

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«_____» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Підвищення ефективності чистового зубофрезерування шестерень методом черв'ячно-контурного зубофрезерування»

Виконав здобувач вищої освіти 2-го
року магістратури групи ГМ-22М-3
ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
_____ Роман ЧАГАЙНА

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

« ____ » _____ 2024 р.

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

Чагайни Романа Руслановича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення ефективності чистового зубофрезерування
шестерень методом черв'ячно-контурного зубофрезерування

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

3. Строк подання роботи до захисту « ____ » червень 2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: підвищення ефективності чистового зубофрезерування шестерень з евольвентним профілем використовуючи метод черв'ячно-контурного зубофрезерування, який створений на кардинально інших принципах, та позбавлений недоліків традиційного черв'ячного зубофрезерування.

Завдання:

- визначити схему утворення евольвентного профілю, позбавлену недоліків схеми формоутворення при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні.
- розробити концепцію методу черв'ячного зубофрезерування, який задовільнить вимоги зміненої схеми формоутворення евольвентного профілю.
- розробити методику та виконати порівняльний аналіз процесів утворення евольвентного профілю методами традиційного та контурного зубофрезерування в умовах тривимірного комп'ютерного моделювання.
- розробити методику та виконати порівняльний аналіз енергоємності процесів зубофрезерування на основі результатів дослідження процесів утворення евольвентного профілю.
- провести розрахунки економічного ефекту від провадження наукової розробки.

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	Ірина ЖУРИЛО		
ДОДАТКИ	Антон АПАРАКІН		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	При- мітка
1	ВСТУП	Березень 2024	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Березень 2024	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Березень-Квітень 2024	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Квітень 2024	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Квітень-Травень 2024	вик.
6	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Травень 2024	вик.
7	ДОДАТКИ	Червень 2024	вик.
8	Графічна частина та оформлення	Червень 2024	вик.

Дата видачі завдання « ____ » _____ 2024 р.

Керівник роботи _____ Антон АПАРАКІН
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « ____ » _____ 2024 р.

Здобувач _____ Роман ЧАГАЙНА
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Роман ЧАГАЙНА. Підвищення ефективності чистового зубофрезерування шестерень методом черв'ячно-контурного зубофрезерування. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2024. – 103 с. Матеріали презентації 14 аркушів.

Метою роботи є підвищення ефективності чистової обробки евольвентних зубчастих коліс використовуючи метод черв'ячно-контурного зубофрезерування, який створений на кардинально інших принципах, та позбавлений недоліків традиційного черв'ячного зубофрезерування.

У роботі було проаналізовано стан сучасної технології черв'ячного зубофрезерування, досліджено відомі недоліки методу та конструкції сучасних черв'ячних фрез. На основі відомих методик дослідження формоутворення та розрахунку силових характеристик зубофрезерування було розроблено порівняльну методику традиційного та пропонованого методу, та здійснено дослідження. Проведено необхідні економічні розрахунки.

Актуальність. Шестерні широко використовуються у механізмах і машинах, але традиційна технологія виготовлення шестерень методом черв'ячного зубофрезерування має ряд недоліків та знаходиться на межі своїх технічних можливостей. У роботі запропоновано та досліджено принципово інший метод зубофрезерування.

Наукова новизна. Вперше досліджено показники продуктивності, сили різання, потужності та енергоємності процесів черв'ячного зубофрезерування на основі параметру швидкості знімання матеріалу (material removal rate) та за результатами дослідження процесів формоутворення на основі тривимірних комп'ютерних моделей кінематики методів зубофрезерування для визначення геометричних форм одиничних різів.

Практичне значення. Створено комп'ютерні моделі кінематики методів чистового зубофрезерування для визначення геометричних форм одиничних різів та закономірності їх розподілення під час обробки. Розроблено конструкцію черв'ячно-контурної фрези із механічним кріпленням змінних різальних пластин.

Ключові слова: зубофрезерування, шестерня, черв'ячна фреза, формоутворення, енергоємність.

ABSTRACT

Roman Chagina. Increasing the efficiency of finishing gear hobbing by the method of contour gear hobbing. Master's thesis: CUNTU, 2024. – 103 p. Presentation materials 14 drawings.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the finishing gear hobbing of involute gears using the method of contour gear hobbing, which is based on radically different principles and is devoid of the disadvantages of traditional worm gear milling.

The paper analyzed the state of modern gear hobbing technology, investigated the known shortcomings of the method and design of modern gear hobs. On the basis of the known methods of research of forming and calculation of cutting force characteristics of tooth milling, a comparative method of the traditional and the proposed method was developed, and the research was carried out. Necessary economic calculations have been carried out.

Relevance. Gears are widely used in mechanisms and machines, but the traditional technology of manufacturing gears by the method of gear hobbing has a number of disadvantages and is at the limit of its technical capabilities. In the work, a fundamentally different method of tooth milling is proposed and investigated.

Scientific novelty. For the first time, parameters of productivity, cutting force, power, and energy consumption of gear hobbing processes were investigated based on the material removal rate parameter and based on the results of the research of forming processes based on three-dimensional computer models of the kinematics of gear hobbing methods to determine the geometric shapes of single cuts.

Practical value. Computer models of the kinematics of fine gear hobbing methods have been created to determine the geometric shapes of single cuts and the regularity of their distribution during processing. The design of a contour gear hob with mechanical fastening of replaceable cutting plates has been developed.

Key words: hobbing, gear, hob mill, forming, energy consumption.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДУ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ	9
1.1 Конструктивне виконання традиційних черв'ячних фрез	9
1.2 Аналіз процесу різання при черв'ячному зубофрезеруванні	26
1.3 Висновки, мета і задачі дослідження	33
РОЗДІЛ 2 ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ	34
2.1 Загальні відомості	34
2.2 Теоретичні дослідження процесів різання при зубофрезеруванні	34
2.3 Методика дослідження процесів утворення профілю на базі тривимірних комп'ютерних моделей кінематики зубофрезерування	35
2.4 Методика дослідження енергоємності процесів різання на основі результатів дослідження утворення профілю	40
2.5 Висновки	46
2.6 Рекомендації	46
РОЗДІЛ 3 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ	47
3.1 Порівняльний аналіз схем взаємодії різальної кромки із оброблюваною поверхнею для методів зубофрезерування	47
3.2 Реалізація методу черв'ячно-контурного зубофрезерування	50
3.3 Теоретичні дослідження процесів традиційного черв'ячного зубофрезерування	59
3.4 Теоретичні дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування	69
3.5 Висновки по розділу	76
3.6 Рекомендації	77
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ЧЕРВ'ЯЧНО-КОНТУРНОЇ ФРЕЗИ	78
4.1 Загальні вихідні дані	78
4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва	80
4.3 Визначення собівартості та оптової ціни інструменту	80
4.4 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)	84
4.5 Розрахунок показників економічної ефективності	88
4.6 Висновки	89
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	92
ДОДАТКИ	95

ВСТУП

Актуальність роботи. На сьогодні, традиційне черв'ячне зубофрезерування знаходиться на межі своїх технічних можливостей. Метод має суттєві обмеження по швидкості різання та подачі, зносостійкості інструменту, якості обробки, тому виникають складнощі у реалізації деяких заходів по підвищенню ефективності. Відчутних результатів можна отримати за рахунок зміни кінематики процесу різання та використання нових, раціональних схем формоутворення із зміною кінематики розподілу зрізів.

Останніми тенденціями серед сучасних досліджень черв'ячного зубофрезерування являються процеси зносу, зокрема підвищення стійкості фрези за рахунок багатошарових покриттів із надтвердих матеріалів, а також досвід експлуатації фрез із порошкових інструментальних матеріалів. Обумовлені дослідження виконуються із широким залученням комп'ютерного моделювання. Однак всі ці дослідження об'єднує те, що вони не здійснюють спробу змінити кардинально принцип взаємодії різальної частини інструменту та оброблюваної поверхні, тобто схему формоутворення, а лише покликані вдосконалити, або нівелювати відомих недоліків, існуючої схеми різання при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні.

Отже, відомі дослідження характеризують метод традиційного черв'ячного зубофрезерування як досить енергоємний і витратний, зі складними умовами різання та формоутворення, з наявністю значних сил різання. Це не відповідає вимогам, які пред'являються до сучасних, енергоощадних технологій. Робота присвячена створенню технології зубофрезерування на кардинально інших принципах.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності чистового зубофрезерування шестерень з евольвентним профілем використовуючи метод черв'ячно-контурного зубофрезерування, який створений на кардинально інших принципах, та позбавлений недоліків традиційного черв'ячного зубофрезерування.

Для досягнення поставленої **мети**, вирішувались наступні **задачі**:

1. Визначити схему утворення евольвентного профілю, позбавлену недоліків схеми формоутворення при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні.
2. Розробити концепцію методу черв'ячного зубофрезерування, який задовільнить вимоги зміненої схеми формоутворення евольвентного профілю.
3. Розробити методику та виконати порівняльний аналіз процесів утворення евольвентного профілю методами традиційного та контурного зубофрезерування в умовах тривимірного комп'ютерного моделювання.
4. Розробити методику та виконати порівняльний аналіз енергоємності процесів зубофрезерування на основі результатів дослідження процесів утворення евольвентного профілю.
5. Провести розрахунки економічного ефекту від впровадження наукової розробки.

Об'єкт дослідження – черв'ячні фрези.

Предмет дослідження – процес утворення евольвентного профілю та вплив його показників на сили різання та енергоємність процесу зубофрезерування, в залежності від прийнятого методу формоутворення.

Наукова новизна. Вперше досліджено показники продуктивності, сили різання, потужності та енергоємності процесів черв'ячного зубофрезерування на основі параметру швидкості знімання матеріалу (material removal rate) та за результатами дослідження процесів формоутворення на основі тривимірних комп'ютерних моделей кінематики методів зубофрезерування для визначення геометричних форм одиничних різів.

Практичне значення. Створено комп'ютерні моделі кінематики методів чистового зубофрезерування для визначення геометричних форм одиничних різів та закономірності їх розподілення під час обробки. Розроблено конструкцію черв'ячно-контурної фрези із механічним кріпленням змінних різальних пластин.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН МЕТОДУ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

1.1 Конструктивне виконання традиційних черв'ячних фрез

Черв'ячна фреза – це різальний інструмент, призначений для обробки циліндричних зубчастих коліс, коліс черв'ячної передачі, в умовах неперервного обкату на спеціальних, зубофрезерних верстатах.

Сучасний стан розвитку традиційних черв'ячних фрез передбачає відносно одноманітні конструкції суцільних фрез, та декілька конструкцій із механічним кріпленням різальної частини. Незмінним залишається геометрія різальної частини, зокрема вихідний (твірний) контур, так як вона нероздільно пов'язана із формоутворенням міжзубової впадини нарізуваної деталі. В наслідок конструктивного виконання черв'ячної фрези мають місце ряд недоліків під час виготовлення фрези, здійснення нарізання шестерень, відновлення та переточування інструменту, вимірювання геометричних параметрів, зокрема:

- велика кількість специфічних операцій затилювання, шліфування удорожчують інструмент, зокрема необхідність у подвійному затилюванні породжує обмеження на кількість стружкових канавок при визначеному зовнішньому діаметрі, тобто на коловий крок фрези;
- під час обробки наявне невідне стружкоутворення, зустрічні потоки стружок;
- низькі значення задніх кутів (особливо по бічним кромкам $\alpha_6 = 2...4^\circ$), тому має місце контакт задніх поверхонь різальних кромки із заготовкою;
- перенесення якості та похибок виготовлення, якості переточування, встановлення та налагодження інструменту на точність, якість та шорсткість оброблюваної деталі;
- необхідність спеціального та спеціалізованого вимірювального інструменту та координатно-вимірювальних машин для обміру параметрів точності та розмірів фрези.

У розділі розглядається актуальний стан методу традиційного черв'ячного зубофрезерування, з метою визначення шляхів нейтралізації недоліків.

1.1.1 Аналіз конструкції різальної частини черв'ячних фрез

Основні розміри, шорсткість та точність геометрії функційних робочих поверхонь, інструментальний матеріал фрези описано у стандартах [11] та [21, 26, 29] у залежності від класу точності інструменту. Конструктивне виконання суцільнометалевої черв'ячної фрези із зазначенням основних ключових розмірів представлено на рис. 1.1. Геометрія різальної частини недосконала і має ряд недоліків, див. р. 1.1, які негативно впливають на процес різання.

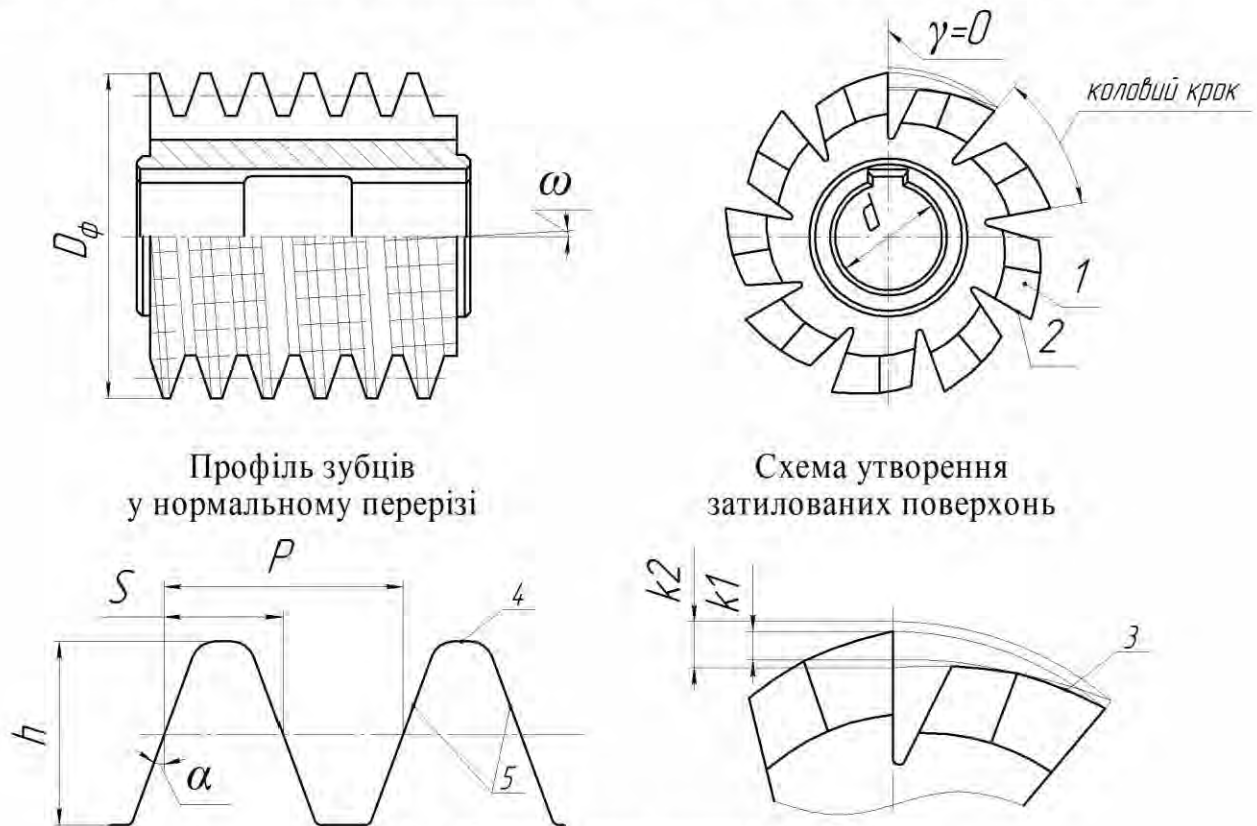


Рис. 1.1 Конструкція черв'ячної фрези

1 – задня бічна грань; 2 – передня грань; 3 – задня грань вершинної різальної кромки; 4 – різальна кромка при вершині зубця; 5 – бічні різальні кромки; D_ϕ – зовнішній діаметр інструменту; ω – кут підйому гвинтової лінії фрези; γ – передній кут різання; d – діаметр отвору під оправку; α – кут профілю вихідного контуру; $k1$, $k2$ – відповідно, величини затилювання шліфованої та нешліфованої частини зубця інструменту; h – висота зубця фрези; S – товщина зубця фрези на початковому циліндрі; P – вісевий крок.

