системи

- а) схема взаємодії векторів; б) розташування векторів при обробці;
 1 – евольвентний профіль оброблюваного зубця; 2 – вектори переміщення РК;
 3 – рівнодіючий вектор переміщень РК; 4 – сліди положень РК при обробці профілю;
 S_t – вектор тангенціального напрямку переміщення ОП;
 S_r – вектор радіального напрямку переміщення ОП.

Взаємодію векторів при контурній системі показано на рис. 3.5. Як видно, взаємодіють вектори переміщення РК (поз. 1) та вектори радіального напрямку переміщення ОП S_r . Такій системі не притаманні недоліки профільної, так як забезпечуються еквівалентні умови різання. Це дає змогу прогнозувати однаковий характер спотворень евольвентних профілів в межах однієї міжзубової западини.

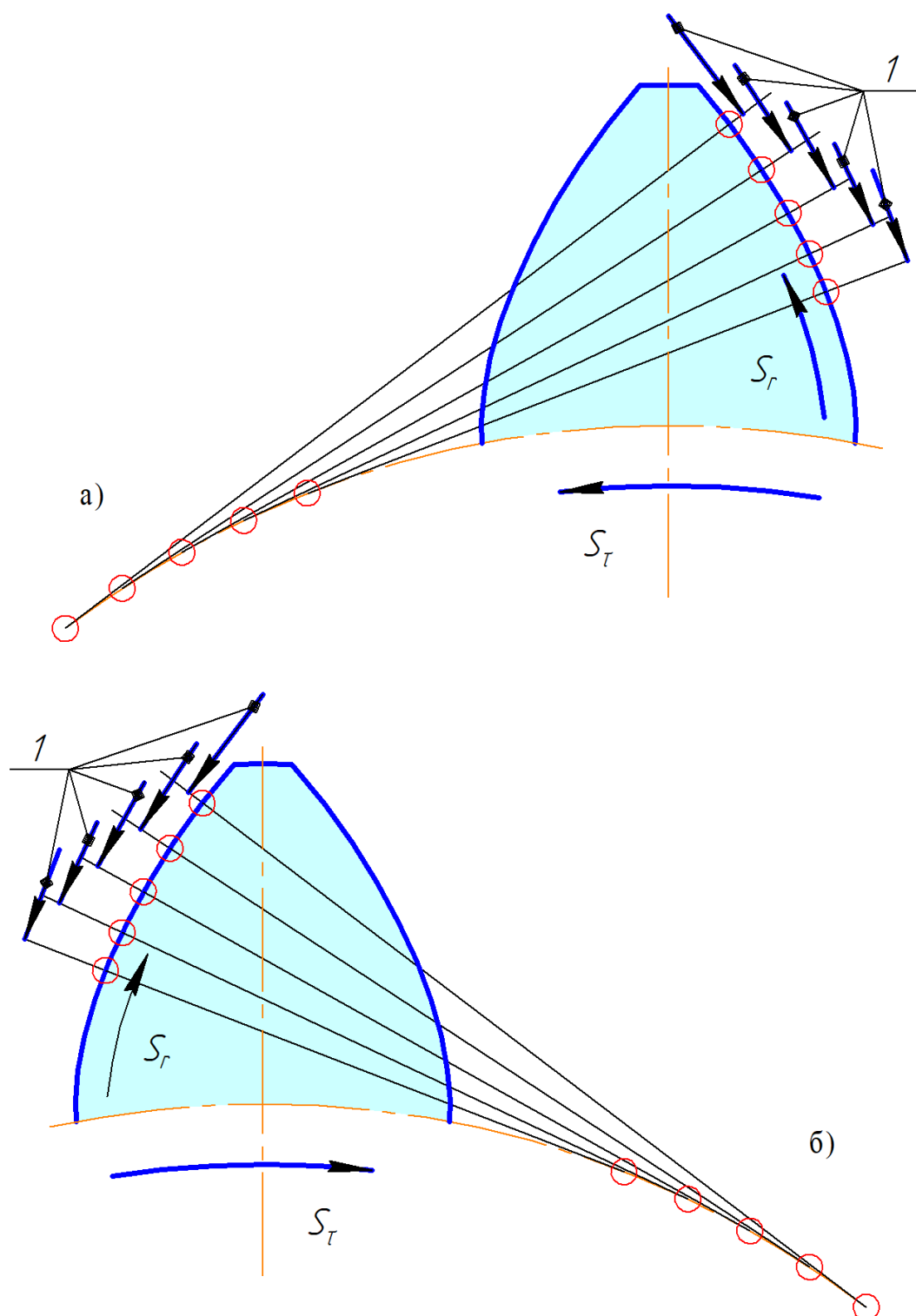


Рис. 3.5 Взаємодія РК та оброблюваних евольвентних профілів за умов контурної системи взаємодії

а) оброблювана евольвентна поверхня ліва; б) оброблювана евольвентна поверхня права
 1 – вектори переміщення РК; S_r – вектор тангенціального напрямку переміщення ОП;
 S_r – вектор тангенціального напрямку переміщення ОП.

3.2 Аналіз шляхів зменшення поверхневих напружень та спотворень геометричної форми обробленої поверхні

Дослідження проводилось згідно методики, що описана у р. 2.2.

Визначення напружень у поверхневому шарі НПР та ДПР виконуються по формулам (2.1) і (2.2), згідно значень граничних напружень $\sigma_{ст}$ та $\tau_{зс}$:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{320^2 + 4 \times 125^2} = 406,079 \text{ МПа};$$

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{125^2 + 125^2} = 176,776 \text{ МПа}.$$

Отже, згідно розрахунків, різниця в поверхневих напруженнях на НПР та ДПР сягає близько 2,3 разів.

Головна проблема таких поверхневих напружень на НПР це вплив їх на точність при суміщенні із оброблюваним евольвентним профілем, тобто із функційною поверхнею. Так як більшість зубчастих коліс додатково до механічної підлягають термічній обробці, під час якої відбувається знаття напружень і пластична деформація поверхні, то гостро постає питання втрати точності евольвентного профілю, яка може виходити за межі вимог конструкторської документації. Втрати точності по параметрам евольвентного профілю в наслідок зняття поверхневих напружень під час хіміко-термічної обробки можуть сягати 2..3 квалітетів[28].

Одним із способів розв'язання цієї проблеми є відокремлення НПР від оброблюваної функційної поверхні, натомість суміщення останньої із ДПР. Таке положення створює підґрунтя для створення принципово нових схем механічної обробки евольвентних зубчастих коліс.

Розглянемо результати та висновки дослідження предметно, на прикладі традиційних методів обробки зубчастих коліс – методами черв'ячного зубофрезерування та зубодовбання дисковими довбачами. Обробці обумовленими методами характерні високі значення сил різання [15, 28, 31, 35, 38], а розташування РК вихідного профілю інструменту відповідає профільній системі (РК дотична до ОП), тобто евольвентна поверхня являється як функційною, так і НПР. Оброблена такими методами евольвентна поверхня під

час термічної обробки зазнає зняття поверхневих напружень та втрати геометричної точності профілю.

По переліченим причинам, перспективним має стати метод механічної обробки евольвентних зубчастих коліс, за якого ОП буде відділена від ПР, тобто евольвентна поверхня замість НПР буде відповідати якостям ДПР, що допоможе уникнути нормальних поверхневих напружень на ОП.

На схемі рис. 3.6, а приведено, для порівняння, схему формоутворення при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні, на якій видно суміщення НПР із функційною поверхнею.

На рис. 3.6, б приведено можливий варіант реалізації пропонованої схеми формоутворення.

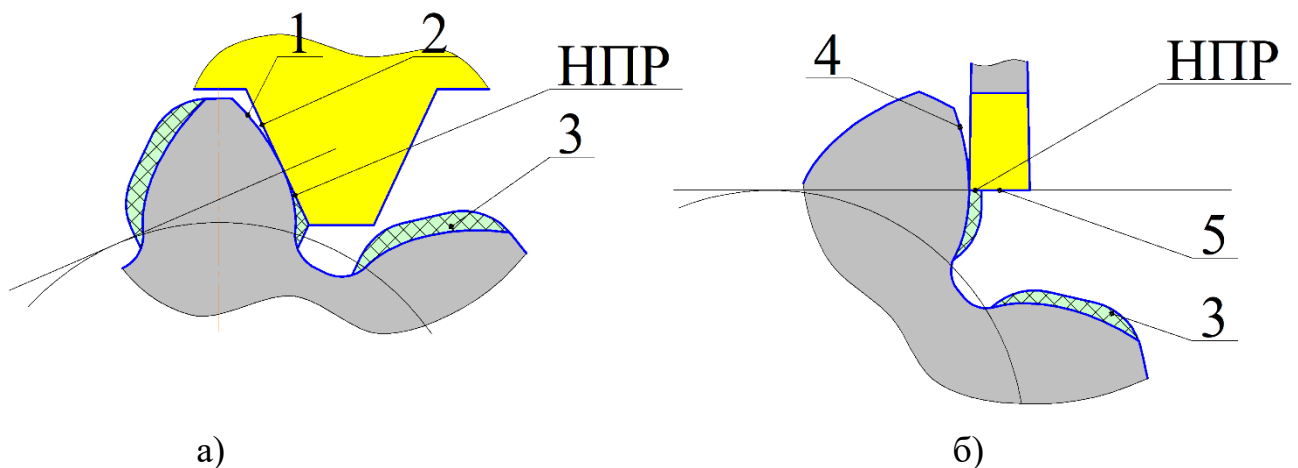


Рис. 3.6 Утворення НПР при зубофрезеруванні

а) суміщення НПР із функційною евольвентною поверхнею при черв'ячному зубофрезеруванні; б) варіант відокремлення НПР від функційної поверхні.