1.1.2 Класифікація конструктивних виконань традиційних черв'ячних фрез

Традиційні черв'ячні фрези бувають суцільнометалеві та збірні, менш популярні та представлені декількома конструкціями від відомих виробників.

Загалом, черв'ячна фреза представляє собою циліндричне тіло із розміщенням на ньому гвинтового тіла і яке має повздовжні прорізи у формі трапецій в перерізі, для утворення різальних зубців. Гвинтова поверхня має визначений профіль, і розподілена на окремі елементи – зубці. Задні кути на різальних кромках зубців, утворюються шляхом операції затилування по вершинній і двом бічним різальним кромкам.

Черв'ячна фреза – це єдиний відомий різальний інструмент, який містить в собі елементи кінематики, які ув'язані з елементами різального інструменту.

Умовно, можна скласти наступну класифікацію традиційних черв'ячних фрез із чотирьох груп:

- 1) суцільнометалеві традиційні черв'ячні модульні фрези;
 - а) стандартної геометрії різальної частини, або із прогресивними схемами різання, для обробки незагартованих зубчастих коліс;
 - б) з поділенням профілем, для попередньої обробки незагартованих зубчастих коліс;
 - в) із прогресивними зносостійкими покриттями, для обробки зубчастих коліс із важкооброблюваних матеріалів;
- 2) збірні черв'ячні фрези;
 - а) зі вставними зубцями, для попередньої обробки незагартованих зубчастих коліс;
 - б) зі вставними рейками, для попередньої обробки незагартованих зубчастих коліс;
 - в) із вставними сегментами, які оснащені універсальними різальними елементами, для попередньої обробки незагартованих зубчастих коліс;

- 3) суцільнометалеві черв'ячні фрези для обробки загартованих зубчастих коліс, по технології «Skiving»;
- 4) збірні черв'ячні фрези для обробки загартованих зубчастих коліс по технології «Skiving»;
 - а) із вставними сегментами, які оснащені універсальними різальними елементами;
 - б) із напайними твердосплавними різальними елементами.

Суцільнометалеві фрези, по п. 1 класифікації, самий найпоширеніший тип черв'ячних фрез [5, 12, 15, 22]. Конструкція таких фрез класична, відпрацьована десятиліттями експлуатації, однак знаходиться на межі своїх технічних можливостей. Осучаснення такої конструкції відбувається за напрямками використання порошкових інструментальних сталей та зносостійких покриттів [18, 19]. Типові фрези такої конструкції приведені на рис. 1.2.

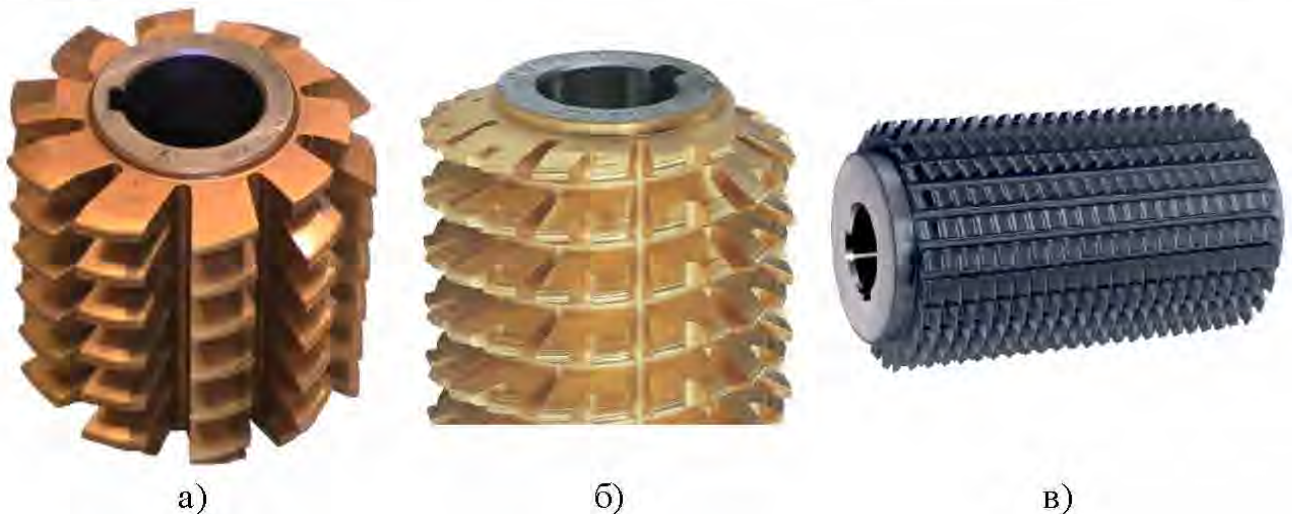


Рис. 1.2 Суцільнометалеві черв'ячні модульні фрези

- а) стандартної профільної геометрії; б) з поділеним профілем зубця; в) подовжена фреза із прогресивними зносостійкими покриттями, для обробки зубчастих коліс із важкооброблюваних матеріалів на верстатах з ЧПУ.

Окрім стандартної, профільної, схеми різання, не велику популярність набули різноманітні схеми різання (рис. 1.3): прогресивна, вершинно навантажена, з поперемінно навантаженими різальними кромками, з поділеним профілем початкового контуру [12, 15]. Широкого використання така геометрія

не отримала з огляду на складність та дороговизну виготовлення при не великому корисному ефекті.

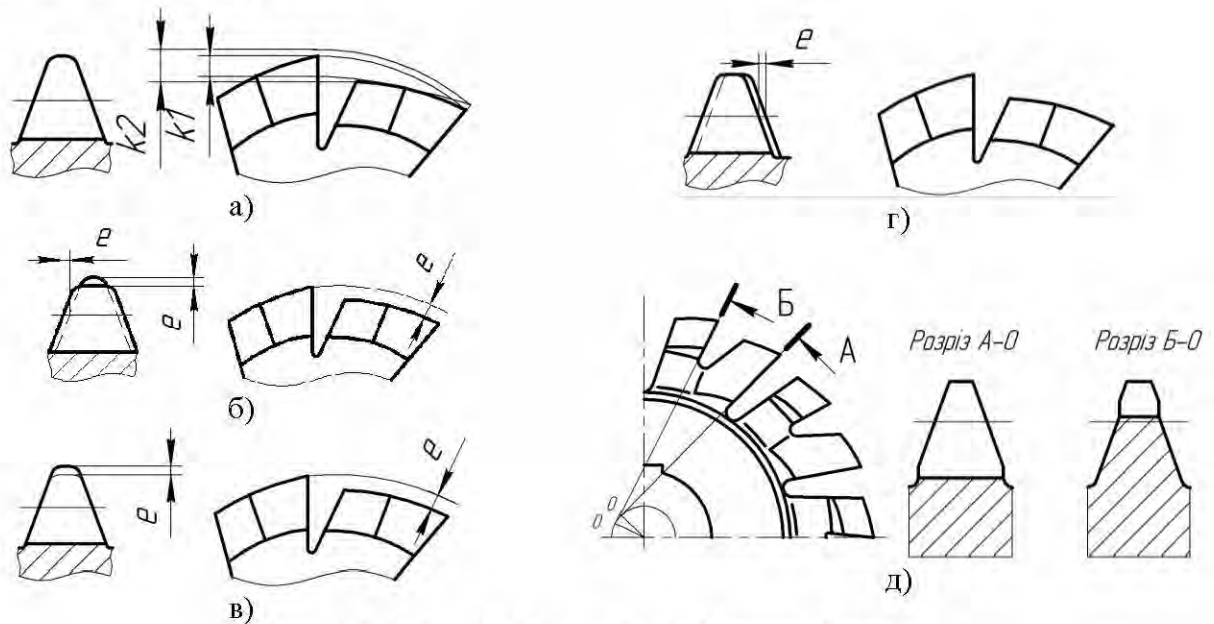


Рис. 1.3 Схеми різання черв'ячних фрез

а) профільна; б) прогресивна; в) вершинно навантажена; г) з поперемінно навантаженими різальними кромками; д) з поділеним профілем початкового контуру.

Збірні черв'ячні фрези, по п. 2 класифікації, представлені декількома видами відносно усталених конструкцій, які пропонують відомі виробники зуборізного інструменту.

Фірмою SANDVIK COROMANT [5, 23] пропонується конструкція із вставними зубцями, рис. 1.4. Схема різання такої фрези профільна (рис. 1.3, а). Кріплення зубців відбувається за допомогою клинового прижиму та гвинта.



Рис. 1.3 Збірна черв'ячна фреза із вставними зубцями

а) зовнішній вигляд; б) кріплення різального елементу.

Така конструкція має ряд недоліків, зокрема низьку жорсткість, точність та використовується переважно для попередньої обробки. Однак до переваг слід віднести можливість заміни будь-якого зубця, який вийшов з ладу, навіть не знімаючи фрезу з верстату.

У той же час, фірма SAAZOR [5, 22] пропонує збірну черв'ячну фрезу із вставними рейками, рис. 1.4. У порівнянні із попередньою конструкцією (рис. 1.3), слід відмітити більш простішу конструкцію для виготовлення, але й більшу частку задіяного інструментального матеріалу. Використовується також, переважно для попередньої обробки.

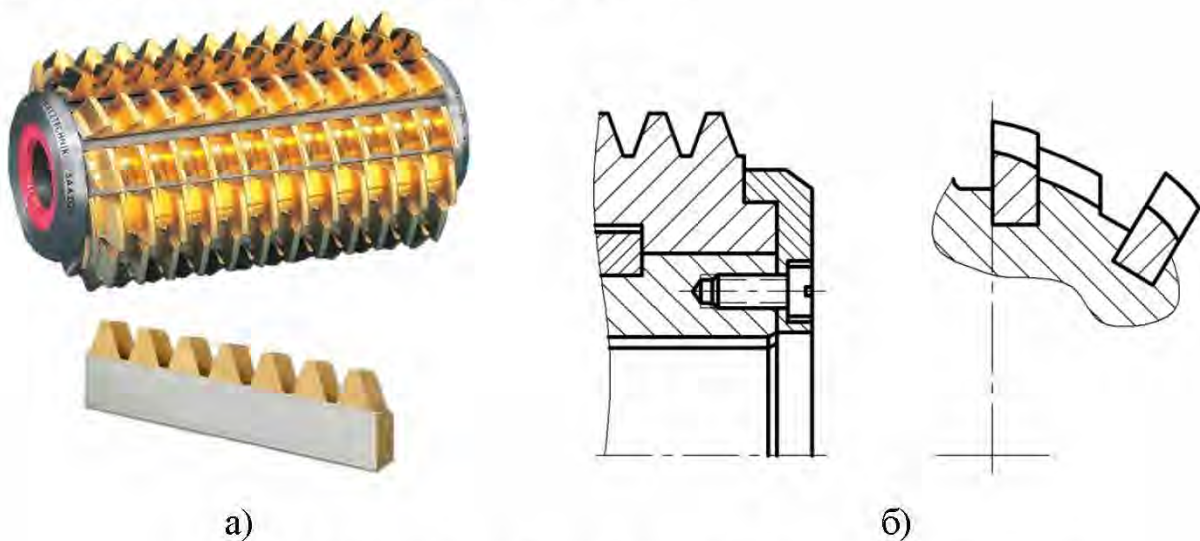


Рис. 1.4 Збірна черв'ячна фреза із вставними рейками

а) зовнішній вигляд; б) кріплення різального елементу.

Компромісним варіантом являється конструкція, яка представлена на ринку зуборізного інструменту фірмами LMT-FETTE та GLEASON [12, 15]. Корпус фрези, рис. 1.5, являє собою полий циліндр із базовими різьбовими отворами, до якого приєднуються сектори трапецеїдального перерізу, із встановленими на них різальними пластинами. Таке конструктивне виконання дозволяє реалізовувати декілька схем різання: з поперемінно навантаженими різальними кромками (рис. 1.5, в) або із поперемінно навантаженими різальними кромками та поділеним профілем (рис. 1.5, г). Схема різання обирається для конкретних умов обробки, як і конфігурація фрези – встановлення усіх секторів на корпус, або лише 2...4 витки.

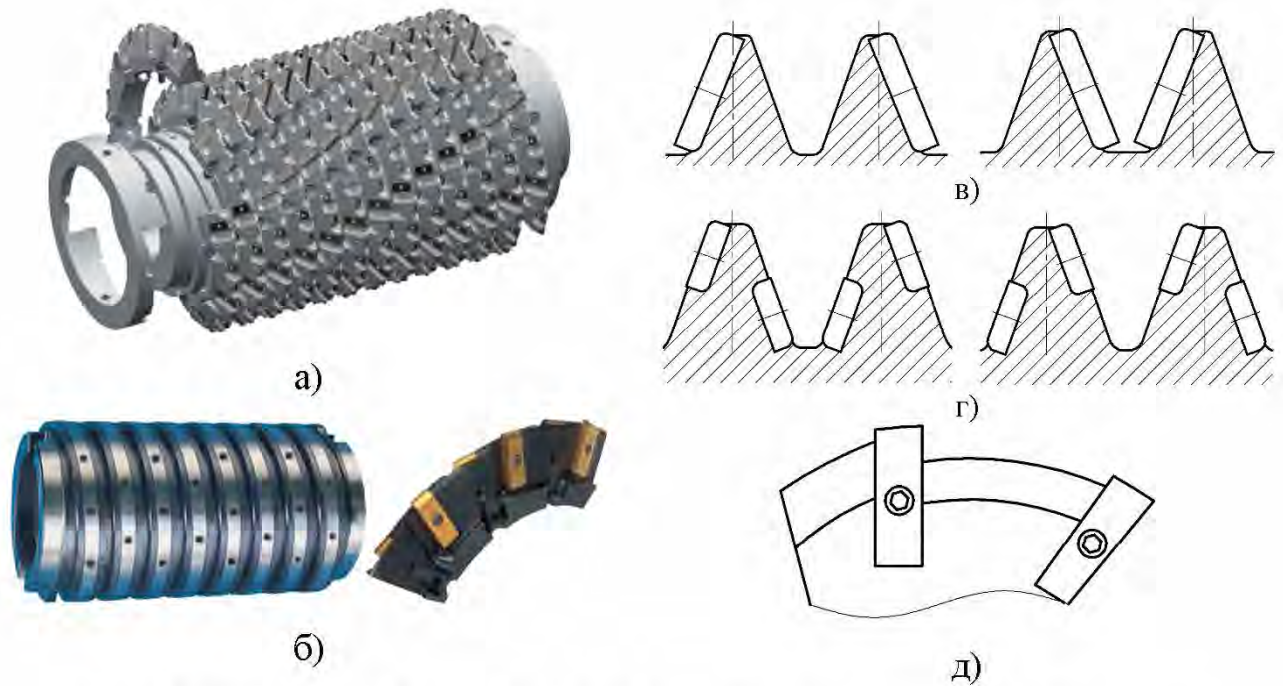


Рис. 1.5 Збірна черв'ячна фреза із вставними сегментами, які оснащені універсальними різальними елементами

а) зовнішній вигляд; б) корпус та різальний елемент; в) схема різання з поперемінно навантаженими різальними кромками; г) схема різання з поперемінно навантаженими різальними кромками та поділеним профілем; д) кріплення різального елемента.

З огляду на особливості такої конструкції, фрези мають значний зовнішній діаметр тому використовуються переважно для попередньої обробки крупномодульних зубчастих коліс.

Окремими пунктами, п. 3 та п.4, у класифікації винесені черв'ячні фрези, для обробки по технології «Skiving». Особливістю конструкції таких черв'ячних фрез є виконання передньої поверхні різальної рейки під значним від'ємним кутом $\gamma = -15^\circ \dots -30^\circ$. Таке виконання передньої поверхні сприяє досягненню значних кутів нахилу різальних кромки λ , що в свою чергу позитивно впливає на стружкоутворення, напрямок сходження стружки, її величину та напрямки векторів дії сили різання. Найбільше розповсюдження такі фрези та метод отримали при чистовій обробці загартованих шестерень.

Обумовлений клас фрез також представлений суцільнометалевою та збірними конструкціями [12, 15, 22]. Суцільнометалева фреза майже нічим не відрізняється від відомих фрез, окрім геометрії різальної частини, рис. 1.6, а, в.

Збірні конструкції бувають із механічним кріпленням різальної частини, по типу фрези із вставними сегментами, які оснащені універсальними різальними елементами (рис. 1.5), та із з напайними твердосплавними різальними елементами.

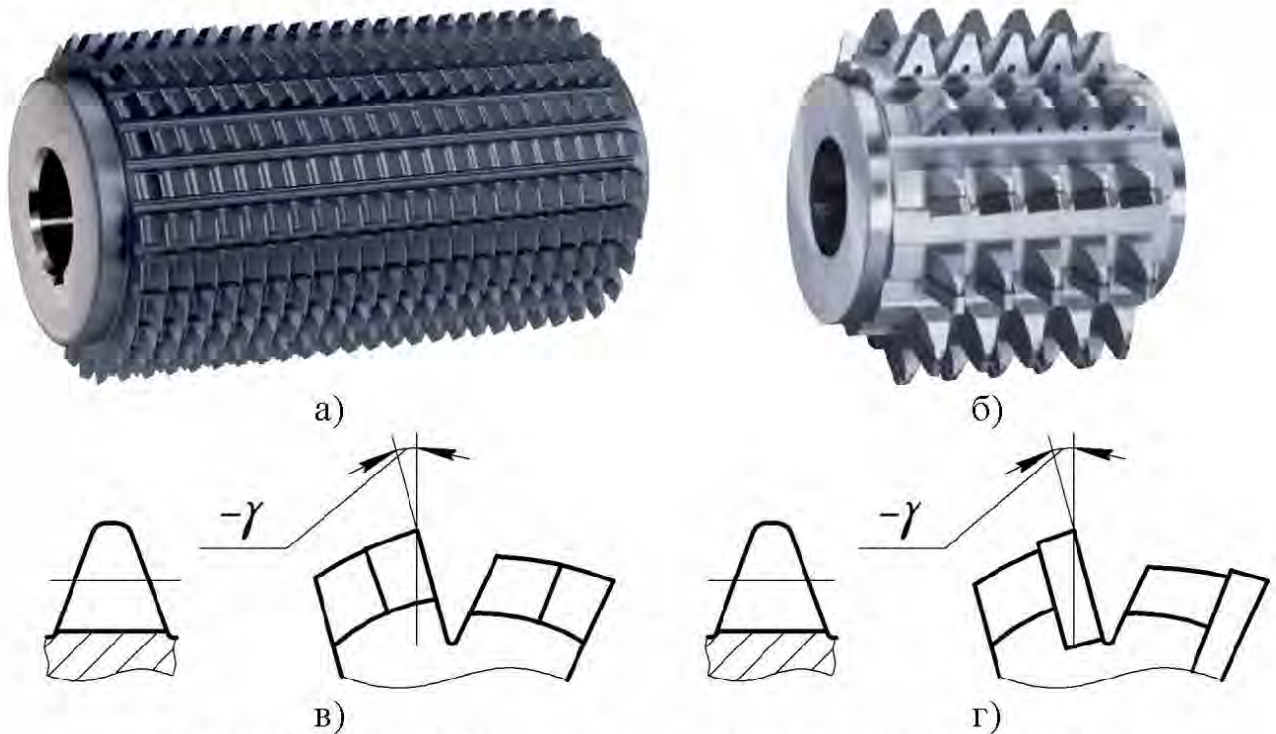


Рис. 1.6 Черв'ячні фрези для обробки по технології «Skiving»

а) суцільнометалева фреза; б) з напайними твердосплавними різальними елементами;
в) геометрія різальної частини суцільнометалевої фрези; г) геометрія різальної частини фрези із напайними твердосплавними різальними елементами.

Порівняльні показники конструкцій зведено до табл. 1.1.

Як видно, конструкції збірних черв'ячних фрез складні та недосконалі. На теперішній час, існують декілька видів усталених конструкцій, які представлені різними виробниками зуборізного інструменту, які й проводять його вдосконалення. Недоліками таких конструкцій є необхідність точного виготовлення корпусних деталей, посадкових місць для змінних різальних елементів, а велика кількість таких конструктивних елементів знижують надійність фрез. Переважна більшість таких фрез рекомендуються для чорнової та напівчистої обробки.

Застосування раціональних схем різання у конструкції традиційних фрез не набуло значної популярності, так як призводить до ускладнення і без того

складної геометрії різальної частини зубців і, як наслідок, викликає складності при виготовленні і експлуатації такого інструменту.

Таблиця 1.1

Конструкція фрези	Порівняльні показники							
	Геометрія різальної частини			Схема різання	Форма задньої грані	Матеріал різальної частини	Оброблюваний матеріал	Точність обробки по DIN 3962
	γ	α_B	α_b					
Рис. 1.2, а	0°	10...12°	2...4°	Профільна	Затилована	Швидкорізальні сталі	Сталь HB 200	Попередня обробка: 9...10 кв.; кінцева обробка: 8...9 кв.
Рис. 1.2, б				Прогресивна				Попередня обробка: 9...10 кв.
				Вершинно навантажена				
				З попеременно навантаженими РК				
				З поділенням профілем початкового контуру				
Рис. 1.2, в				Тверді сплави	Сталь HB 200...300	Попередня обробка: 9...11 кв.; кінцева обробка: 8...9 кв.		
Рис. 1.3								
Рис. 1.4								
Рис. 1.5							Профільна	Гострозаточена
							З попеременно навантаженими РК	
Рис. 1.5	З попеременно навантаженими РК та поділенням профілем							
	Рис. 1.6, а	-15...-30°			Профільна	Затилована	Сталь HB 55...62	Кінцева обробка: 7...8 кв.
Рис. 1.5 + геометрія «Skiving»	З попеременно навантаженими РК				Гострозаточена			
	З попеременно навантаженими РК та поділенням профілем							
Рис. 1.6, б	Профільна				Затилована			

1.1.3 Аналіз стружкоутворення при обробці черв'ячними фрезами

Аналіз процесів стружкоутворення при обробці зубчастих коліс традиційними черв'ячними фрезами потребує визначення перетинів зрізів, які знімаються зубцями фрези під час формування міжзубової западини. У відомих класичних роботах [25, 28], які були проведені в Аахенському вищому технічному училищі, досліджувалися геометричні розміри (товщина та ширина) зрізів, які знімаються окремими зубцями фрези. На рис. 1.7 співставленні значення перетинів зрізів та сили різання: вгорі приведені відповідні товщини зрізів, а знизу – отримані результати вимірювань сили різання для кожного активного зубця фрези приведені.

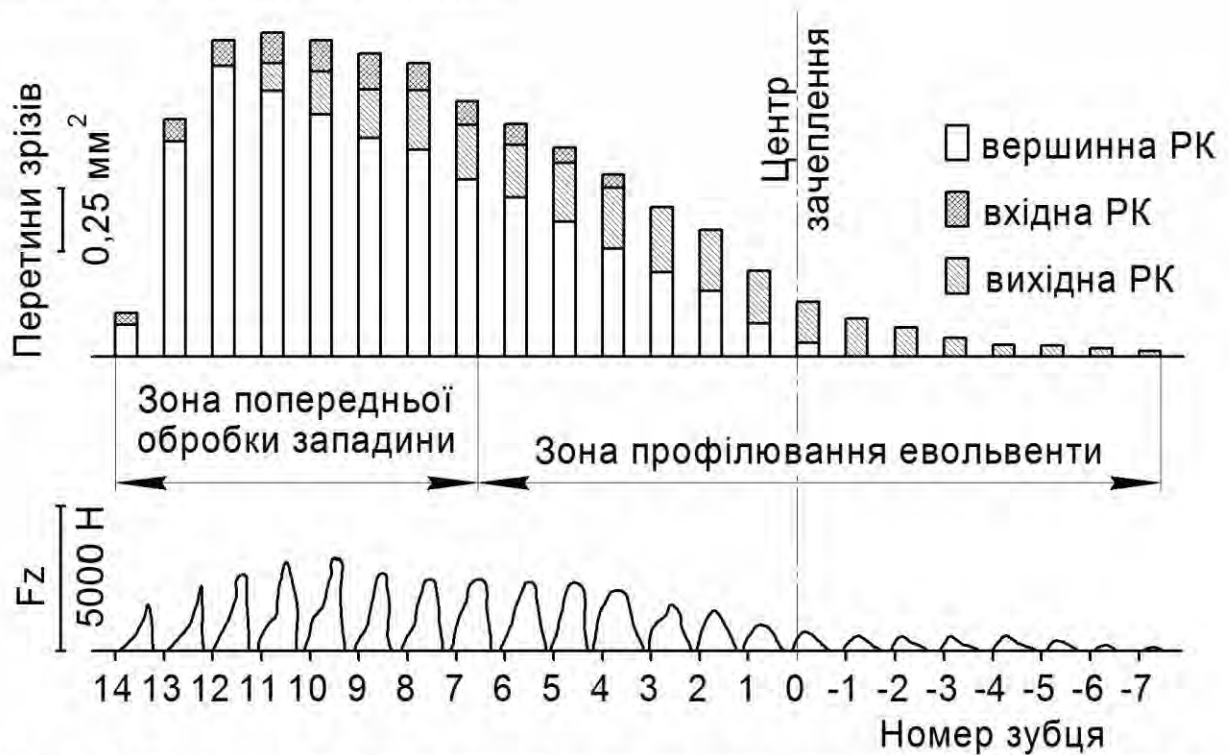


Рис. 1.7 Перетини зрізів та сили різання на кожному окремому зубці фрези.

Як видно на рис. 1.7, значення головної сили різання і перетинів зрізів при черв'ячному зубофрезеруванні знаходяться в залежності одне від одного, та мають різні значення для кожного окремого зубця черв'ячної фрези. На цю залежність впливають геометричні параметри фрези та заготовки. Це відмінна риса методу черв'ячного зубофрезерування, у порівнянні з іншими видами

обробки різанням, у яких збільшення подачі інструменту безпосередньо тягне за собою зміну товщини зрізу.

Дані отримані при проведенні дослідів по нарізанню зубчастих коліс з тільки однією міжзубовою западиною, це й дозволило встановити залежність між виміряною головною силою різання для кожного зубця та перетином зрізу, який розраховувався. Як видно, наведені на рис. 1.7 перетини зрізів поділяються по трьом різальним кромкам зубця фрези – різальній кромці при вершині і двом бічним. Також видно, як у зоні врізання зубця фрези у заготовку, на вершинну різальну кромку припадають значно більші перетини зрізів, у порівнянні із бічними. Саме визначення залежності між перетином зрізу та виникаючою силою різання дозволить відносно точно встановити причини зносу та спрогнозувати тривалість роботи інструменту.

Зміна вісєвої подачі майже не впливає на товщини зрізів, що знімаються окремими зубцями черв'ячної фрези, як показано на рис. 1.8. Видно, що товщина зрізу збільшується від середини зачеплення у напрямку вхідної частини черв'ячної фрези, характер збільшення – лінійний. Значення майже не відрізняються для всіх приведених вісєвих подач, відхилення помітні лише на зубцях, які вступають у прорізання міжзубової западини першими.

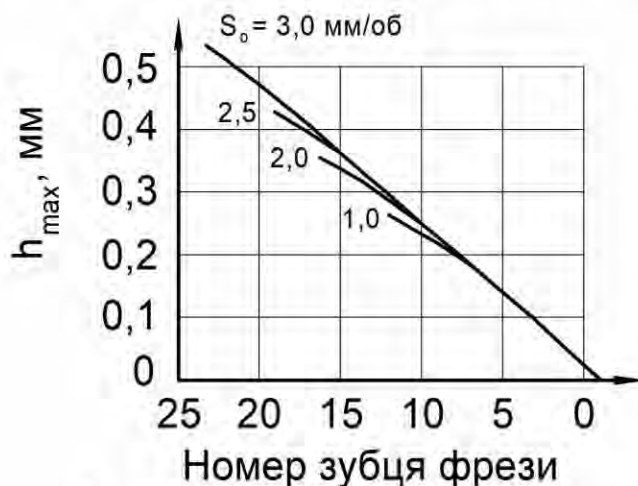


Рис. 1.8 Вплив вісєвої подачі на товщину зрізу

h_{max} – максимальна товщина зрізу;

S_0 – величина вісєвої подачі.

На приведеному графіку також чудово видно, що при черв'ячному зубофрезеруванні зубці фрези навантажуються нерівномірно.

Інше відоме сучасне дослідження [10] представляє процес різання при зубофрезеруванні як модель, приведену на рис. 1.9, а.