1 – оброблена евольвентна поверхня за умов суміщення із НПР; 2 – бічна РК зубця фрези, яка взаємодіє з НПР; 3 – припуск на обробку; 4 – оброблена евольвентна поверхня в умовах суміщення із ДПР; 5 – РК інструмента, що утворює НПР в зоні припуску.

На схемі рис. 3.6, б показано як реалізовано процес розподілення ОП та ПР. Характерною відмінністю такого методу є розташування РК зубця фрези нормально до оброблюваної поверхні (контурна схема) та огинання оброблюваного евольвентного профілю по контуру під час обробки.

3.3 Аналіз силового портрету на приводі шпинделя заготовки верстата під час зубофрезерування та можливостей зниження похибок

Дослідження проводиться згідно з методикою, що описана у р. 2.3.

На рис. 2.2 показано послідовні ключові положення при обробці однієї міжзубової западини циліндричного зубчастого колеса та умови, в яких працює верстатна система, а саме:

- обробка лівого евольвентного профілю, робота в умовах силового розмикання (рис. 2.2, а);
- обробка двома бічними різальними кромками одночасно, робота в умовах силової невизначеності (рис. 2.2, б);
- обробка правого евольвентного профілю, робота в умовах силового замикання (рис. 2.2, в).

Характерною особливістю черв'ячного зубофрезерування є те, що плече прикладення сили різання не змінюється в залежності від позиції формоутворення інструменту, а сила різання діє нормально до різальної кромки. Сама ж схема формоутворення являється профільною.

Така схема має суттєвий вплив на точність обробки. Зміна напрямку дії сил різання та силове розмикання верстатної системи (рис. 2.2, а) викликає кінематичні похибки оброблюваного зубчастого вінця, неконтрольовані коливання та нестійкість процесу різання.

В свою чергу, при обробці зубчастого колеса методом, який відтворює контурну систему взаємодії РК інструменту та ОП, напрямок сили різання відносно деталі від методу черв'ячного зубофрезерування, також змінюється і плече прикладення (рис. 2.3). Даному методу не характерна зміна вектора сил різання в межах однієї міжзубової западини та силове розмикання верстатних систем. Черв'ячна ділильна передача шпинделю стола верстата працює послідовно правими та лівими профілями, з огляду на почергову обробку протилежних профілів зубчастого вінця деталі в умовах силового замикання.

Отже, у висновку, при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні в умовах силового замикання виконується обробка лише одного, вхідного

евольвентного профілю, на який не діють супутні похибки (відхилення евольвентного профілю оброблюваного колеса). В той час як при обробці методом, який відтворює контурну систему взаємодії РК та ОП, в умовах силового замикання оброблюються обидва профілі, по чергово, та не зазнають похибок кінематики.

Зазори, що утворюються в процесі обробки від силового розмикання, компенсуються різними технічними рішеннями у конструкціях зубофрезерних верстатів. Однак переважна більшість рішень ускладнюють конструкцію, знижують надійність вузла та мають свої недоліки. Сучасні верстати із елементами прямого приводу робочих органів [22, 41], зокрема шпінделя виробу [21, 34, 40], позбавлені недоліків черв'ячного приводу (але не впливу зміни напрямку дії навантажень), однак підприємства все ще мають у своєму верстатному парку значну кількість верстатів класичної конструкції із механічними передачами.

Саме тому рекомендується застосування методу, що відтворює контурну схему формоутворення і взаємодії РК та ОП, для обробки на верстатах традиційної конструкції, та чистової обробки зубчастих коліс в умовах силового замикання для отримання якісних деталей.

3.4 Моделювання процесів різання при черв'ячному зубофрезеруванні

3.4.1 Аналіз впливу похибки наладки та встановлення черв'ячної фрези на точність оброблюваної поверхні в умовах моделювання

Джерелами переважної більшості похибок, які виникають в процесі зубофрезерування, являються похибки пов'язані із різальним інструментом або заготовкою [4].

За напрямком дії у просторі, похибки умовно можна поділити на:

- радіальні, що утворюються шляхом зміни відстані верстатного зачеплення (міжцентрової відстані);
- тангенціальні, утворюються як результат нерівномірності колової подачі;

- осові, що утворюються в повздовжньому напрямку вісі шпінделя заготовки зубофрезерного верстата.

У розділі розглядається вплив радіальних похибок.

У випадку, якщо черв'ячна фреза має радіальне биття під час обробки, утворюється додаткове або недостатнє зміщення вихідного контуру евольвентного контуру. Це зміщення має певну періодичність, та в повній мірі відображається на точності обробленого евольвентного профілю.

Моделювання радіальної похибки виконувалось згідно вимогам р. 2.4.1 та методики р. 2.4.2. Результатом моделювання стала порівняльна схема рис. 3.7.

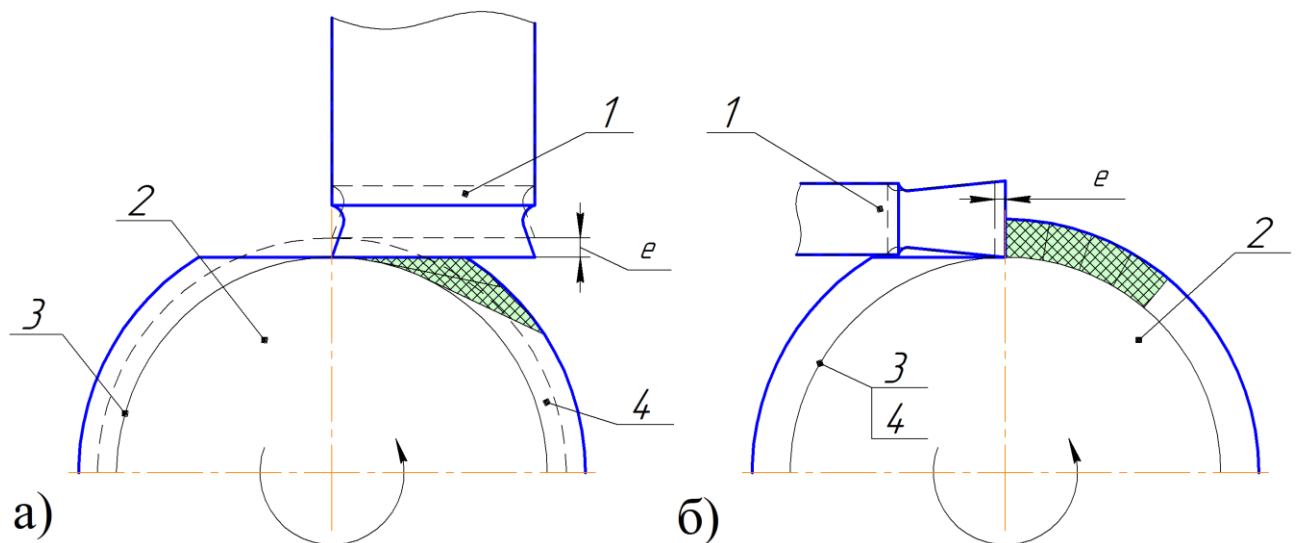


Рис. 3.7 Змодельована схема утворення радіальної похибки

а) модель профільної системи взаємодії РК та ОП; б) модель контурної системи.
 1 – профіль різального інструменту; 2 – оброблювана деталь; 3 – теоретичний профіль деталі;
 4 – отриманий профіль деталі; e – величина періодичного зміщення різального інструменту,
 яка відтворює радіальне биття черв'ячної фрези.

Як видно, у моделі рис. 3.7, радіальне биття фрези відтворюється періодичним зміщенням різального інструменту на величину e .

Модель, що відтворює схему формоутворення традиційного черв'ячного зубофрезерування, рис. 3.7, а, зазнає повноцінного впливу радіального биття інструменту на оброблену поверхню.

При зміні системи взаємодії РК та ОП на контурну (рис. 3.7, б), відбувається перенос ПР в зону припуску, а також ліквідується вплив радіального биття черв'ячної фрези на оброблену поверхню.

3.4.2 Аналіз характеру мікронерівностей, які виникають в результаті обробки методами черв'ячного зубофрезерування в умовах моделювання

Моделювання мікронерівностей на ОП виконувалось згідно вимогам р. 2.4.1 та методики р. 2.4.3. Результатом моделювання стала порівняльна схема рис. 3.8.

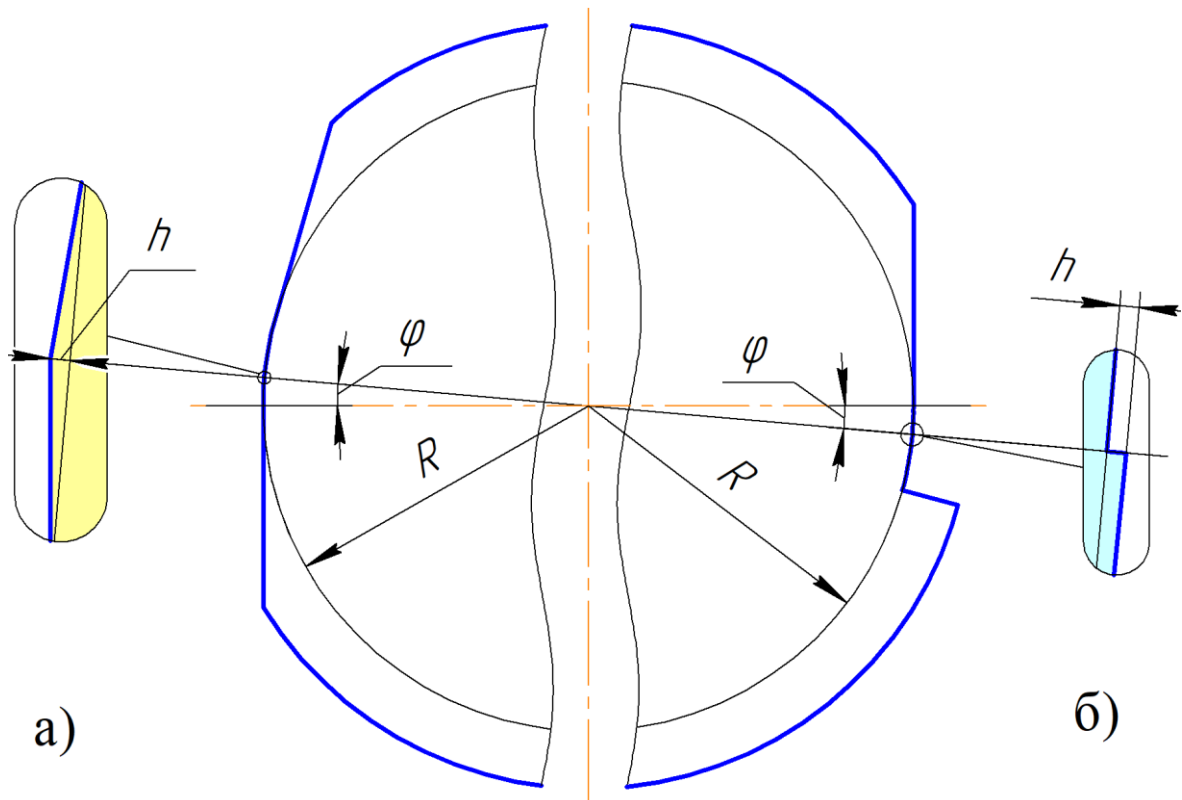


Рис. 3.8 Змодельована схема залишкових мікронерівностей

а) модель профільної системи взаємодії РК та ОП; б) модель контурної системи.
 R – радіус теоретичного профілю деталі; h – висота залишкових мікронерівностей;
 φ – кут, що відповідає коловій подачі шпінделя заготовки зубофрезерного верстату.

Для моделі профільної системи взаємодії РК та ОП, що відтворює традиційне черв'ячне зубофрезерування, висота мікронерівностей буде рівна:

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

Для моделі контурної системи взаємодії РК та ОП, висота мікронерівностей буде рівна:

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

По отриманим формулам (3.5) та (3.6) можна зробити наступні висновки. Отримання рівної величини залишкових мікронерівностей для обох модельованих методів можливе за умови зменшення кругової подачі вдвічі для методу, що моделює контурну систему взаємодії РК та ОП [24] (згідно табл. 2.1). За умов профільної системи вплив колової подачі (кута φ , що відповідає коловій подачі шпінделя заготовки зубофрезерного верстату) на висоту залишкових мікронерівностей зменшено вдвічі.

3.5 Реалізація методу черв'ячно-контурного зубофрезерування, заснованого на контурній системі взаємодії різальної кромки та оброблюваної поверхні

Пропонований до реалізації метод черв'ячно-контурного зубофрезерування схожий із традиційним черв'ячним зубофрезеруванням, однак з деякими ключовими відмінностями.

По перше, метод може виконуватися лише на заготовках із обробленою міжзубовою западиною, припуск при цьому розташовується виключно на евольвентній частині зубця шестерні. Тобто, це виключно чистовий або напівчистовий вид обробки.

По друге, головною відмінністю є спосіб формоутворення та геометрія інструменту. Для реалізації методу черв'ячно-контурного зубофрезерування необхідна черв'ячна фреза, яка працює сукупністю РК, що розміщені по гвинтовій лінії, крок якої дорівнює кроку оброблюваного зубчастого колеса по дузі основного кола, що розраховується по формулі, мм:

$$P = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha, \quad (3.7)$$

де m – модуль оброблюваного зубчастого колеса, мм;

α – кут зачеплення, град.

Відносно оброблюваної деталі, РК зубця черв'ячно-контурної фрези розміщується на продовженнях радіусів кривизни оброблюваної евольвенти,

тобто по нормалі до неї. Завдяки такому розташуванню, ПР не співпадає з евольвентною ОП.

На рис. 3.9 приведено схеми формоутворення евольвентного профілю методом черв'ячно-контурного зубофрезерування. На ілюстрації рис. 3.9, б видно, як початкова точка різальної кромки фрези під час руху утворює теоретичний евольвентний профіль зубчастого колеса. Схеми виконані із деяким спрощенням, для детального відображення саме руху формоутворення, так як реальний процес різання при черв'ячному зубофрезеруванні складний та тривимірний і відобразити його на рисунках графічно складно.

Кінематика процесу черв'ячно-контурного зубофрезерування аналогічна до традиційного черв'ячного зубофрезерування – рухи обертання інструмента та заготовки пов'язані, та мають чітке співвідношення. Ці рухи аналогічні до кінематики черв'ячної передачі, а співвідношення описуються виразом:

$$i = \frac{k}{z}, \quad (3.8)$$

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

z – число зубців оброблюваного колеса.

Тобто, за один оберт однозахідної черв'ячно-контурної фрези заготовка повинна здійснити поворот на один зубець.

Також, аналогічно до традиційного черв'ячного зубофрезерування, інструментальний шпіндель із встановленою черв'ячно-контурною фрезою, необхідно повернути на кут θ , який визначається в залежності від кута нахилу гвинтової лінії фрези ω :

$$\theta = 90^\circ - \omega, \quad (3.9)$$

де ω - кут нахилу гвинтової лінії фрези, град.

Схема встановлення черв'ячно-контурної фрези показана на рис. 3.10

Так як обробка зубчастого колеса ведеться за дві позиції (почергова обробка правих та лівих евольвентних профілів), має сенс встановлювати на оправку фрезерного шпінделя одразу комплект із двох однакових черв'ячно-контурних фрез, одну з яких встановлювати обернено до іншої.

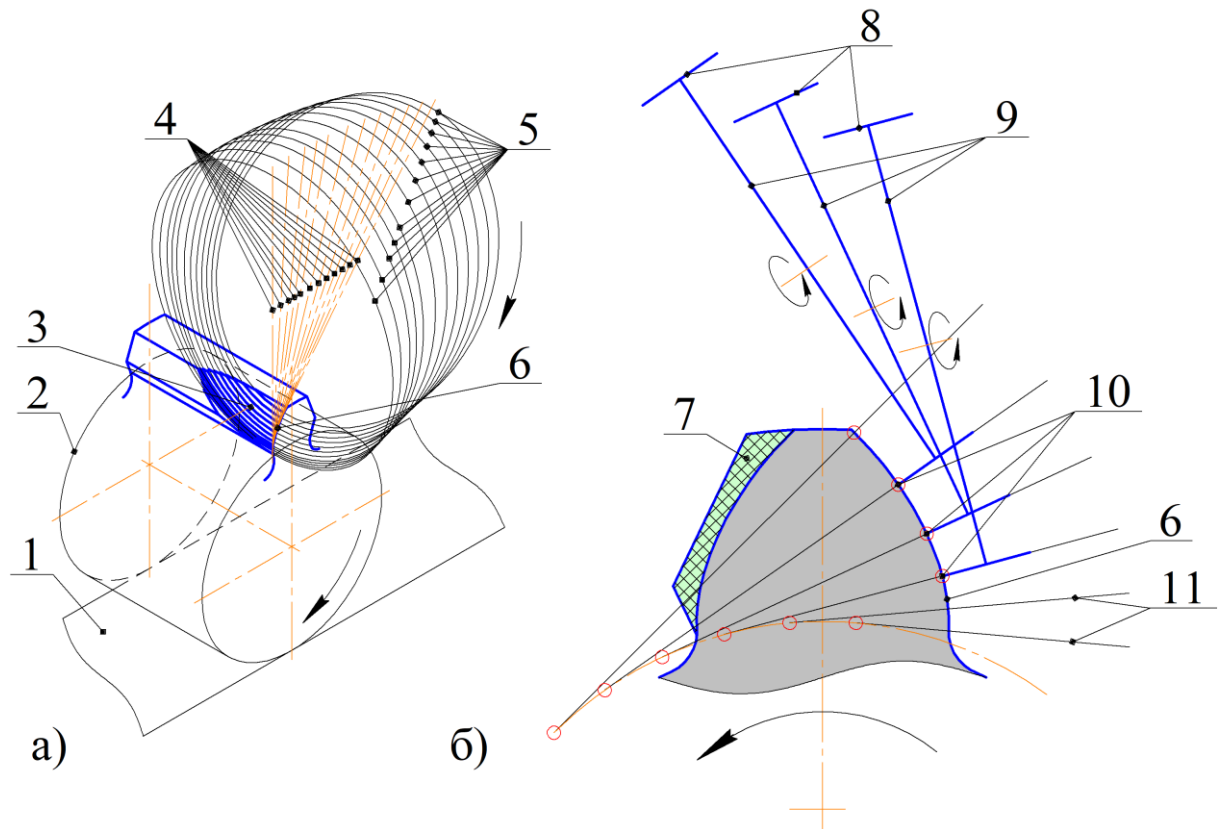


Рис. 3.9 Реалізація контурної схеми різання
при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні

а) рух формуючої РК, що описує теоретичну евольвенту шестерні (обертний рух обкату замінено на прямолінійний, для спрощення); б) нормальний переріз схеми;
1 – площина обкату, дотична до основного циліндра; 2 – основний циліндр; 3 – ОП;
4 – вісі, що утворюють площину нормального перерізу; 5 – множина колових траєкторій руху початкової точки формуючої РК інструменту; 6 – теоретичний евольвентний профіль; 7 – припуск на обробку; 8 – положення формуючої РК інструменту;
9 – положення інструменту, спрощено; 10 – положення початкових точок формуючих РК інструменту; 11 – продовження радіусів кривизни теоретичного евольвентного профілю.