Автори зазначають, що моделювання процесів черв'ячного зубофрезерування не проста задача, так як воно має складну кінематику

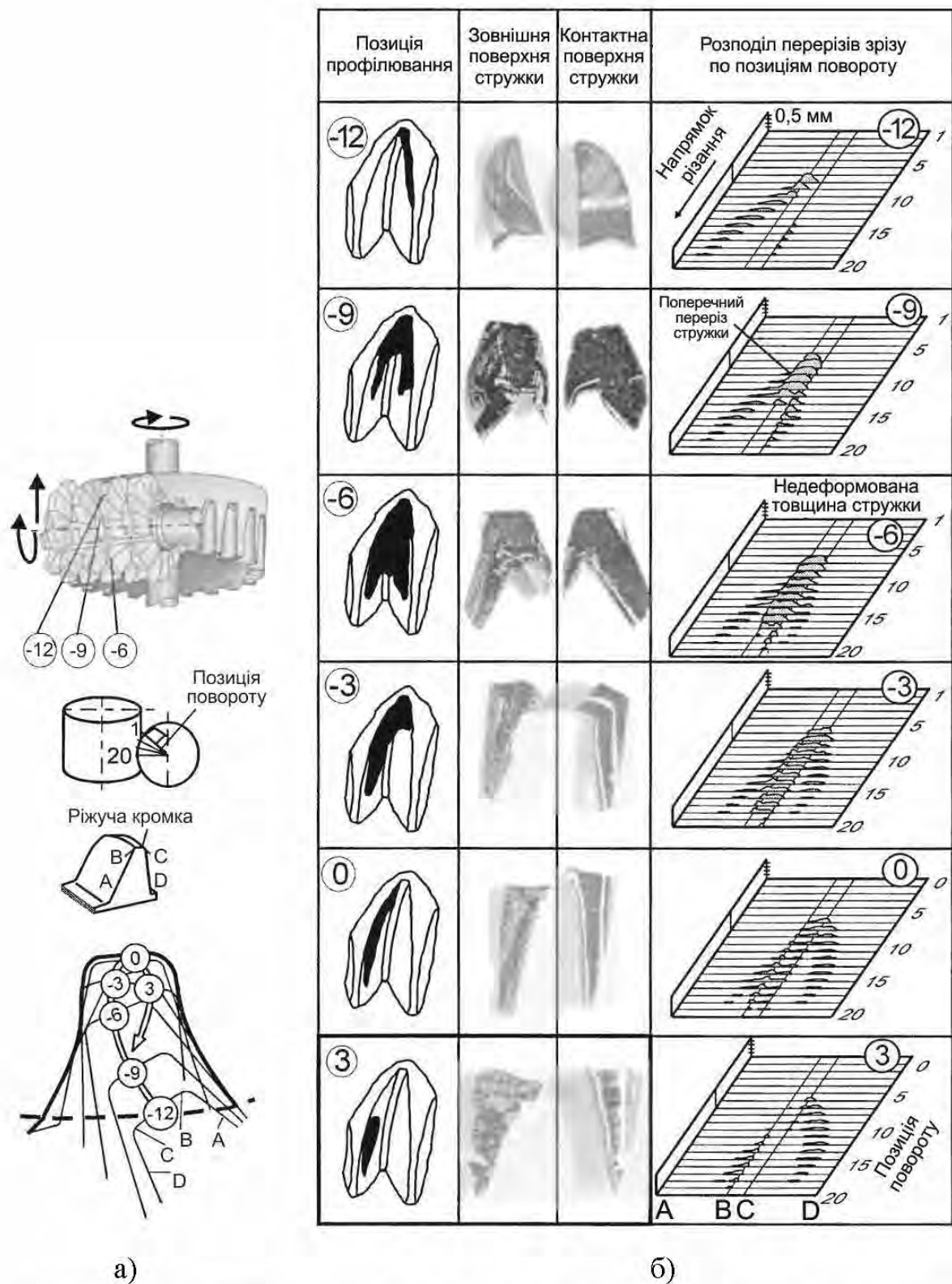


Рис. 1.9 Формоутворення і типові стружки на різних твірних позиціях інструменту при зубофрезеруванні, а також відповідні аналітично визначенні поперечні перерізи зрізаємого шару

формоутворення – кожна міжзубова западина деталі утворюється шляхом послідовних зрізів формоутворюючих різальних кромek інструменту, в окремих положеннях генерації профілю. Також, для підвищення рівня адекватності моделі, у роботі враховують траєкторію обертання інструменту в момент кожного проникнення зубцем черв'ячної фрези у міжзубову впадину деталі. Таке поняття було введено для описання поперечного перерізу знімаємого матеріалу, та отримало назву «позиція повороту». Автори дійшли висновку, що параметри, які дійсно впливають на стійкість фрези – це процес формування стружки і її потік. У таблиці на рис. 1.9, б показані зображення стружок, які утворені у визначених позиціях генерації, та відповідні їм оброблені поверхні заготовки. Під час моделювання обробки шестерні, комп'ютерною програмою обчислюється ширина та товщина недеформованих зрізів в різних положеннях повороту і позиціях генерації. Ця програма використовує принцип, який заснований на математичному описанні руху різального інструменту у міжзубову впадину оброблюваної шестерні. Усі значення недеформованих поперечних перерізів матеріалу, який знімається кожною різальною кромкою, представляються графічно на діаграмі, де приведені послідовні позиції обертання інструменту та положення генерації, рис. 1.9, б.

Дослідниками [10] також вивчалися умови різання при врзанні фрези у заготовку та при виході із тіла деталі, у так званих перехідних зонах, так як стружкоутворення у цих зонах відрізняється від зони повного різу, рис. 1.10.

Форма недеформованого зрізу, із врахуванням напрямку різання, у таких перехідних положеннях являє собою передню або задню частину від форми недеформованих зрізів при повному зрізі. У позиціях генерації «11» та «12», для умов які досліджуються у роботі, спостерігаються зрізи із подібною геометрією та габаритними розмірами відносно стружок повного зрізу. У інших позиціях генерації утворюються тільки частини форми стружок повного зрізу. У послідовних положеннях генерації при вході різальної кромки довжина стружок зростає, в той час як при виході із аналогічних положень генерації, довжина стружки характерно зменшується.

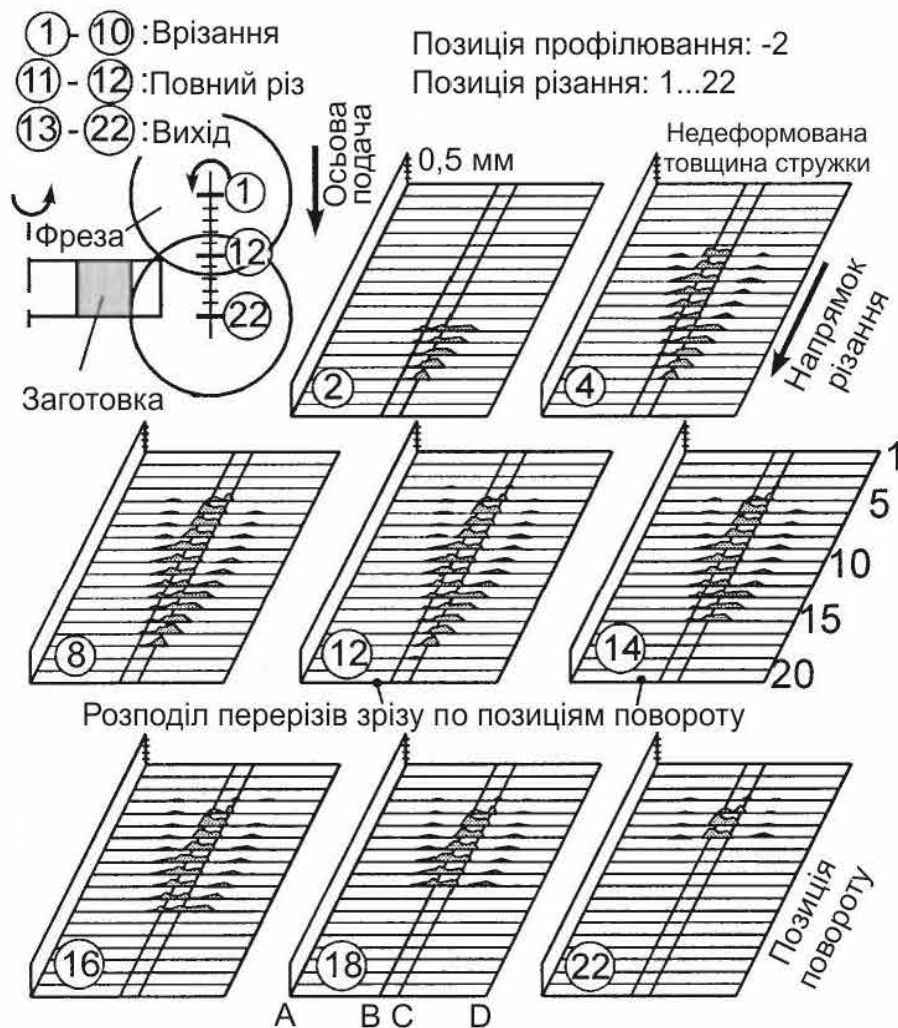


Рис. 1.10 Розподіл недеформованих поперечних перерізів зрізаємого шару в зоні врізання, при повному різі і виході інструмента.

1.1.4 Похибки черв'ячного зубофрезерування, пов'язані із конструкцією черв'ячних фрез

Нарізання високоякісних зубчастих коліс методом черв'ячного зубофрезерування з необхідними параметрами точності – відповідальна технологічна задача, на яку впливають багато факторів, зокрема:

- технологічні можливості та динамічні характеристики зубофрезерного верстату;
- точність виготовлення та встановлення різального інструменту.

Похибки, які виникають в наслідок неточності виготовлення черв'ячної фрези відносяться до систематичних, та наведені на рис. 1.11 [27].

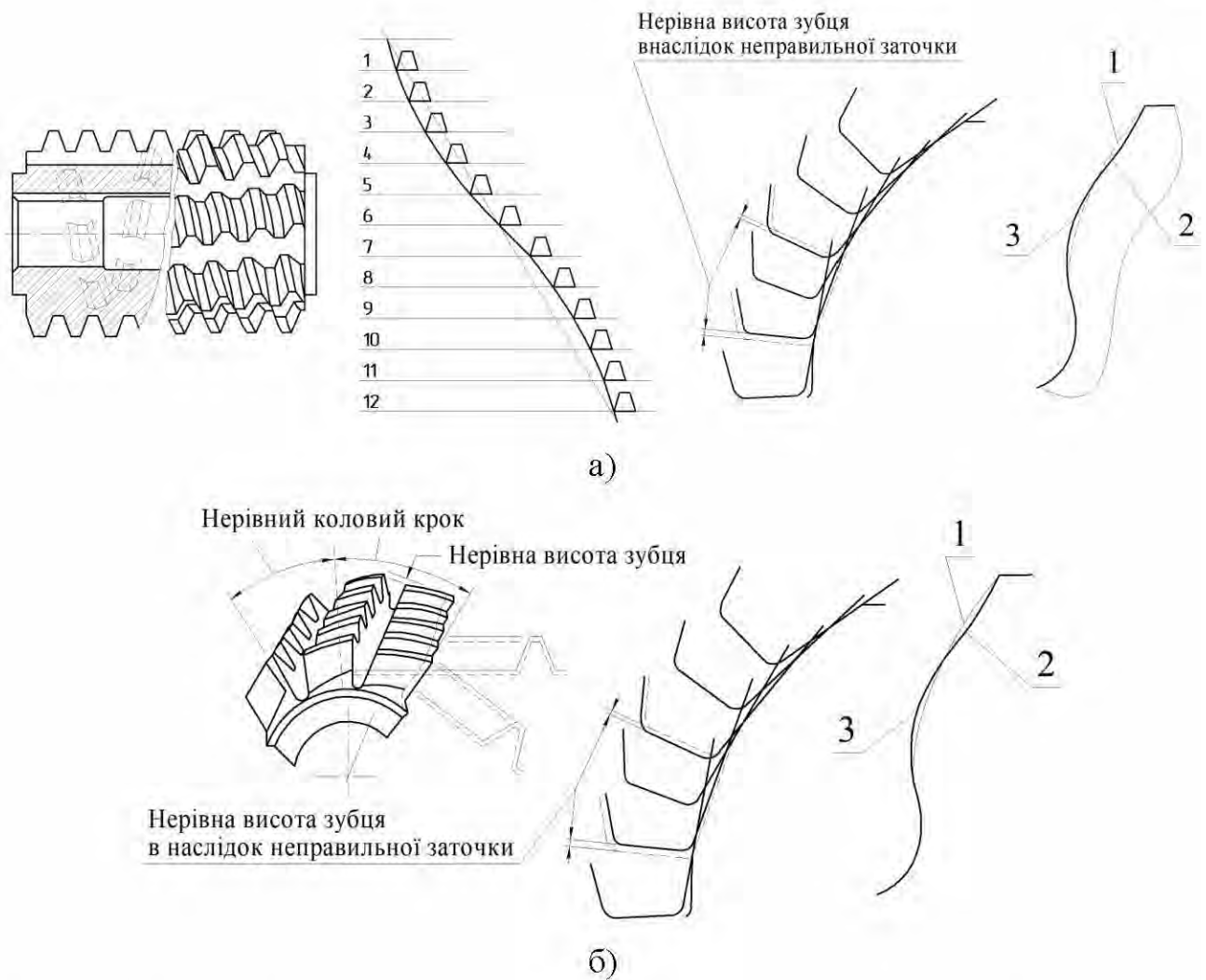


Рис. 1.11 Вплив відхилення вісєвого кроку (а) та накопиченої похибки колового кроку (б) фрези на оброблюваний евольвентний профіль

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

До систематичних похибок обробки зубчастих коліс черв'ячними фрезами також відносяться похибки від неточності заточування фрези. Вплив таких похибок на оброблюваний евольвентний профіль показано на рис. 1.12.

Переточування черв'ячних фрез виконується по переднім граням різальних рейок. Фрези із зносостійким покриттям додатково проходять операції з зняття та нанесення цього зносостійкого покриття. Після переточки, фреза перевіряється за наступними параметрами:

- прямолінійність передньої поверхні (в радіальному напрямку);
- відхилення гвинтової поверхні;

– похибка окружного кроку зубців фрези.