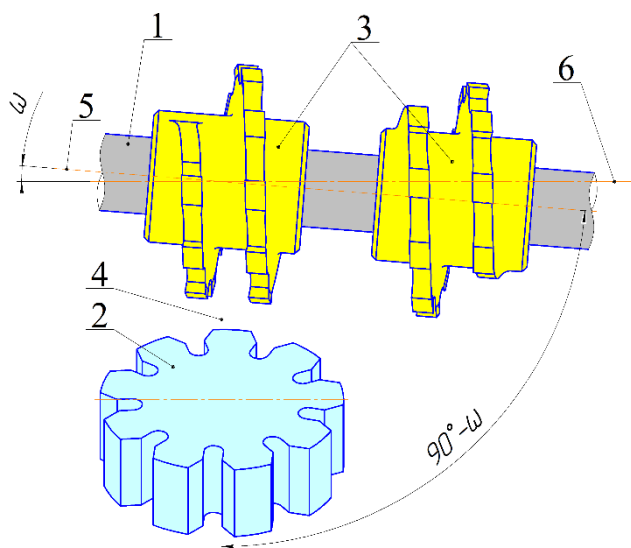


Рис. 3.10 Схема налагодження
черв'ячно-контурної фрези
з врахуванням кута підйому
гвинтової лінії

1 – оправка фрезерного супорта;
2 – оброблювана заготовка; 3 – комплект із
двох черв'ячно-контурних фрез;
4 – вісь обертання заготовки;
5 – вісь обертання фрезерної оправки;
6 – вихідне положення вісі;
 ω - кут нахилу гвинтової лінії фрези.

На першій позиції обробляються, наприклад, усі праві евольвентні профілі зубчастого колеса, із повздовжнім переміщенням, наприклад, вниз, виконується обробка першою черв'ячно-контурною фрезою з комплекту, як показано на рис. 3.11.

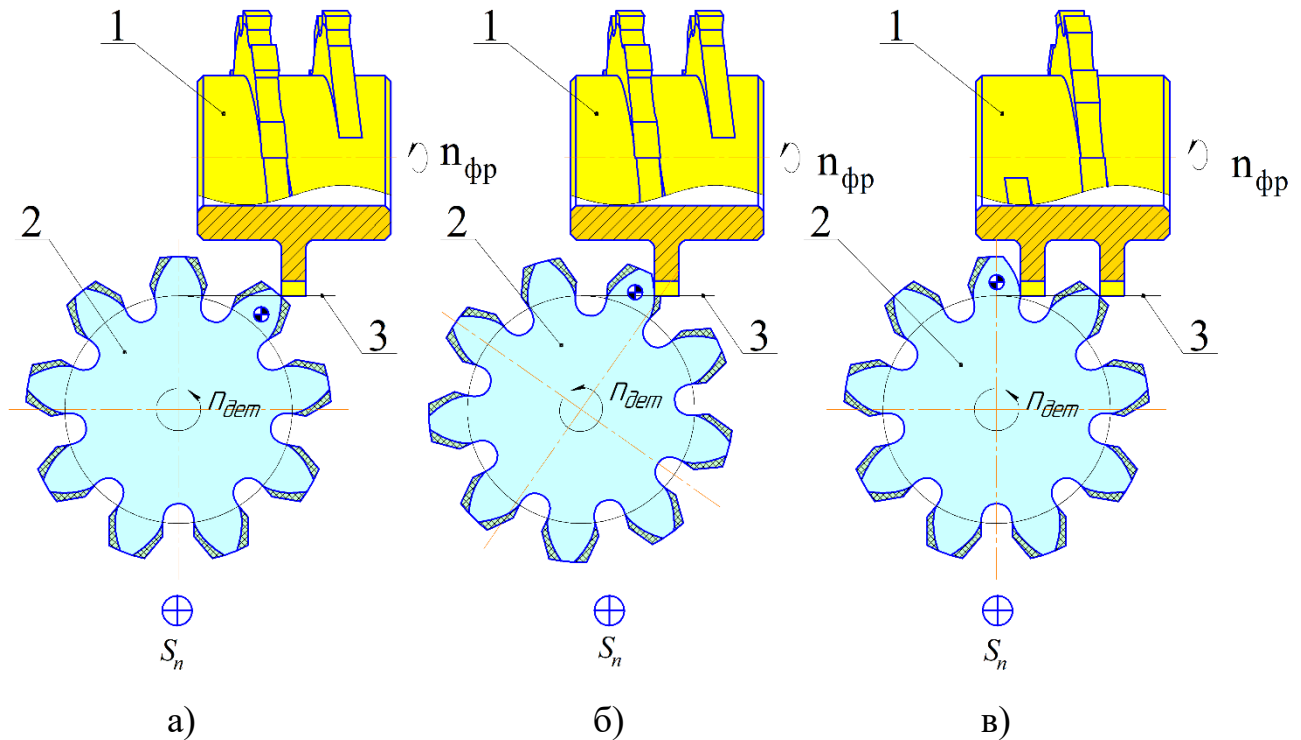


Рис. 3.11 Схема обробки заготовки на першій позиції

а) етап врізання інструменту на вершинці зубця деталі; б) етап формоутворення евольвентного профілю; в) кінцевий етап формоутворення евольвентного профілю.
1 – фреза; 2 – заготовка; 3 – продовження радіусу кривизни евольвенти зубчастого колеса;
 $n_{фр}$ – обертання інструменту; $n_{дет}$ – обертання заготовки; S_n – повздовжня подача.

По завершенні обробки, необхідно виконати переміщення інструментального супорту на другу позицію, на довжину L , для здійснення обробки встановленою протилежно фрезою. При цьому обробляються протилежні евольвентні профілі деталі (наприклад, ліві), а повздовжнє переміщення відбувається в протилежному напрямку (наприклад, знизу в гору). Також зміні підлягають напрямки обертання фрези і заготовки (рис. 3.12).

Обробка зубчастих коліс пропонуваним методом можлива як на класичних верстатах із механічними ланцюгами, так і на сучасних зубофрезерних верстатах з ЧПУ [10, 11].

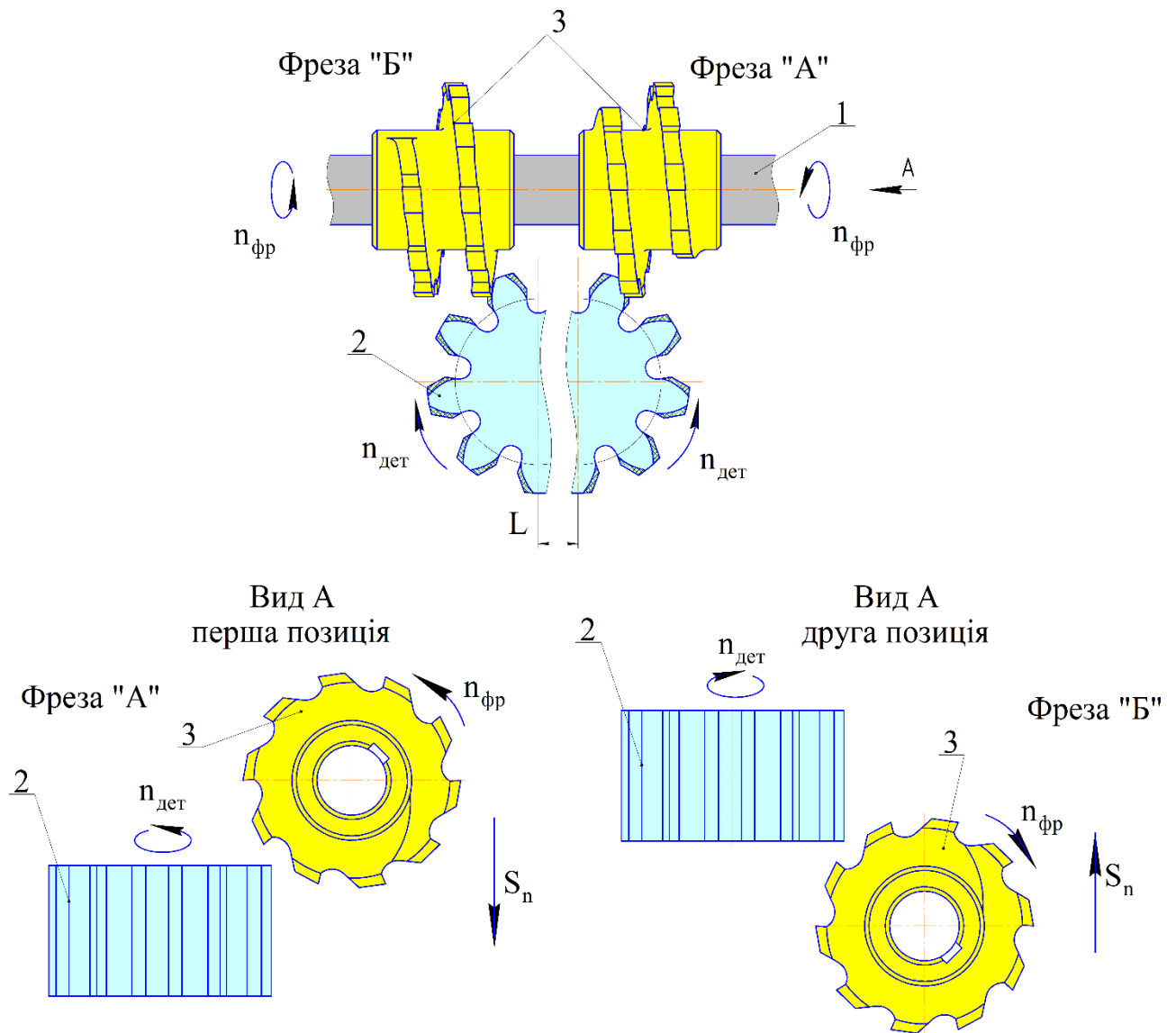


Рис. 3.12 Схема робочих переміщень та рухів

під час обробки методом черв'ячно-контурного зубофрезерування

1 – фрезерна оправка; 2 – оброблювана заготовка; 3 – черв'ячно-контурні фрези;
 $n_{\text{фр}}$ – напрямок обертання фрези; $n_{\text{дет}}$ – напрямок обертання деталі; S_n – повздовжня подача;
 L – переміщення інструменту на другу позицію.

На рис. 3.13 приведено евольвентограми, записані з зубчастого колеса, обробленого методом черв'ячно-контурного зубофрезерування. Як видно, протилежні профілі зубця мають схожий характер спотворень геометричної форми. Це результат обробки протилежних профілів в подібних умовах різання.

У додатку А приведено повний протокол замірів обумовленої деталі, обробленої способом черв'ячно-контурного зубофрезерування.

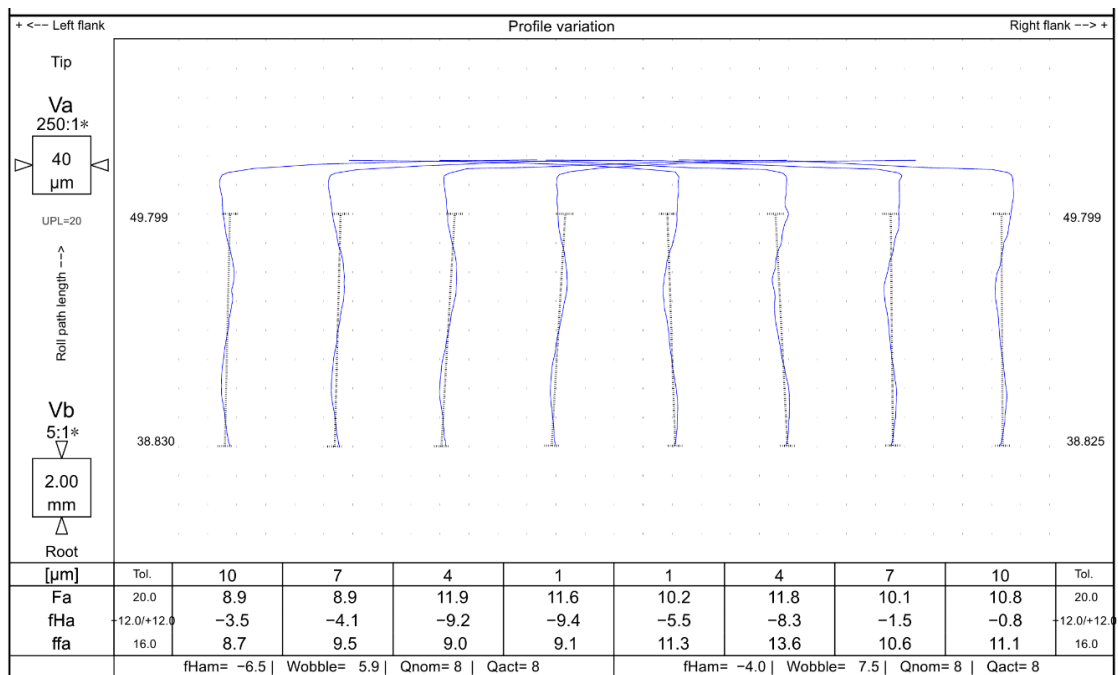


Рис. 3.13 Евольвентограма зубчастого колеса, обробленого методом черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Запропонований метод черв'ячного-контурного зубофрезерування рекомендований до застосування при обробці шестерень до шестеренних насосів та моторів що працюють у реверсивному режимі, тому особливо чутливі до похибок евольвентного профілю протилежних зубців [7].

3.6 Висновки та рекомендації по розділу

1. У розділі проведено ряд теоретичних досліджень, та досліджень в умовах моделювання з метою аналізу взаємодії РК інструменту та ОП у профільній та контурній системі взаємодії. Виявлено, що застосування контурної системи взаємодії РК та ОП для створення способів зубофрезерування може мати в перспективі ряд переваг, зокрема:

- зменшення поверхневих напружень на оброблених евольвентних поверхнях у ~2,3 разів, що також зменшить спотворення поверхонь після хіміко-термічної обробки та зняття обумовлених поверхневих напружень;
- виконання обробки в умовах силового замикання верстатної системи при обробці обох евольвентних профілів міжзубової западини шестерні, в

наслідок чого – зменшення похибок при обробці та забезпечення однакових умов різання для протилежних профілів;

- зменшення впливу радіальної похибки встановлення інструменту на точність обробки оброблюваного евольвентного профілю.

Однак, для забезпечення якості (висоти мікронерівностей) хоча б на рівні із традиційним черв'ячним зубофрезеруванням, є необхідність у зменшенні колової подачі для черв'ячно-контурного зубофрезерування як мінімум вдвічі.

2. Здійснено огляд та запропоновано реалізацію обробки зубчастих коліс методом черв'ячно-контурного фрезерування комплектом з двох черв'ячно-контурних фрез. Пропонованим методом виконується напівчистова та чистова обробка евольвентних зубчастих коліс, можлива обробка як на класичних зубофрезерних верстатах, так і на сучасних із ЧПУ. Метод реалізується на основі контурної системи взаємодії РК та ОП. Запропонований метод черв'ячного-контурного зубофрезерування рекомендований до застосування при обробці шестерень до шестеренних насосів та моторів що працюють у реверсивному режимі

Рекомендації:

1. Виявлені в процесі дослідження закономірності можуть використовуватися у дослідженнях процесів різання при зубофрезеруванні, при розробці нових методів зубофрезерування, інструменту та при дослідженні шляхів покращення точності та якості обробки зубчастих коліс.

2. З огляду на можливість силового розмикання у черв'ячних передачах у ділильних парах шпінделів заготовки, при конструюванні нових вузлів зубофрезерних верстатів варто надавати перевагу сучасним мехатронним системам із сервоприводами та системам прямого приводу.

3. Методики, розроблені для даного дослідження, можуть бути використані для майбутніх досліджень процесів різання.

4. Провести експериментальне дослідження впливу системи взаємодії РК та ОП на спотворення оброблюваного номінального профілю.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ

4.1 Результати експериментальних досліджень процесів різання

Дослідження проводилось для перевірки теорії, яка описана в р. 3.2. Дослідний зразок було оброблено згідно методики, що приведена у в р. 2.5, та згідно схем різання, рис. 2.5. Отримані поверхні показано на рис. 4.1.

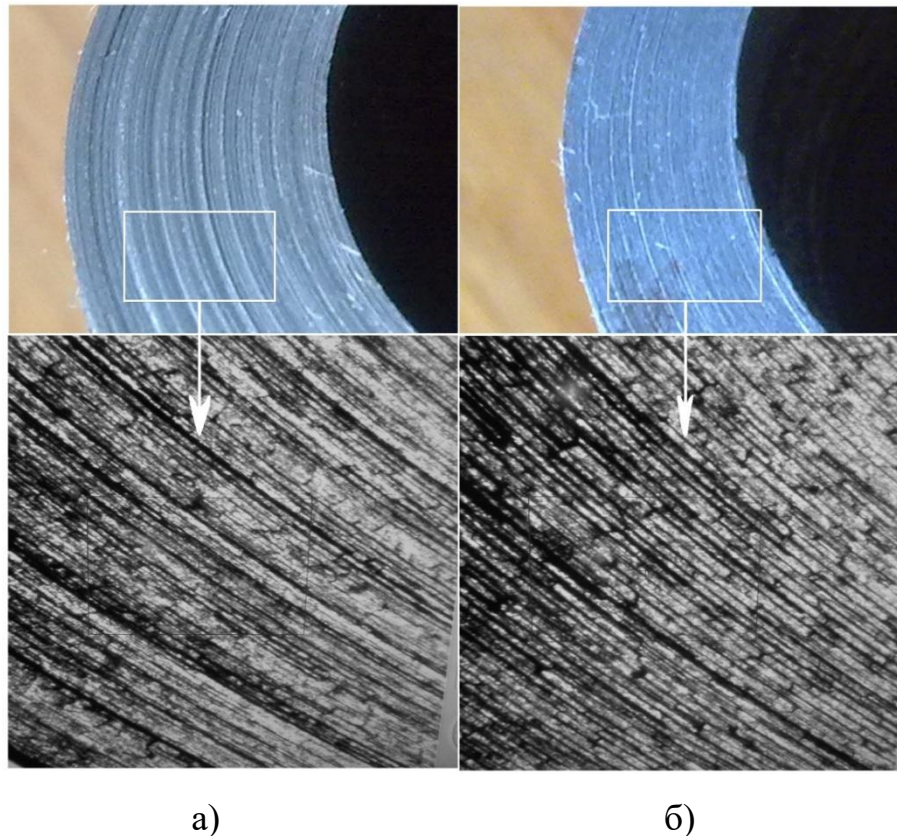


Рис. 4.1 Оброблені поверхні дослідного зразка

- а) обробка дотичною ГРК інструменту до ОП;
б) обробка ГРК інструменту розташованою по нормалі до ОП.

Аналіз отриманих поверхонь на інструментальному мікроскопі показав, що:

- поверхня по рис. 4.1, а має шорсткість $Ra = 3,6$ мкм, поверхня хвиляста, має макро-нерівності;
- поверхня по рис. 4.1, б має шорсткість $Ra = 1,25$ мкм, не має різких перепадів, структура стабільна та організована.