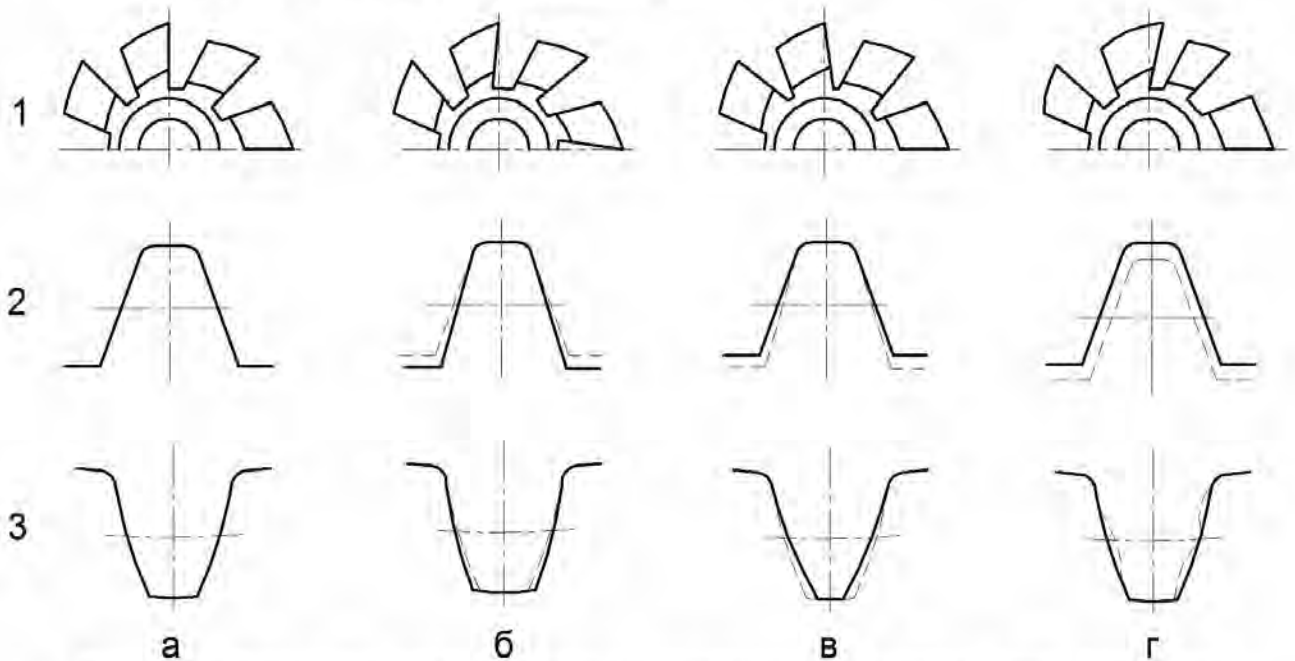


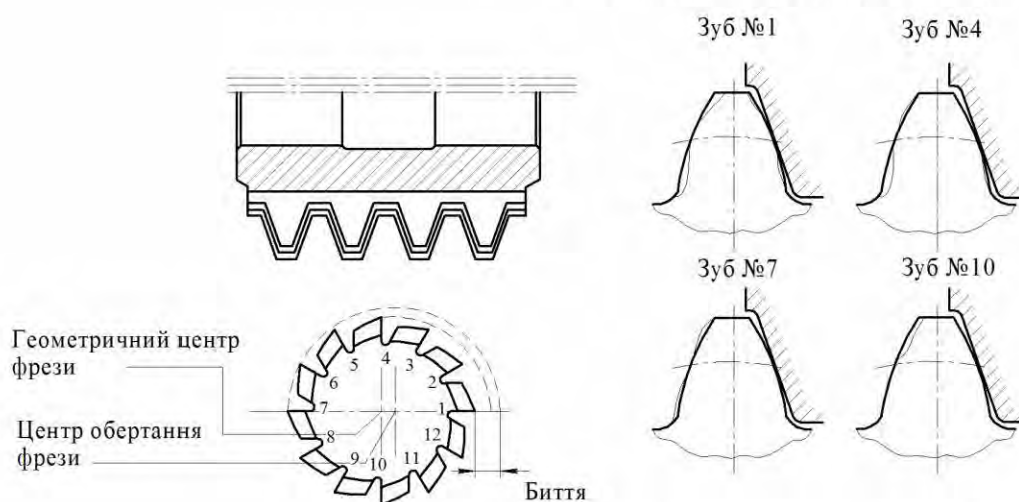
Рис. 1.12 Вплив похибки передньої поверхні рейок черв'ячної фрези на оброблюваний евольвентний профіль

а - коректна заточка (передня поверхня рейки знаходиться в радіальній площині);
 б, в, г – заточки із відхиленням (передня поверхня рейки відхилена від радіальної площини);
 1 - форма передньої грані черв'ячної фрези; 2 - профіль зубців фрези;
 3 - профіль зубців обробленого зубчастого колеса.

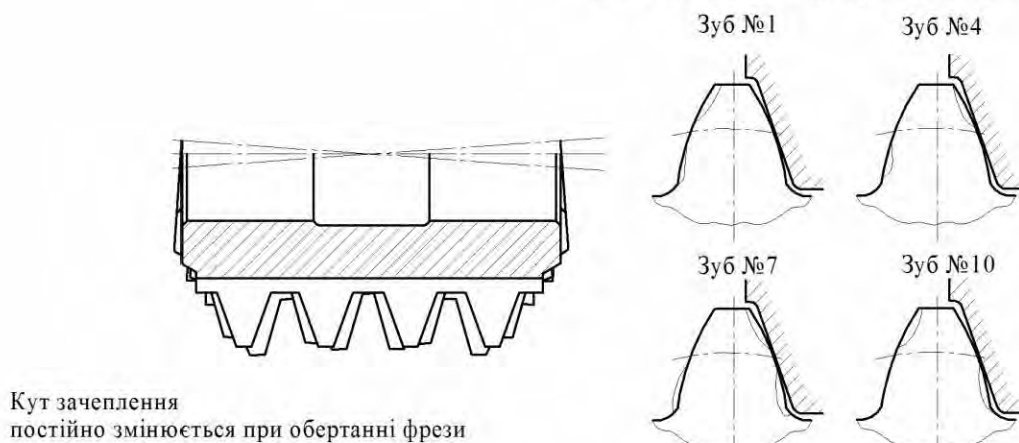
Точність установки фрези на інструментальній оправці зубофрезерного верстату також має свій вплив на точність обробки деталі, як показано на рис. 1.13 [27].

Велика кількість класичних робіт по тематиці зубофрезерування присвячена дослідженням впливу перелічених факторів на точність та якість обробки зубчастих коліс.

Результат биття фрези на обробленому зубчастому колесі



Результат биття фрези на обробленому зубчастому колесі



Результат биття фрези на обробленому зубчастому колесі

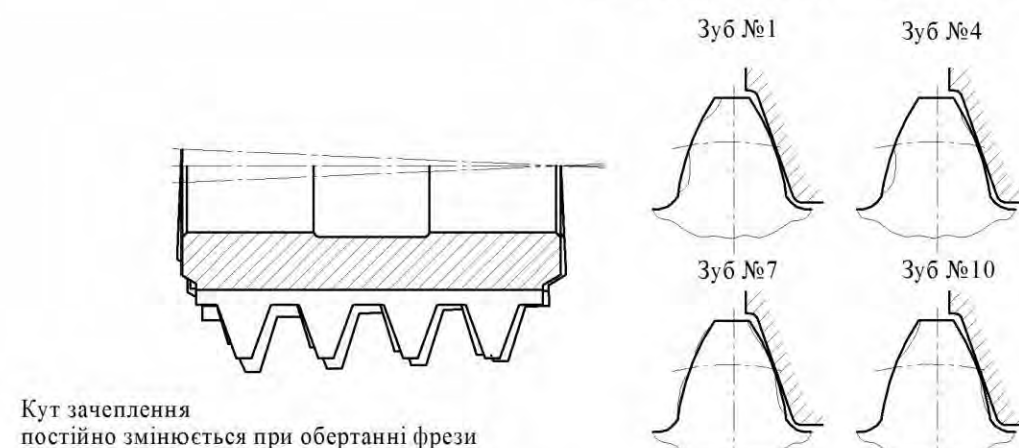


Рис. 1.13 Вплив радіального биття фрези на оброблюваний евольвентний профіль деталі

1.2 Аналіз процесу різання при черв'ячному зубофрезеруванні

Підрозділ присвячений питанням процесу зносу черв'ячних фрез та силам різання, що виникають у процесі обробки.

1.2.1 Аналіз зносу традиційних черв'ячних фрез

На рис. 1.14 приведено зображення типового зношеного зубця черв'ячної фрези, де чітко можна виділити такі види зносу: лунка на передній поверхні, викришування, округлення вершинної різальної кромки, знос по задній поверхні, знос по профілю у вигляді скруглення бічної кромки [7, 15, 25].

Процес зношування зубців фрези нерівномірний, як показано на рис. 1.15, причиною цього є складні умови стружкоутворення та органічно притаманні методу особливості. На графіку рис. 1.15 видно, що найбільше зношується вхідна різальна кромка, яка здійснює різання по суцільному матеріалу міжзубової западини, та працює в умовах попутного фрезерування.

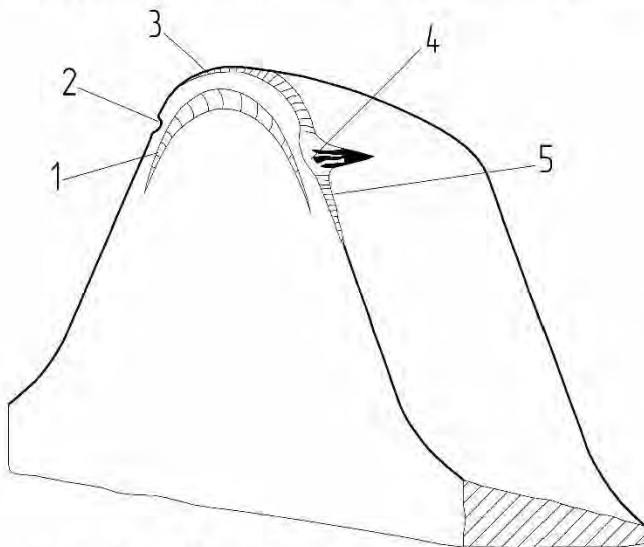


Рис. 1.14 Типові сліди зносу на зубці черв'ячної фрези

1 – лунка; 2 – викришування;
3 – округлення вершинної різальної кромки;
4 – знос по задній поверхні; 5 – округлення бічної різальної кромки.

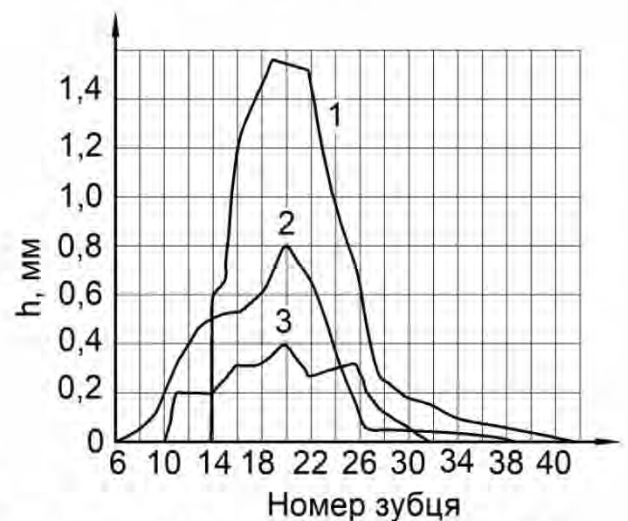


Рис. 1.15 Розподіл зносу задніх поверхонь на зубцях фрези

1 – бічна різальна кромка, попутне фрезерування (вхідна кромка); 2 – бічна різальна кромка, зустрічне фрезерування (вихідна кромка); 3 – вершинна різальна кромка.

Дослідження зносу черв'ячних фрез, зазвичай, проводяться в умовах виробництва, бажано масового або крупносерійного. Результати таких досліджень зносу, в умовах виробництва, наведено на рис. 1.16.

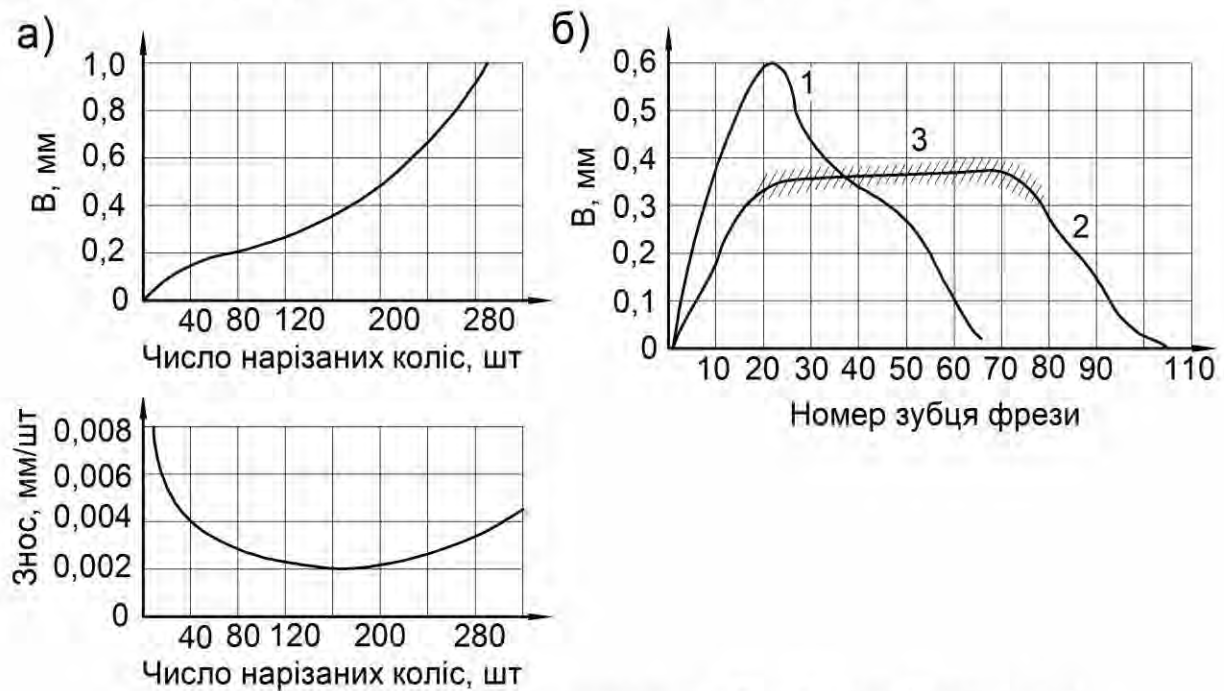


Рис. 1.16 Величина стрічки зносу по бічній задній поверхні

а) в залежності від числа нарізаних шестерень; б) розподіл по окремим зубцям фрези;
 B - ширина стрічки зносу, мм; 1 – без пересувки, обробка 50 шестерень; 2 – обробка 150 шестерень з пересувками (крок пересувки 0,65 мм на 10 шестерень); 3 - розсіювання даних.

Верхній графік на рис. 1.16, а показує залежність величини зносу по задній поверхні B від числа нарізаних шестерень. Залежність має типовий вигляд, характеризується незначним зростанням зносу на початку різання досліджуваною фрезою, та із ділянкою з майже лінійною характеристикою зростання зносу в середині графіку. Подальша обробка зубчастих коліс пришвидшує знос інструменту (крива зносу показує більш круте підвищення). Нижній графік на рис. 1.16, а показує як змінюється ширина стрічки зносу B , у відношенні до одного обробленого колеса, та в залежності від кількості оброблених зубчастих коліс. Як видно, графік має зону із мінімальним зносом, ці значення можуть допомогти у визначенні раціональної величини вісєвої пересувки фрези, із мінімальними витратами на різальний інструмент. Під

шириною B стрічки зносу мається на увазі максимальний знос по бічній стороні профілю черв'ячної фрези, для даного випадку.

На рис. 1.16, б приведено характер розподілу зносу по зубцям фрези при обробці двох партій деталей: перша партія з 50 коліс оброблена без вісєвої пересувки фрези, друга - 150 коліс, із вісєвою пересувкою. Крива поз. 1 показує характер зносу зубців фрези, у випадку попередньої прорізки міжзубової западини деталі одними і тими ж зубцями фрези, тому до максимального зносу схильна дуже обмежена кількість зубців. Випадку застосування стратегії пересувок фрези, крива поз. 2, у зону несприятливих умов різання та високого навантаження потрапляють по чергово нові зубці фрези, тому розподіл зносу по зубцям фрези рівномірний.

Також, досліджується вплив режимів різання на знос інструменту. На рис. 1.17 приведено графіки залежності зносу по задній поверхні від подачі.