Непрямо́лінійність оброблених поверхонь була обміряна на координатно-вимірювальній машині Carl-Zeiss Contura G2, профілограми обмірів приведені на рис. 4.2. Поверхня, оброблена дотичною РК інструменту, має відхилення від прямо́лінійності 0,0622 мм, в той час як поверхня, оброблена РК інструменту розташованою по нормалі – 0,0306 мм.

Повні протоколи обмірів приведені у додатку Б.

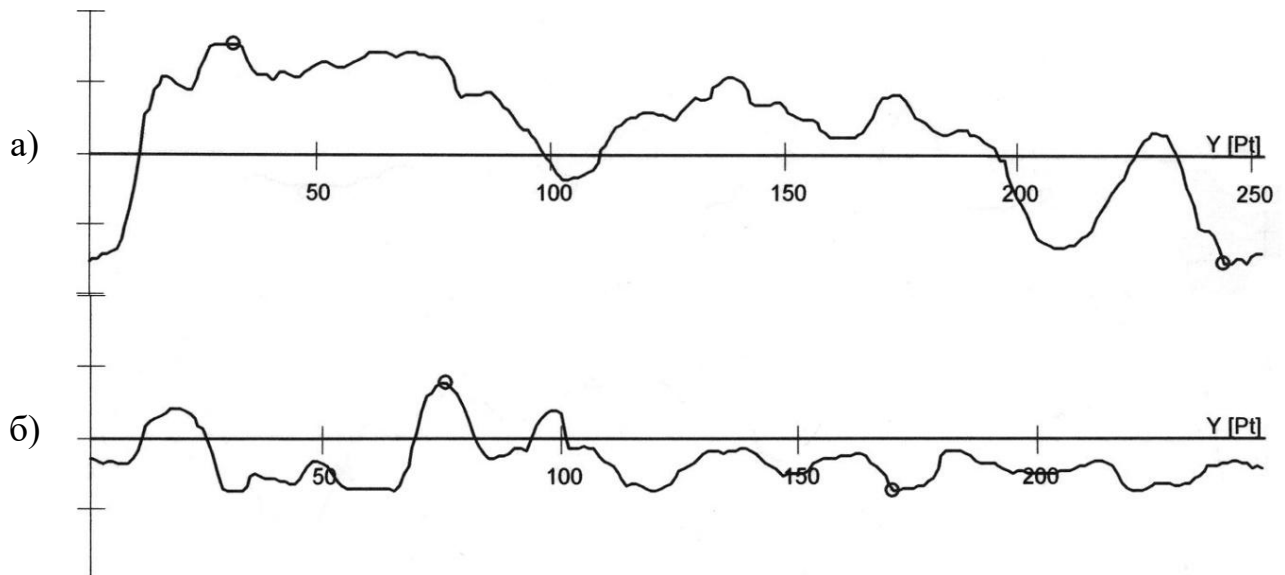


Рис. 4.2 Профілограми виміру непрямо́лінійності оброблених поверхонь дослідних зразків.

- а) обробка дотичною ГРК інструменту до ОП;
б) обробка ГРК інструменту розташованою по нормалі до ОП.

Також було проведено вимірювання глибини наклепаного шару.

Вихідні дані експерименту приведено у вигляді табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Параметр	Позн.	Од. вим.	Чис. знач.
Обробка дотичною ГРК інструменту			
Шорсткість	Ra	мкм	3,6
Непрямо́лінійність	–	мм	0,0622
Глибина наклепу	h	мкм	30
Обробка ГРК інструменту розташованою по нормалі			
Шорсткість	Ra	мкм	1,25
Непрямо́лінійність	–	мм	0,0306
Глибина наклепу	h	мкм	6

4.2 Висновки та рекомендації по розділу

Аналіз оброблених поверхонь за різних схем різання показав, що ОП, оброблена за умов розташування РК інструменту по нормалі (рис. 4.1, б) має кращу якість по всім показникам, ніж ОП, оброблена дотичною РК (рис. 4.1, а).

Рекомендації:

1. Метод черв'ячно-контурного зубофрезерування рекомендується для чистової обробки евольвентних зубчастих коліс, особливо тих, що потребують симетричності правих та лівих евольвентних профілів деталі (рис. 3.13).

2. При проектуванні нових методів механічної обробки евольвентних поверхонь зубчастих коліс та зуборізного інструменту надавати перевагу схемам різання із РК інструменту, розташованою по нормалі до ОП.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ЧЕРВ'ЯЧНО-КОНТУРНОЇ ФРЕЗИ

5.1 Загальні вихідні дані

Для вирішення питання про економічну ефективність нової конструкції фрези [9] в якості бази для порівняння приймаємо спосіб обробки черв'ячного колеса на зубофрезерному верстаті моделі 53A80Н стандартною черв'ячною фрезою.

Розроблена конструкція черв'ячно-контурної фрези має ряд переваг над традиційною черв'ячною фрезою, а саме:

- відсутність затилування задніх поверхонь зубців та виконання зубців черв'ячно-контурної фрези гострозаточеними дало змогу відмовитися від трудомісткої операції при виготовленні інструменту, спростити його вимірювання, контроль і відновлення;

- конструктивне виконання фрези зведене до одного витка різальних зубців, що позитивно відображається на матеріаломісткості інструменту та його технологічності.

Таким чином, зниження матеріаломісткості й трудомісткості виготовлення інструменту дозволить значно здешевити його.

Також перевагою конструкції проектної фрези є зростання її стійкості порівняно з базовим інструментом, що, не зважаючи на збільшення трудомісткості фрезерування (за рахунок додаткового переходу прорізки западин), вплинуло на зменшення експлуатаційних витрат у споживача.

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Програма виробництва деталей	шт./рік	780	780
2.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1
3.	Потреба в інструменті ¹	шт./рік	12	7
4.	Штучний час обробки деталі	хв.	21,75	32,95
5.	Площа, яку займає обладнання	м ²	5,04	5,04
6.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	12,5	12,5
7.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частин верстата	УРО	15/12	15/12
8.	Розряд роботи верстатника	розряд	4	4
9.	Оптова ціна: - обладнання - інструменту	грн. грн.	475000 65950	475000 -

5.2 Визначення витрат на підготовку виробництва

Витрати на проектування черв'ячно-контурної фрези визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot Z_{сг}^{\kappa} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\epsilon}, \quad (5.1)$$

де $H_{ор}$ – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції інструменту, шт.;

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$Z_{сг}^{\kappa}$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

κ_{∂} – додаткова заробітна плата конструктора, %;

B_c – відрахування у соціальні фонди від заробітної плати конструкторів, %;

H_{ϵ} – накладні витрати (визначаються у відсотках від основної заробітної плати конструктора), грн.

$$B_{пк} = 1 \cdot 18,9 \cdot 98,34 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 18,9 \cdot 98,34 \cdot \frac{45}{100} = 3348,33 \text{ грн.}$$

Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{mex} \cdot Z_{cz}^m \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\partial}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_{\varepsilon}, \quad (5.2)$$

де T_{mex} – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

Z_{cz}^m – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_t = 1 \cdot 21,2 \cdot 97,23 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 21,2 \cdot 97,23 \cdot \frac{55}{100} = 3820,51 \text{ грн.}$$

5.3 Визначення собівартості та оптової ціни інструменту

Після визначення трудомісткості виготовлення проектної фрези розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників, грн.:

$$Z_{op} = \sum_{i=1}^n C_{\text{r}} \cdot T_i, \quad (5.3)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

C_{r} – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i -й вид робіт з урахуванням умов праці, грн.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$Z_{op} = 8,6 \cdot 92,015 = 791,33 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$P_o = \sum_{i=1}^n Z_{op_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{pp}_i}}{100}, \quad (5.4)$$

де Π_{pp_i} – відсоток витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$P_o = 791,33 \cdot \frac{320}{100} = 2532,25 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$K_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^n z_{\text{ор}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{цр}_i}}{100}, \quad (5.5)$$

де $\Pi_{\text{цр}}$ – відсоток цехових витрат по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$K_{\text{цех}} = 791,33 \cdot \frac{232}{100} = 1835,88 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати зводимо у табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат на виготовлення фрези

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $z_{\text{ор}}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн.		Загально-цехові витрати $K_{\text{цех}}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	1,2	3	92,754	111,30	245	272,70	223	248,21
Механічні	8,6	4	92,015	791,33	320	2532,25	232	1835,88
Термічні	1,5	3	102,717	154,08	385	593,19	282	434,49
Всього	11,3	-	-	1056,71	-	3398,14	-	2518,59

Повну собівартість фрези розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базових конструкцій за формулою:

$$C_{\text{пов}} = M_o + M_d + E_{\text{тех}} + T_p + \Pi_{\text{тех}} + z_{\text{ор}} + z_{\text{др}} + B_c + z_{\text{цп}} + B_o + K_{\text{цех}} + K_{\text{зав}} + B_{\text{ін}} + K_{\text{пв}}, \quad (5.6)$$

де M_o – витрати на основні матеріали, грн. Розраховуємо за формулою:

$$M_o = B_{чор} \cdot C_m - B_{відх} \cdot C_{відх}, \quad (5.7)$$

де $B_{чор}$ – чорнова маса деталі, кг;

$C_m, C_{відх}$ – відповідно ціна матеріалів (сталь Р6М5К5) та відходів, грн./кг;

$$M_o = 1,2 \cdot 259,6 - (1,2 - 0,95) \cdot 47,3 = 299,70 \text{ грн.}$$

M_d – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

$E_{тех}, P_{тех}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

T_p – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$Z_{ор}$ – основна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$Z_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

B_c – єдиний соціальний внесок, грн.;

$Z_{щп}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

B_o – витрати на утримання та експлуатацію обладнання, грн.;

$K_{цех}$ – цехові витрати, грн.;

$K_{зав}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{ін}$ – інші виробничі витрати, грн.;

$K_{пв}$ – позавиробничі витрати, грн.