Величина стрічки зносу B з розподілом по зубцям черв'ячної фрези при різних величинах вісєвої подачі показано на рис. 1.17, а, на графіку рис. 1.17, б приведено зону із максимальним зносом. Як видно, при малих подачах, хоч значення товщин зрізів та сили різання невеликі, відбувається часте врізання фрези у заготовку, для зняття необхідного обсягу матеріалу. І хоча зі збільшенням подачі зростають товщини зрізів, температура різання та навантаження на різальні кромки зубців, однак число врізань зменшується.

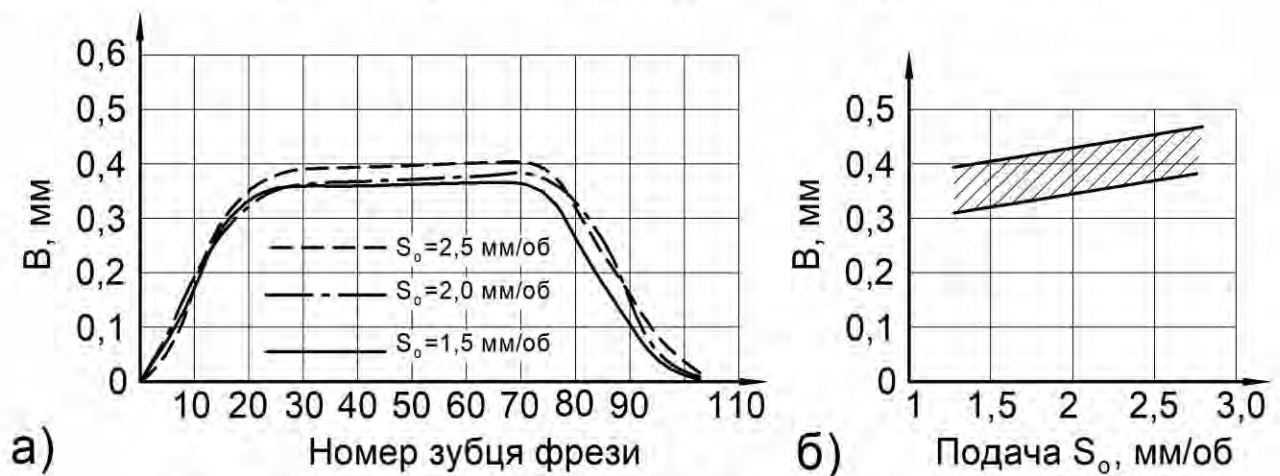


Рис. 1.17 Залежність величини зносу від вісєвої подачі фрези

а) знос зубців фрези при різних подачах; б) величина зносу в залежності від подачі;
 B - ширина стрічки зносу, мм; S_o - вісєва подача, мм/об.

Аналіз даних дослідження залежності зносу від подачі показує, що збільшення зносу із збільшенням подачі дуже незначне і значно перекривається перевагами від зниження основного часу операції різання. Тому у діапазоні подач, що розглядається, лімітуючим фактором буде шорсткість оброблених поверхонь (сліди від подачі), але аж ні як не знос черв'ячної фрези.

Усі фактори, які мають вплив на види та величини зносу черв'ячної фрези, можна поділити на три групи [14, 19]:

- геометричні параметри фрези;
- геометричні параметри заготовки;
- фактори процесу різання.

До перших двох груп належать зовнішні діаметри, лінійні розміри та модуль фрези і заготовки, число заходів і число стружкових канавок фрези, кут нахилу зубця та величина зміщення вихідного контуру деталі, а також такі фактори як: радіус при вершині зубця, задній і передній кути у різальних кромках, похибки радіального биття і напрямку гвинтової лінії, деякі інші конструктивні особливості, матеріали фрези та деталі.

До впливових елементів режимів різання – величина вісєвих пересувок черв'ячної фрези, вісєва подача та швидкість різання, а також глибина різання. Також, свій вплив вносить метод фрезерування (попутне або зустрічне), технічний стан зубофрезерного верстату, спосіб встановлення та закріплення фрези та заготовки і навіть МОР.

Перелічену множинну факторів також можна звести до двох груп:

- геометричні фактори, які виходять із геометрії зачеплення, та які визначають реальну товщину зрізу і довжину дуги зрізу, яку знімає різальна кромка фрези;
- технологічні фактори: швидкість різання, матеріали фрези та заготовки, геометрія різальної частини, МОР тощо.

Отже, зубець черв'ячної фрези зазнає зносу складної форми здебільшого внаслідок складних умов різання та стружкоутворення. Численні дослідження досконально вивчили механізми виникнення та впливові фактори.

1.2.2 Вплив параметрів режиму різання на силу різання

Результати відомих досліджень сил різання при черв'ячному зубофрезеруванні [25, 28] вказують на те, що визначення сил різання можна здійснювати на основі перетинів зрізів, які знімаються кожною різальною кромкою кожного зубця черв'ячної фрези. Визначення перетинів зрізів та сил різання дозволить прогнозувати ресурс зносу інструменту та межі використання певних інструментальних матеріалів. Для здійснення такого розрахунку необхідно мати значення перетинів зрізів, які знімаються окремими різальними кромками зубців фрези. На значення величин перетинів зрізів, а саме товщини і довжини дуг зрізів, при черв'ячному зубофрезеруванні роблять незначний вплив швидкість різання і подача, як вже зазначено у р. 1.2.1, ключовий вплив здійснюють переважно геометричні параметри черв'ячної фрези і заготовки [25]. На рис. 1.18 приведені значення головної сили різання F_z , яка виникає на окремих кромках зубців фрези, для трьох різних величин подач при зустрічному черв'ячному зубофрезеруванні прямозубого колеса.

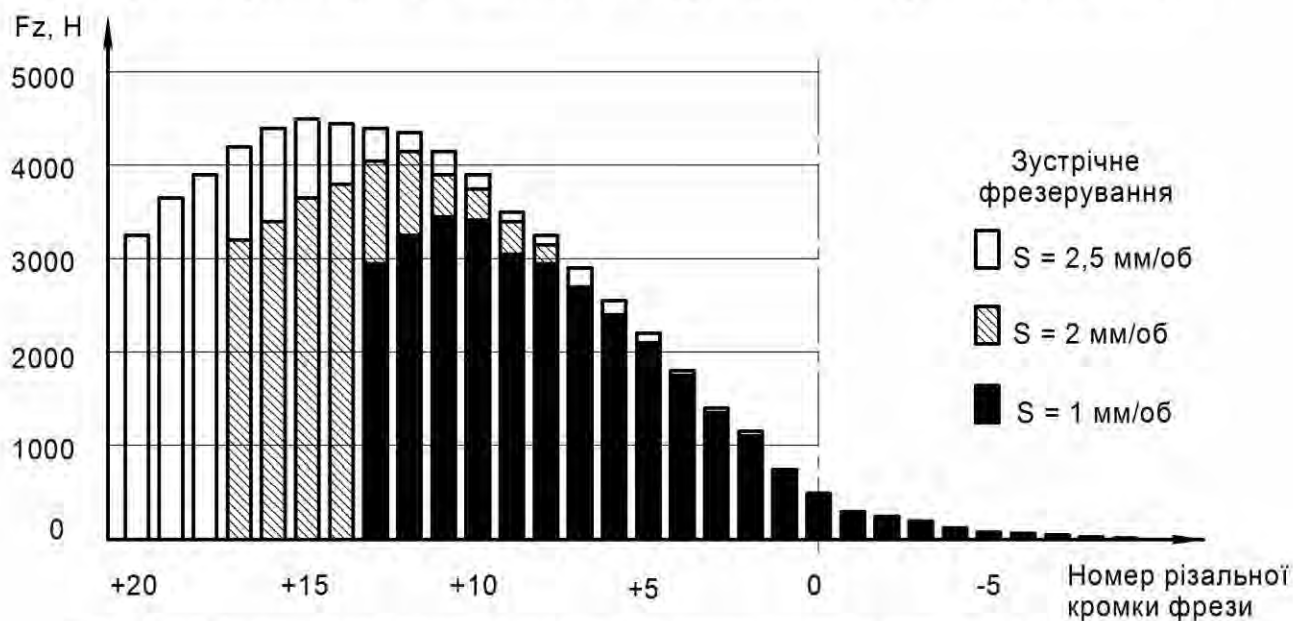


Рис. 1.18 Залежність вісєвої подачі та сили різання при зубофрезеруванні

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

Як видно на рис. 1.18, на вхідній частині фрези, яка здійснює попереднє прорізання міжзубової западини, сили різання різко зростають, але потім поступово падають, до кінця активної ділянки лінії зачеплення. Привертає

увагу те, що незважаючи на різну величину вісєвої подачі, сили різання майже однакові у зоні профілювання впадини, за винятком перших зубців, які вступають у роботу. Це явище виникає зокрема тому, що форми стружок на позиціях попереднього прорізання визначаються майже повністю лише геометричними параметрами черв'ячної фрези та заготовки. Із рис. 1.18 також видно, як впливає збільшення вісєвої подачі на кількість зубців черв'ячної фрези, які приймають участь у різанні. Як видно, при вісєвій подачі в 1 мм/об у зоні врізання працюють 13 зубців, а зі збільшенням подачі до 2 мм/об їх кількість збільшується до 17 штук, при подачі у 2,5 мм/об кількість зубців вже складає 20, що на 50% більше, ніж при подачі у 1 мм/об.

Результуючий графік дослідження впливу вісєвої подачі на головну силу різання F_z [25] приведений на рис. 1.19. Сила різання для умов, що досліджуються, стрімко зростає із збільшенням подачі до значень $S = 1,25$ мм/об, потім зростання F_z стає лінійним, пологим. Величина F_z при $S = 3$ мм/об приблизно в 2 рази перевищує значення при $S = 1,5$ мм/об. Фрезерування зустрічне.

Також, у роботі [25] вказано, що швидкість різання не має визначного впливу на силу різання. Сила різання залишалися майже постійною для всіх досліджуваних матеріалів заготовок,

при швидкостях різання, що перевищують 50 м/хв, та незначно зростали при менших швидкостях. Таке зростання сили різання F_z зі зменшенням швидкості прослідковується дещо більше при зустрічній подачі при зубофрезеруванні, ніж

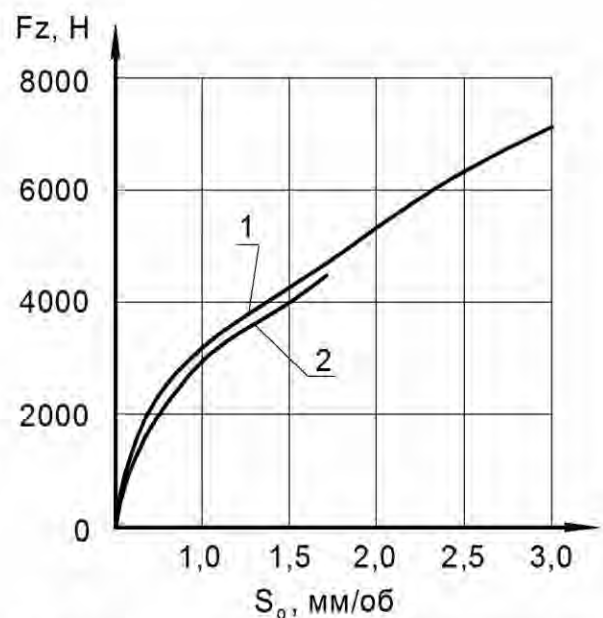


Рис. 1.19 Вплив вісєвої подачі на максимальну силу різання

1 - розраховані значення;

2 - заміряні значення;

Параметри заготовки:

$m = 5$ мм; $z = 9$; сталь 45; $\beta_0 = 0^\circ$.

Параметри інструменту:

$d = 100$ мм; $g = 1$; $i = 10$; $\gamma_0 = 0^\circ$.

при попутній. Однак незалежно від напрямку подачі та параметрів заготовки, тенденція до зменшення головної сили різання F_z спостерігалася до швидкості 20 м/хв, а при збільшенні швидкості різання понад 20 м/хв сила різання F_z не зменшувалася, як показано на графіку рис. 1.20 та табл. 1.2.

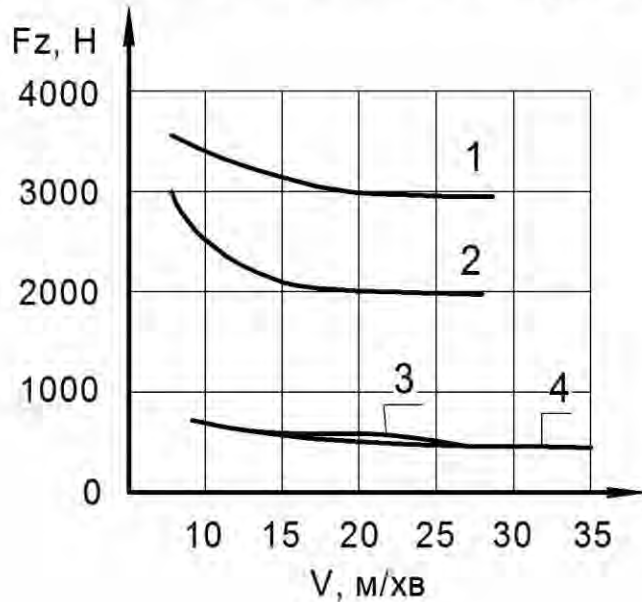


Рис. 1.20 Залежність головної сили різання від швидкості різання

матеріал заготовки – сталь 45;
глибина різання: 2,25м;
колесо прямозубе;
зміщення профілю: $x = 0$.

Таблиця 1.2

Крива на рис. 1.20	Параметри колеса			Параметри фрези		d_k , мм	i
	m , мм	z	S , мм/об	Вид фрезерування	Матеріал		
1	5	9	3	Зустрічне	P6M5	100	10
2	3	10	2		P6M5	100	10
3	5	8	1	Попутне	P6M5	100	10
4	5	8	1		P6M5K5	100	10

Це твердження особливо добре підтверджується кривою поз. 1, на рис. 1.20, для черв'ячної фрези $m = 5$ мм яка працює на значеннях подачі, що становить близько 2/3 частки модуля – $S = 3$ мм/об. Також видно, що на головну силу різання, крім параметрів режиму різання, також впливають параметри заготовки (число зубців та зміщення профілю) та інструменту (число стружкових канавок черв'ячної фрези та її радіальне биття).

Отже, сила різання, яка виникає під час нарізання зубчастого колеса методом черв'ячного зубофрезерування, залежить від розмірів перетинів зрізів що знімаються, а вплив швидкості різання та подачі незначний.

1.3 Висновки, мета і задачі дослідження

Аналіз відомих літературних джерел дає можливість охарактеризувати процес традиційного черв'ячного зубофрезерування як дуже енергозатратний процес, зі складними умовами стружкоутворення та різання, що виконується дороговартісним інструментом зі складною геометрією різальної частини. Усі ці негативні фактори впливають на досягну точність обробки шестерень та ресурс зубофрезерних верстатів.

На сьогодні, існує протиріччя між описаними у розділі, відомими та широко дослідженими, проблемами традиційного черв'ячного зубофрезерування та зовсім незначним прогресом у вдосконаленні саме процесу черв'ячного зубофрезерування, зокрема зниження його енергоємності, що в свою чергу підвищить ресурс верстатів та зуборізного інструменту, покращить точність та якість обробки.