Розрахунок собівартості інструменту зводимо до табл. 5.3.

Оптову ціну інструменту розраховуємо за формулою:

$$C_{онт} = C_{нов} + P_n, \quad (5.8)$$

де P_n – нормативний прибуток, грн.

$$P_n = \frac{P_c \cdot C_{нов}}{100}, \quad (5.9)$$

де P_c – встановлений рівень рентабельності виробу, %.

$$P_n = \frac{18 \cdot 10593,22}{100} = 1906,78 \text{ грн.}$$

$$C_{онт} = 10593,22 + 1906,78 = 12500,0 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.3

Повна собівартість та оптова ціна черв'ячно-контурної фрези

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1.	Матеріали основні	M_o		299,70
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4,0% від M_o	11,99
3.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	5% від $(M_o + M_d)$	15,58
4.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}, E_{тех}$	78,8% від $З_{ор}$	832,69
5.	Всього матеріальні витрати			1159,96
6.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 5.2	1056,71
7.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	105,67
8.	Відрахування в фонд соціального страхування	B_c	22% від $(З_{ор} + З_{др})$	255,72
9.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{цп}$	5,3% від $З_{ор}$	56,01
10.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 5.2	3398,14
11.	Цехові витрати	$K_{цех}$	табл. 5.2	2518,59
12.	Загальнозаводські витрати	$K_{зав}$	180% від $З_{ор}$	1902,08
13.	Інші виробничі витрати	$B_{ін}$	3,4% від $З_{ор}$	35,93
14.	Виробнича собівартість	$C_{вир}$	$\Sigma(7 \div 15)$	10488,80
15.	Позавиробничі витрати	$K_{пв}$	1% від $C_{вир}$	104,89
16.	Повна собівартість	$C_{пов}$	$C_{вир} + K_{пв}$	10593,22
17.	Прибуток	$П_n$	18% від $C_{пов}$	1906,78
18.	Оптова ціна підприємства	$Ц$	$C_{пов} + П_n$	12500,00

5.4 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Оскільки час обробки зубців у порівнюваних варіантах співпадає, розрахунок експлуатаційних витрат виконуємо для переходу прорізки западин у проектному варіанті за формулою:

$$B_c = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (5.10)$$

де B_m – витрати на основні матеріали, грн. (не розраховуються, оскільки співпадають у базовому та проектному варіантах);

B_z – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування основних робітників, грн.;

B_e – витрати на силову електроенергію, грн.;

$B_{мд}$ – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

B_p – витрати на ремонт обладнання, грн.;

B_n – витрати на утримання приміщення, грн.;

B_{ip} – витрати на різальний інструмент, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальне страхування:

$$B_3 = C_r \frac{T_{нор}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (5.11)$$

де $T_{нор}$ – час обробки деталі, хв.;

K_d, K_c – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальне страхування відповідно.

$$B_{3п} = 92,016 \cdot \frac{11,207}{60} \cdot (1 + 0,1) \cdot (1 + 0,22) = 23,065 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$P_e = \frac{N_v \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{T_{нор}}{60} \cdot C_{ел}, \quad (5.12)$$

де N_v – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи моторів ($K_o=0,65...0,8$);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для свердлильних верстатів $K_N=0,5...0,6$, для пресів $K_N=0,4...0,5$);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом ($K_d=0,3...0,5$);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів ($\eta_c=0,86...0,9$);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_m=0,92...0,96$);

$C_{ел}$ – ціна 1 кВт-год силової електроенергії, грн.

$$B_{ел}^{пр} = \frac{12,5 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{11,207}{60} \cdot 8,235 = 4,830 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{нор}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (5.13)$$

де $M_{\text{гв}}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів верстатів, коп.;

$R_{\text{м}}$ – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $K_{\text{п}} = 1,0$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{пр}} = \frac{75,5 \cdot 15,0 \cdot 11,207}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 2,115 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot \Gamma_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (5.14)$$

де $\Gamma_{\text{вм}}, \Gamma_{\text{ве}}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин вузла, грн./рік;

$F_{\text{дрм}}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата (при двозмінному режимі роботи для серійного виробництва – 3980 год.).

$$B_{\text{р}}^{\text{пр}} = \frac{15 \cdot 968 + 12 \cdot 792}{3680} \cdot \frac{11,207}{60} = 1,219 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального різального інструменту:

$$B_{\text{ір}} = \frac{(S_{\text{у}} + p \cdot S_{\text{пер}}) \cdot \gamma \cdot T_{\text{нор}}}{t_{\text{е}} (p + 1)} K_{\text{вт}}, \quad (5.15)$$

де $S_{\text{у}}$ – первісна вартість різального інструменту, грн.;

p – кількість переточувань різального інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру різальної грані;

$S_{\text{пер}}$ – вартість однієї переточки, грн.;

γ – питома значення машинного часу роботи обладнання в загальному варіанті його роботи;

$t_{\text{е}}$ – економічна стійкість інструменту, хв.;

K_{em} – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{ip}^{\delta} = \frac{(65950,0 + 24 \cdot 25,66) \cdot 0,45 \cdot 21,75}{30 \cdot (1 + 24)} \cdot 1,08 = 943,928 \text{ грн.};$$

$$B_{ip}^{np} = \frac{(10606,0 + 18,5 \cdot 30) \cdot 0,45 \cdot 32,967}{60 \cdot (1 + 30)} \cdot 1,0 = 104,862 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{уп} = \frac{F_o \cdot K_d \cdot C}{F_{дрм}} \cdot \frac{T_{нор}}{60}, \quad (5.16)$$

де F_o – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, m^2 ;

K_d – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [5];

C – річні витрати, пов'язані з використанням $1 m^2$ виробничого приміщення, грн./ m^2 .

$$B_{уп}^{пр} = \frac{5,04 \cdot 3,0 \cdot 11,208}{3680 \cdot 60} \cdot 788 = 0,605 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_a = \frac{\Phi_{бал} \cdot H_a}{F_{дрм} \cdot 100} \cdot \frac{T_{нор}}{60}, \quad (5.17)$$

де H_a – норма амортизації, %;

$\Phi_{бал}$ – балансова вартість верстата, грн.

Балансову вартість верстатів знайдемо за формулою:

$$\Phi_{бал} = U_{опт} \cdot (1 + K_{тр} + K_m + K_{\phi}), \quad (5.18)$$

де $U_{опт}$ – оптова ціна верстата, грн.;

$K_{тр}$, K_m , K_{ϕ} – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

$$\Phi_{бал} = 475000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 565250 \text{ грн.,}$$

$$B_a^{np} = \frac{565250 \cdot 20 \cdot 11,207}{3680 \cdot 60 \cdot 100} = 5,738 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями у соціальні фонди	B_z	-	23,065
2.	Силовa електроенергія	B_{el}	-	4,830
3.	Допоміжні матеріали	B_{dm}	-	2,115
4.	Ремонт обладнання	B_p	-	1,219
5.	Універсальний різальний інструмент	B_{ip}	943,928	104,862
6.	Утримання приміщення	B_{yn}	-	0,605
7.	Амортизація обладнання	B_a	-	5,738
Загальна сума		B_e	943,928	142,434

5.5 Розрахунок показників економічної ефективності

Річний економічний ефект, який отримує виробник черв'ячно-контурної фрези розраховуємо за формулою:

$$E_{pv} = (C_{opt.np} - C_{пов.np}) \cdot P_v - E_n \cdot K_v, \quad (5.19)$$

де $C_{opt.np}$, $C_{пов.np}$ – відповідно оптова ціна та повна собівартість проектного інструменту, грн.;

P_v – програма виробництва інструменту, шт./рік;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K_v – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_v = B_{нк} + B_m = 3348,33 + 3820,51 = 7168,84 \text{ грн.}, \quad (5.20)$$

де $B_{нк}$, B_m – відповідно, вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$$E_{pv} = (12500,0 - 10593,22) \cdot 7 - 0,16 \cdot 7168,84 = 12200 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект, який отримує підприємство-споживач, розрахуємо за формулою:

$$E_{p.cn} = (B_e^{\delta} - B_e^{np}) \cdot N_{\delta} - E_n \cdot K_{cn},$$

де K_{cn} – додаткові капітальні витрати у споживача, грн:

$$K_{cn} = \Phi_{bal}^{np} \cdot Q_{np} - \Phi_{bal}^{\delta} \cdot Q_{\delta} + \Pi_i^{np} \cdot K_i^{np} - \Pi_i^{\delta} \cdot K_i^{\delta},$$

де Φ_{bal}^{np} , Φ_{bal}^{δ} – відповідно балансова вартість проектних та базових верстатів, грн.;

Q_{np} , Q_{δ} – потреба у верстатах відповідно в проектному та базовому варіантах для виконання річної програми випуску деталей;

Π_i^{np} , Π_i^{δ} – вартість інструменту відповідно в проектному та базовому варіантах, грн.;

K_i^{np} , K_i^{δ} – потреба в інструменті відповідно в проектному та базовому варіантах.

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_{\delta} \cdot T_{nor}}{F_{\delta pm} \cdot 60 \cdot \kappa_v}, \quad (5.21)$$

де $F_{\delta pm}$ – дійсний річний фонд часу роботи обладнання, год.;

κ_v – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Розрахункова кількість обладнання в проектному варіанті:

$$Q_{p.np} = \frac{780 \cdot 32,95}{3680 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,12 \quad (\text{приймаємо один верстат}).$$

Балансова вартість верстатів і потреба у них співпадають в порівнюваних варіантах, тому не враховуються при розрахунку капітальних вкладень.