Метою досліджень даної роботи є підвищення ефективності чистового зубофрезерування шестерень з евольвентним профілем.

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

- визначити схему взаємодії різальної кромки інструменту із оброблюваною поверхнею при формоутворенні евольвентного профілю, яка позбавлена недоліків схеми формоутворення традиційного черв'ячного зубофрезерування, та дослідити вплив процес різання;
- синтезувати метод черв'ячно-контурного зубофрезерування, на основі зміни взаємодії різальної кромки інструменту та оброблюваної поверхні;
- розробити конструкцію черв'ячної фрези із застосуванням змінних різальних пластин з механічним кріпленням;
- розробити методику та провести порівняльний аналіз формоутворення процесів черв'ячного зубофрезерування на основі тривимірних комп'ютерних моделей кінематики;
- розробити методику та провести порівняльний аналіз енергоємності процесів зубофрезерування на основі результатів аналізу формоутворення.

РОЗДІЛ 2

ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ

2.1 Загальні відомості

Показником, який обрано у цій роботі для порівняння ефективності процесів різання при зубофрезеруванні, є енергоємність різання. Розрахунок цього показника можна проводити через визначення сили різання. Задля спрощення розрахунків та по причині циклічності обробки зубчастого вінця, допускається розглядати обробку однієї міжзубової западини. Також, енергоємність різання, а саме сили різання які виникають, мають ключовий вплив на різальний інструмент, вузли верстата, їх ресурс та працездатність, що у свою чергу позначиться на точності обробленого зубчастого колеса.

Відомі дослідження [10, 16, 25], присвячені вивченню силового портрету при черв'ячному зубофрезеруванні, розглядають процес різання комплексно, із урахуванням значної кількості параметрів, для максимальної достовірності результатів. У роботі здійснено спрощення відомих методик до рівня, який не враховує постійні параметри, константи, а враховує лише ті параметри, які необхідні для порівняння ефективності методів.

Розрахунок енергоємності, в свою чергу, пропонується проводити окремо для кожного шпінделя верстату (інструменту та деталі), оскільки у конструкціях сучасних верстатів їх привод виконано від окремих електродвигунів [13, 24], з метою скорочення кінематичних ланцюгів.

2.2 Теоретичні дослідження процесів різання при зубофрезеруванні

Напрямки проведення теоретичних досліджень:

- 1) дослідження процесів утворення профілю на базі тривимірних комп'ютерних моделей кінематики зубофрезерування:
 - а) традиційного черв'ячного зубофрезерування;
 - б) черв'ячно-контурного зубофрезерування

- 2) визначення енергоємності процесів різання, на основі даних дослідження утворення профілю, по п. 1:
 - а) традиційного черв'ячного зубофрезерування;
 - б) черв'ячно-контурного зубофрезерування

2.3 Методика дослідження процесів утворення профілю на базі тривимірних комп'ютерних моделей кінематики зубофрезерування

Об'єкт дослідження – черв'ячні фрези.

Предмет дослідження – процес утворення профілю при зубофрезеруванні.

Мета дослідження – визначення степені завантаженості окремих зубців та різальних кромок зубців черв'ячних фрез, на основі геометрії недеформованих зрізів під час обробки однієї міжзубової западини зубчастого колеса.

Методика дослідження

У роботі використовується за основу відома методика дослідження процесів утворення профілю, яка описана у роботах [8, 9, 10, 16, 25]. Методика створена для точного визначення недеформованих зрізів, які знімає кожен з зубців черв'ячної фрези, який здійснює профілювання міжзубової западини. Реалізація процесу, у роботах, виконується як графоаналітично, так і за допомогою розробленого авторами програмного забезпечення.

Дослідження процесів утворення профілю починається зі створення тривимірних комп'ютерних моделей заготовки та інструменту у середовищі CAD-системи. Важливою умовою точного відтворення розмірів і форми одиничних зрізів є точне відтворення рухів і кінематики процесу різання. Для цього у методику введено поняття позицій генерації профілю та радіальних позицій по траєкторії руху зубця фрези.

Фактично, позиція генерації профілю відповідає кожному зубцю фрези, який здійснює врізання при обробці міжзубової западини, а радіальні позиції по траєкторії руху – шлях, який проходить обумовлений зубець, від початку

врізання у тіло заготовки до його виходу. Такі поняття введені для зручності дослідження методу зубофрезерування, з огляду на його складну кінематику.

На рис. 2.1 приведено схему розташування позицій генерації та радіальних січних площин при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні, для черв'ячно-контурного зубофрезерування – схеми приведено на рис. 2.2.

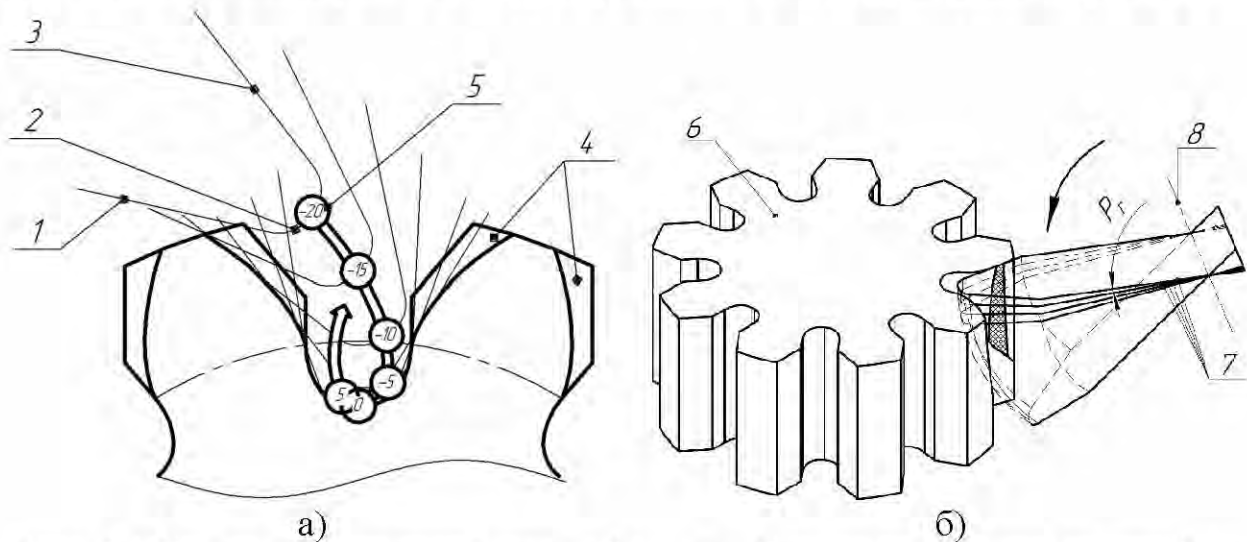


Рис. 2.1 Схема розташування позицій генерації (а) та радіальних позицій по траєкторії руху (б) зубця черв'ячної фрези при традиційній обробці

1 – вхідна різальна кромка; 2 – різальна кромка на вершині зубця; 3 – вихідна різальна кромка; 4 – припуск на обробку; 5 – позиція генерації зубчастого колеса; 6 – заготовка; 7 – радіальні позиції по траєкторії руху зубця; 8 – вісь обертів фрези; P_r – крок радіальних позицій по траєкторії руху зубця.

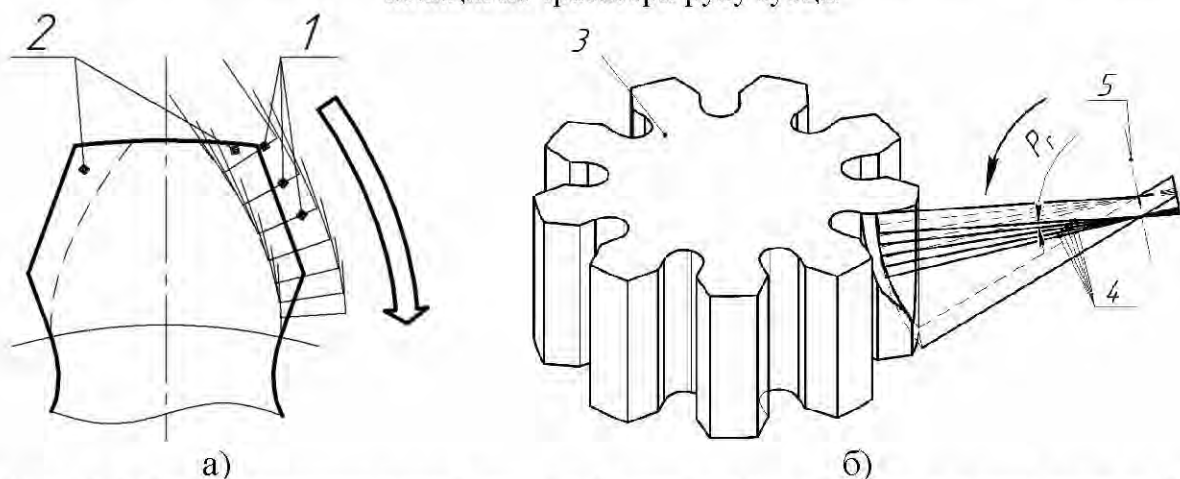


Рис. 2.2 Схема розташування позицій генерації (а) та радіальних позицій по траєкторії руху (б) зубця черв'ячно-контурної фрези при зубофрезеруванні

1 – головна різальна кромка; 2 – шар знімаемого матеріалу; 3 – заготовка; 4 – радіальні позиції по траєкторії руху зубця; 5 – вісь обертів фрези; P_r – крок радіальних позицій по траєкторії руху зубця.

Визначення форми та розмірів недеформованих площин зрізів, які знімає кожен з зубців черв'ячної фрези, відбувається із фіксацією саме у позиціях генерації у заготовці, яка сформована на попередніх позиціях генерації, у всіх радіальних позиціях траєкторії. Це відбувається шляхом порівняння із накладенням зображення поперечного перерізу деталі перед та після здійснення процесу різання і формоутворення окремим зубцем фрези, а головна умова для отримання коректного зображення геометричної форми розмірів недеформованих зрізів – це послідовна обробка зубцем фрези заготовки, яка сформована на попередніх позиціях генерації, із заданою вісевою подачею.

Нумерація позицій генерації при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні починається з від'ємних значень, при роботі зубця черв'ячної фрези вхідною різальною кромкою, перетинає положення «0», яке відповідає симетричному положенню зубця у западні зубчастого колеса, та продовжується у додатному напрямку при роботі вихідною різальною кромкою.

Позиції генерації при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні нумеруються з «1», та продовжується у додатному напрямку.

Усі **вхідні параметри теоретичного дослідження** зведено до табл. 2.1...2.3.

Таблиця 2.1

Параметри моделі

Найменування параметру	Позн.	Од. вим.	Значення	
			Традиційне черв'ячне зубофрезерування	Черв'ячно-контурне зубофрезерування
Подача на зуб фрези	S_z	мм/зуб	0,0317	0,0222
Осьова подача	S_o	мм/об. дет.	4	4
Хвилинна подача	V_f	мм/хв	88,889	88,889
Частота обертів фрези	n_f	хв ⁻¹	200	200
Крок радіальних позицій по траєкторії руху зубця	P_r	град.	3	3

Таблиця 2.2

Параметри заготовки

Найменування параметру	Позн.	Од. вим.	Значення
Кількість зубців деталі	z_d	шт	9
Модуль	m	мм	5
Величина припуску на товщину зубця*	ΔS	мм	2

* припуск на заготовці розміщено тільки вздовж евольвенти, інші поверхні впадини зубця попередньо оброблені

Таблиця 2.3

Параметри інструменту

Найменування параметру	Позн.	Од. вим.	Значення	
			черв'ячна фреза	черв'ячно-контурна фреза
Зовнішній діаметр	D_f	мм	140	140
Число зубців	z_f	шт	14	20
Модуль	m	мм	5	5
Число заходів	k	-	1	1
Напрямок витків	-	-	правий	правий
Осьовий крок	P_o	мм	14,7606	14,7606

Вихідні дані дослідження. Отримані в результаті дослідження зображення недеформованих перетинів зрізів, відображаються на діаграмах, рис. 2.3.

Окрема діаграма будується для кожної позиції генерації. У межах діаграми, зображення перетинів зрізів розміщуються по порядку радіальних січних площин, які описані горизонтальними лініями під номерами від «1» до «13», за напрямком різання. Для діаграм традиційного черв'ячного зубофрезерування, зверху позначаються різальні кромки, які здійснюють різання. Також, на діаграмі вказується масштаб. Діаграма для черв'ячно-контурного зубофрезерування (рис. 2.3, б) має дещо змінений вигляд, який враховує особливості методу.

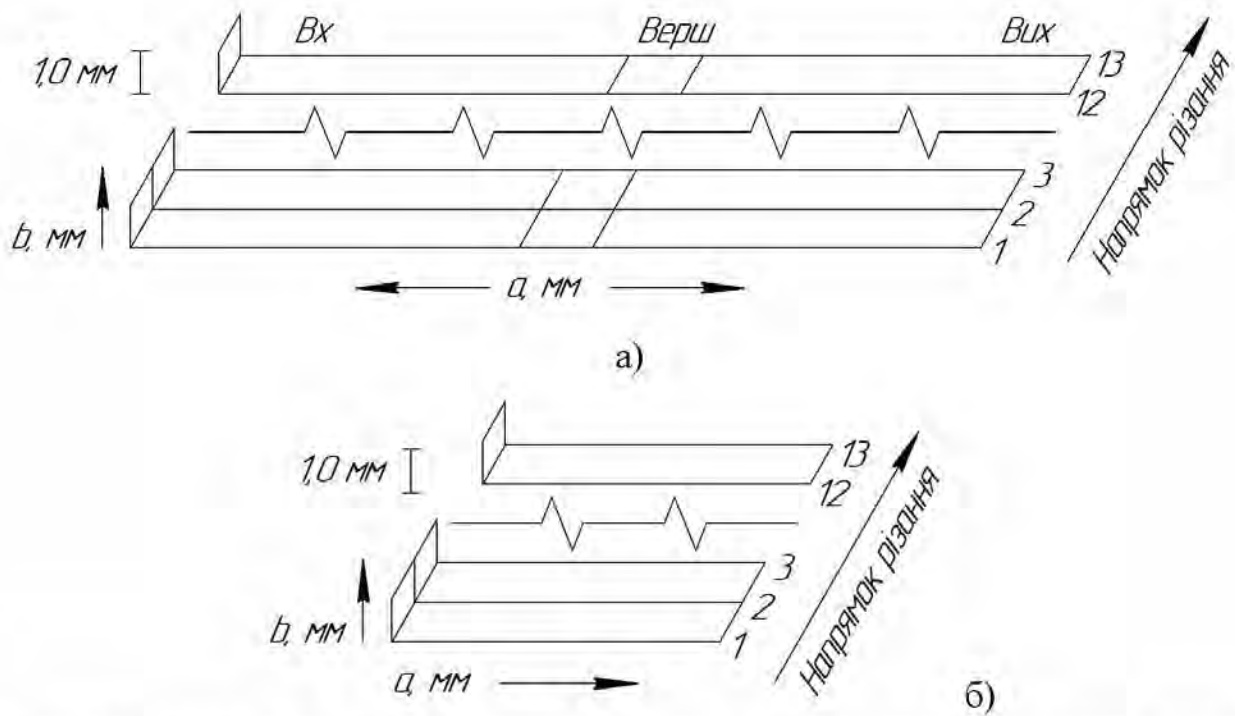


Рис. 2.3 Діаграми недеформованих перетинів зрізів традиційного черв'ячного зубофрезерування (а) та черв'ячно-контурного зубофрезерування (б)

a – ширина зрізуваного елемента, мм; b – товщина зрізуваного елемента, мм; Bx , $Верш$, Bux – різальні кромки фрези (відповідно, вхідна, вершинна та вихідна); 1...13 – номери радіальних позицій по траєкторії руху зубця.