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою:

$$K_i = \frac{N_{\partial} \cdot T_{\text{нор}} \cdot \gamma \cdot \kappa_{\text{вт}}}{t_e \cdot (1 + p)}, \quad (5.22)$$

Потреба у базовому інструменті:

$$K_i^{\delta} = \frac{780 \cdot 21,75 \cdot 0,45 \cdot 1,08}{30 \cdot (24 + 1)} = 11 \text{ шт.}$$

Потреба у фрезах в проектному варіанті:

$$K_i^{np} = \frac{780 \cdot 32,95 \cdot 0,45 \cdot 1,0}{60 \cdot (30 + 1)} = 7 \text{ шт.}$$

$$K_{\text{сп}} = 12500 \cdot 7 - 65950 \cdot 11 = -637950 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{р.сп}} = (943,928 - 142,434) \cdot 780 - 0,16 \cdot (-725450) = 720860 \text{ грн.}$$

Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника черв'ячно-контурної фрези:

$$T_{\text{ок.в}} = \frac{K_{\text{в}}}{(\Pi_{\text{опт.пр}} - C_{\text{пов.пр}}) \cdot \Pi_{\text{в}}}; \quad (5.23)$$

$$T_{\text{ок.в}} = \frac{7168,84}{(12500,0 - 10593,22) \cdot 7} = 0,54 \text{ року} = 6,4 \text{ міс.}$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту, табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна,% (+,-)
1.	Потреба в інструменті:	шт./рік	11	7	-36,4
2.	Програма виробництва деталей	шт./рік	780	780	—
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	21,75	32,95	+51,5
4.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1	—
5.	Оптова ціна обладнання	грн.	475000	475000	—
6.	Повна собівартість фрези	грн.	—	10593,22	—
7.	Оптова ціна фрези	грн.	65950	12500	-81,0
8.	Собівартість одиниці обробки	грн.	943,93	142,43	-84,9
9.	Капітальні витрати на підготовку виробництва	грн.	—	7168,84	—
10.	Річний економічний ефект:				
	- у виробника	грн.	—	12200	—
	- у споживача	грн.	—	720860	—
11	Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника	міс.	—	6,4	—

5.6 Висновки

Згідно проведених розрахунків, річний економічний ефект від використання черв'ячно-контурних фрез буде становити $E_{p,сп} = 720860$ грн., із строком окупності додаткових капітальних вкладень у виробника інструменту у $T_{ок.в} = 6,4$ міс.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано вирішення актуальної науково-технічної задачі по покращенню якості обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс середніх модулів 4...12 мм за рахунок використання методу черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Результати досліджень дають змогу зробити наступні загальні висновки:

1. Розглянуто принцип формоутворення при черв'ячному зубофрезеруванні та визначено допустимі варіанти системи взаємодії різальної кромки і оброблюваного евольвентного профілю. Альтернативна схема формоутворення евольвентного профілю описує її як множину геометричних точок, які є проекціями нормалей до номінального евольвентного профіля.

2. По представленим методикам проведено ряд теоретичних досліджень та здійснено порівняння профільної (традиційна) та контурної (альтернативна) систем взаємодії РК інструменту та ОП. Виявлено що контурна система:

- дозволить зменшити поверхневі напруження на оброблених евольвентних поверхнях у ~2,3 разів;
- реалізує обробку в умовах силового замикання верстатної системи при обробці обох евольвентних профілів міжзубової западини шестерні;
- зменшує вплив радіальної похибки встановлення інструменту на точність обробки оброблюваного евольвентного профілю.

3. Експериментальні дослідження процесів різання в умовах моделювання довели кращу якість обробленої поверхні при контурній схемі формоутворення, підтверджуючи результати теоретичних досліджень.

4. На основі контурної системи взаємодії РК інструменту та ОП було запропоновано до реалізації метод черв'ячного-контурного зубофрезерування.

5. В роботі проведено економічне обґрунтування впровадження у виробництво та експлуатацію інструменту до запропонованого методу. Очікуваний економічний ефект у споживача 720860 грн., у виробника 12200 грн., а строк окупності додаткових капітальних витрат – 6,4 місяці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бочков В.М. Сілін Р.І, Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів : Підручник / За ред. Сіліна Р.І. – Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2008. – 448 с.
2. Власенко А. М. Матеріалознавство та технологія металів : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Власенко. – Київ : Літера ЛТД, 2019. – 224 с.
3. Габрусєв Г.В. Конспект лекцій із вищої математики (частина 3 : аналітична геометрія) – Тернопіль : Вид-во ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2014. – 64 с.
4. 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.
5. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 40 с.
6. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин : підручник / Я.Т. Кіницький. - Київ : Наукова думка, 2002. - 663 с.
7. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід / В. Р. Кулінченко. – Київ: ІНК ОС: Центр навчальної літератури, 2006. – 616 с.
8. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий світ-2000, 2011. – 422 с.
9. Організація виробництва на промислових підприємствах: Навч. посібник / за ред. Ю.А. Єгупова. - Одеса: Автограф, 2004. - 436 с.
10. 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.

11. Пат. 110741 Україна, МПК B23F 21/14, B23F 21/16, B23F 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.

12. Писаренко Г.С. Опір матеріалів : підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський ; За ред. Г.С. Писаренка. – 2-ге вид., допов. І переробл. – Київ.: Вища шк., 2004. – 655 с.: іл.

13. 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.

14. Cutting performance increasing in gear hobbing by means of HSS hobs, coated with effective PVD films [Електронний ресурс] / K. D. Bouzakis, S. Kombogiannis, O. Friderikos, J. Anastopoulos. – 2003. – Режим доступу до ресурсу: https://www.researchgate.net/publication/237672470_Cutting_performance_increasing_in_gear_hobbing_by_means_of_HSS_hobs_coated_with_effective_PVD_films.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Gear hobs — Accuracy requirements : ISO 4468:2009. – [Valid from 2009.06.01]. – Geneve : International Organization for Standardization, 2009. – 32 P. – (International Standard).

19. Gleason - Genesis 400H(CD) [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.gleason.com/en/products/machines/cylindrical/hobbing-up-to-800-mm/genesis-400hcd-the-productivity-master-with-optional-flexible-chamfering>.

20. Gleason – Hobbing & Milling tools [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.gleason.com/en/products/tools/cylindrical/hobbing-and-milling/hobbing-and-milling-tools>.

21. HAAS – Rotary tables [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.haascnc.com/machines/rotaries-indexers/rotary-tables.html>.

22. HAAS – Spindles for CNC Milling machines [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.haascnc.com/productivity/spindles.html>.

23. 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.

24. König W. Walzfräsen mit Hartmetall Werkzeugen / W. König, G. Venohr, K. Peifer. // Industrie-Anzeiger. – 1987. – №90. – S. 32–39.

25. LIEBHERR - Gear hobbing machines [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.liebherr.com/en-us/gear-technology-and-automation-systems/gear-technique/gear-cutting-machines/gear-hobbing-machines/gear-hobbing-machines-4388726>.

26. LMT Fette Gear Cutting [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.lmt-tools.com/en/products/gear-cutting>.

27. LMT Fette Gear Cutting Tools and Knowledge [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.lmt-tools.com/fileadmin/user_upload/content_lmt-tools/content/segmente/verzahnen/downloads/LMT-Tools-Katalog-Verzahnen-s.pdf.

28. 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.

29. New Developments in Gear Hobbing / Dr. Oliver Winkel // Gear Technology. – 2010. – March/April. – P. 45–52.

30. 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.

31. Reeber R. Der Energiebedarf bei trennenden Fertigungsverfahren / R. Reeber. // Werkstatt und betrieb. – 1980. – №113. – S. 109–113.

32. 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).

33. Sandvik coromant - CoroMill 176 [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/tools/milling-tools/gear-milling-tools/coromill-176>.

34. 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.

35. Schmidhammer A. Die Verschleißerscheinungen an Wälzfräsern und ihre Ursachen / Schmidhammer. // Technische Nachrichten Fette. – 1980. – №270. – S. 211.

36. 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).

37. Star SU - Gear Cutting Tools [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.star-su.com/wp-content/uploads/hobs_milling_cutters_ed0.pdf.

38. Sulzer G. Bestimmung der Spanungsquerschnitte beim Wälzfräsen / G. Sulzer. // Industrie-Anzeiger. – 1974. – №92. – S. 246–247.

39. 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).

40. UCAM – Rotary tables [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://ucamind.com/products/direct-drive-rotary-table>.

41. 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

Результати обміру параметрів зубчастого колеса, обробленого методом черв'ячно-контурного зубофрезерування, на координатно-вимірвальній машині MAHR GMX 275

Mahr	GMX 275 05.13_0.0	Reference Probe - -		100
Workpiece: -		Drawing No.: -		Operator: -
-		-		Signature: -
-		-		
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	

+ <-- Left flank
Profile variation
Right flank --> +

Tip

Va
250:1*

40
μm

UPL=20

Roll path length →

Vb
5:1*

2.00
mm

Root

49.799

38.830

49.799

38.825

[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

+ <-- Left flank
Lead-tooth alignment variation
Right flank --> +

Top

Va
500:1*

20
μm

DIN/VDI
UPL=20

Axis direction →

Vb
5:1

2.00
mm

Bottom

10.800

1.200

10.800

1.200

[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 Б

Результати обмірів непрямолінійності на координатно-вимірювальній машині Contura G2 (CARL ZEISS)