По отриманим значенням недеформованих площин зрізу та чисельним значенням ширини та товщини одиничних зрізів будуються графіки у трьох координатах, які враховують номер позиції генерації і номер січної площини.

За допомогою таких діаграм та графіків, можна отримати повну картину про ступінь навантаження окремих зубців та ділянок різальних кромки зубця фрези при обробці однієї міжзубової западини.

2.4. Методика дослідження енергоємності процесів різання на основі результатів дослідження утворення профілю

2.4.1 Загальні положення до аналізу енергоємності процесів зубофрезерування

Приймаємо ряд припущень для здійснення аналізу енергоємності процесів черв'ячного зубофрезерування:

- 1) визначення та розрахунок силових показників процесів зубофрезерування проводимо по методиці [6, 20], яка виходить із параметру швидкості знімання матеріалу (material removal rate);
- 2) з метою обчислення відносного значення параметру енергоємності, яке необхідне для наближеного і порівняльного аналізу, у методику вводимо поняття *відносний модуль енергоємності*;
- 3) порівняльну енергоємність процесу зубофрезерування розраховуємо для інструментального шпінделя зубофрезерного верстата, по крутному моменту від тангенціальної сили F_c ;
- 4) порівняльну енергоємність процесу оцінюємо для обробки однієї міжзубової впадини зубчастого колеса;
- 5) порівняльну енергоємність E визначаємо як площу фігури, що утворюється множиною значень сил різання F_c , розрахованих для обробки однієї міжзубової западини (аналог кута повороту φ), та яка описується формулою:

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

- 6) порівняльну оцінку енергоємності здійснюємо в умовних одиницях енергоємності.

2.4.2 Методика порівняльної оцінки енергоємності процесів черв'ячного зубофрезерування

Об'єкт дослідження – черв'ячні фрези.

Предмет дослідження – продуктивність та потужність процесів черв'ячного зубофрезерування.

Мета дослідження – визначення та порівняння витрат енергії на зняття припуску та навантаження на шпіндель інструменту для процесів черв'ячного зубофрезерування на основі результатів дослідження процесів утворення профілю.

Методика теоретичного дослідження

Оцінка енергоємності процесу буде виконуватися по наступним показникам [6, 20]:

- швидкість знімання матеріалу (material removal rate) Q , см³/хв;
- споживана потужність P_C , Вт;
- сила різання F_C , Н;
- відносний модуль енергоємності $|E|$, відн. од. ен.

Ключовий параметр – споживана потужність, тобто потужність, необхідна для видалення одиниці об'єму матеріалу. Параметр є мірою опору матеріалу різанню, а також вказує на ефективність умов різання. Типові значення для звичайних матеріалів дозволяють зробити оцінку потужності різання та сили різання для заданих показників видалення металу. Ці показники корисні для конструкторів верстатів, технологів та інженерів з планування виробництва.

Швидкість знімання матеріалу Q розраховується за формулою, см³/хв:

$$Q = \frac{t \times b \times V_f}{1000}, \quad (2.2)$$

де t – глибина різання, мм;

b - ширина різання, мм;

V_f – хвилинна подача, мм/хв.

Споживана потужність P_C визначається з виразу, Вт:

$$P_c = \frac{Q \times K_c}{60}, \quad (2.3)$$

де K_c – питомий тиск різання, параметр який залежить від фізичних властивостей матеріалу та умов різання, за відомою інформацією [17, 20] приймаємо для конструкційної сталі $K_c = 1980$ МПа.

Сила різання F_c визначається з виразу, Н:

$$F_c = \frac{P_c \times 60}{V_f} \quad (2.4)$$

З огляду на моделювання обробки однакових заготовок при однакових умовах різання, головну роль для визначення усіх параметрів будуть грати значення ширини та товщини зрізів та характер їх розподілення у межах обробки однієї міжзубової западини.

Схема утворення моментів від сил різання представлена на рис. 2.4 для традиційного черв'ячного зубофрезерування та на рис. 2.5 – для черв'ячно-контурного зубофрезерування. На схемах показано вектори сил різання у верстатному зачепленні.

Зі схеми рис. 2.4 видно, як утворюється зміна напрямку моменту різання $M(F_a)$, яка викликана зміною напрямку вісєвої сили різання F_a у проміжку між обробкою вхідною бічною різальною кромкою черв'ячної фрези та роботою вихідною різальною кромкою.

Визначення моменту від вісєвої сили різання F_a , що діє на столі верстату, для традиційного черв'ячного зубофрезерування відбувається як сила F_a помножена на плече, у даному випадку - радіус основного кола r_o оброблюваної деталі:

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

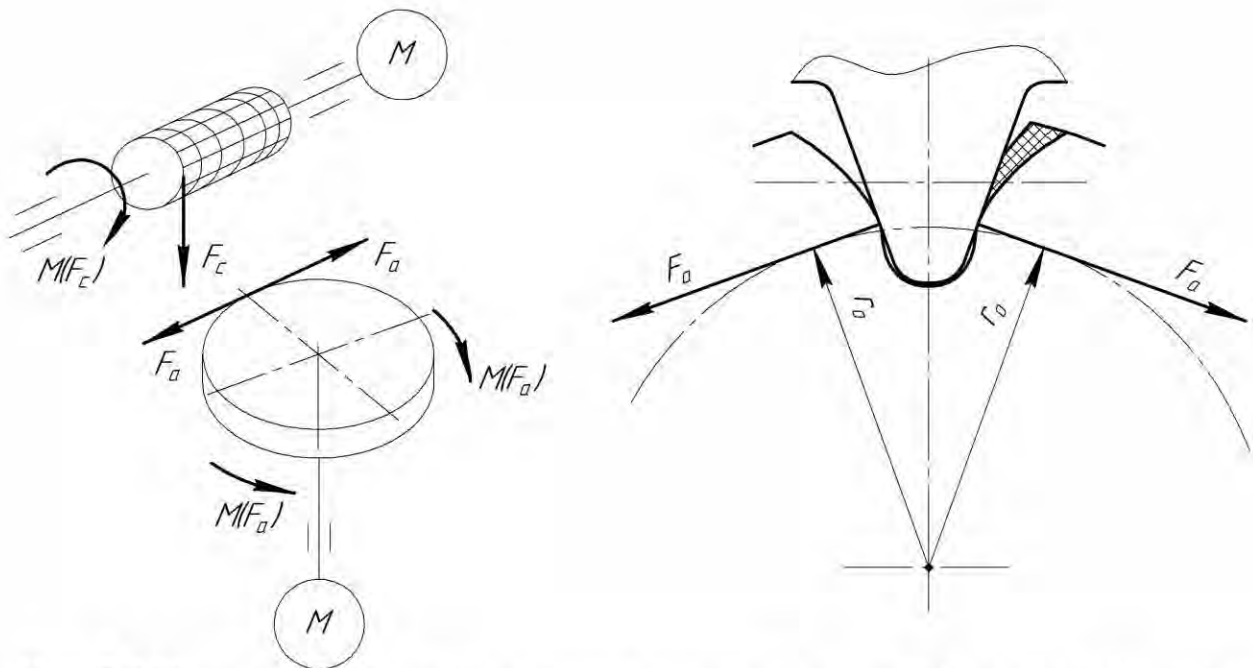


Рис. 2.4 Утворення моментів від сил різання при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні

r_0 – радіус основного кола; F_c , F_a – складові сили різання; $M(F_c, a)$ – моменти сил різання.

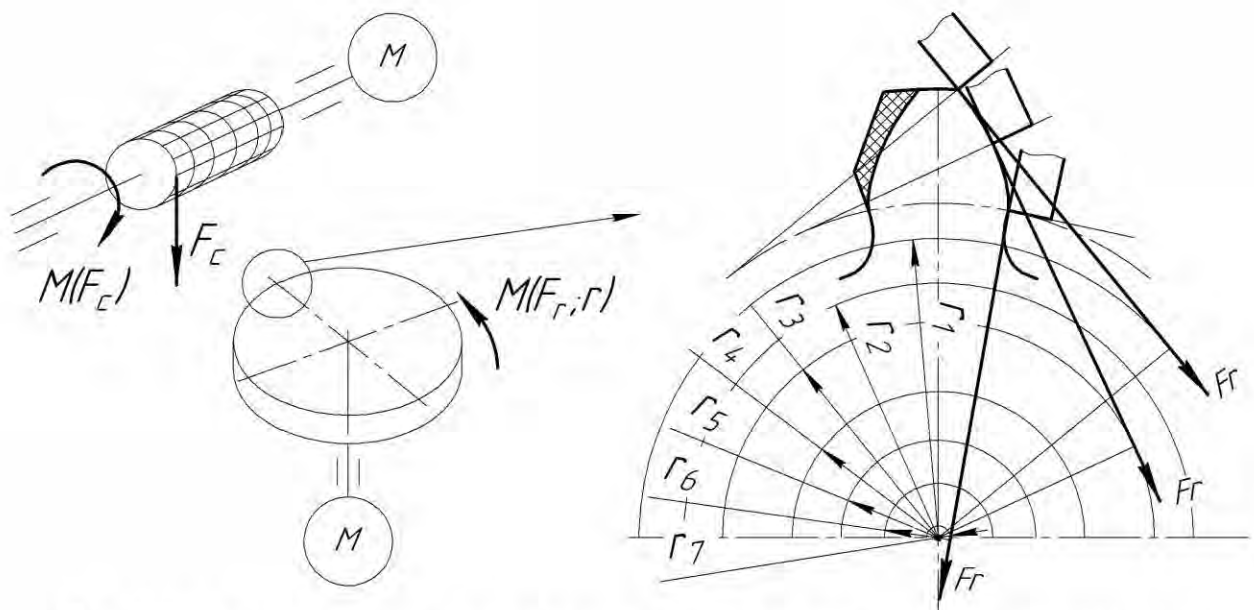


Рис. 2.5 Утворення моментів від сил різання при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні

$r_1 \dots r_7$ – радіус кола, яке дотичне до вектору радіальної сили різання; $F_{c,r}$ – складові сили різання, відповідно тангенціальна та радіальна сила; $M(F_{c,r})$ – моменти, які виникають від сил різання.

На рис. 2.5 показано послідовні положення зубців черв'ячно-контурної фрези з прикладеними до них векторами радіальної сили різання F_r . В кожній позиції генерації профілю до вектору радіальної сили різання побудоване дотичне коло, радіус r якого є плечем прикладення сили. Коло концентричне геометричній вісі оброблюваної деталі. Визначення моменту від радіальної сили різання F_r , для черв'ячно-контурного зубофрезерування необхідно розраховувати у декількох положеннях протягом обробки евольвентної поверхні, враховуючи обумовлені радіуси дотичних до векторів сил різання кіл:

$$M(F_r)_i = F_r \cdot r_i. \quad (2.6)$$

У даній роботі нехтуємо значенням віцевої F_a та радіальної F_r складових сили різання, так як вони мають менш впливові значення, у порівнянні із значенням тангенціальної складової F_c – приблизно як у відношенні [20]:

$$F_c : F_a : F_r = 4 : 2 : 1. \quad (2.7)$$

У даному теоретичному дослідженні, для спрощення розрахунків моменту на інструментальному шпінделі, нехтуємо геометричними розмірами фрези, зокрема зовнішнім діаметром, приймаємо $r_\phi = 1$. Отже момент від тангенціальної сили різання на шпінделі інструменту буде тотожний модулю сили, як показано у виразі:

$$M(F_c) = F_c \cdot r_\phi \equiv |F_c|. \quad (2.8)$$

Відносна енергоємність $|E|$ – це визначене через відносне значення сили різання $|F_c|$ значення енергоємності, що має місце у межах обробки однієї міжзубової западини. Визначається відносний модуль енергозатрат через відому формулу фізичної роботи механічної A :

$$A = F \cdot V \cdot T, \quad (2.9)$$

де F – сила, Н;

V – швидкість, м/с;

T – час, с.

Так як при модулюванні ми розглядаємо обробку із однаковими швидкостями різання та параметром, який можна ототожнити із часом T – обробка западини між двома зубцями, тобто обробка зубчастого колеса з

обертом на φ град. (тобто $\varphi \equiv T$), відносна енергоємність розраховується з виразу:

$$|E| = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\max} \sum |F| d\varphi. \quad (2.10)$$

Порівняльну оцінку енергоємності здійснюємо в умовних одиницях енергоємності.

Вхідні параметри дослідження – геометричні розміри одиничних зрізів (глибина та ширина) на кожній позиції генерації, які отримані у результаті дослідження процесів утворення профілю на базі тривимірних комп'ютерних моделей кінематики зубофрезерування, див. р. 2.3.

Вихідні параметри дослідження. Результати дослідження представляються у вигляді графіків, для кожного з методів, що порівнюються:

- швидкості знімання матеріалу (material removal rate) Q , см³/хв;
- споживаної потужності P_C , Вт;
- сил різання F_C , Н, та крутного моменту на шпінделі $M(F_C)$, Нм.

Відносний модуль енергоємності $|E|$ визначається у відносних одиницях енергоємності.

Окремі результати дослідження зводяться до таблиці, табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Найменування параметру	Позн.	Од. вим.
Швидкість знімання матеріалу (material removal rate)	Q	Н
Споживана потужність	P_C	Н·м
Діапазон сили різання (крутного моменту)	F_C $(M(F_C))$	кВт
Відносний модуль енергозатрат при обробці одного профілю / міжзубової впадини	$ E(M_C) $	відн. од. ен.

2.5 Висновки

У розділі описано методики теоретичного дослідження традиційного черв'ячного зубофрезерування та черв'ячно-контурного зубофрезерування, зокрема:

- процесів утворення профілю на базі тривимірних комп'ютерних моделей кінематики зубофрезерування;
- енергоємності процесів різання на основі результатів дослідження утворення профілю.

Введено та обґрунтовано поняття позиції генерації профілю, радіальної січної площини, відносний модуль енергоємності.

2.6 Рекомендації

Провести теоретичні дослідження процесів зубофрезерування згідно наведених методик.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ

3.1 Порівняльний аналіз схем взаємодії різальної кромки із оброблюваною поверхнею для методів зубофрезерування

При формоутворенні евольвенти на зубцях шестерні будь-яким способом механічної обробки (зубодовбання, черв'ячне фрезерування, шевінгування тощо), існує загальна відмінна риса – отримана евольвентна поверхня апроксимована (наближена) до теоретичної евольвенти. Форма та якість такої наближеної поверхні насамперед залежить від твірних ліній, точок чи профілів, які використовуються при формоутворенні обумовленими способами механічної обробки.

Реальна евольвентна поверхня, оброблена методом зубофрезерування черв'ячними модульними фрезами, представляє собою множину дотичних до теоретичного профілю ліній. Від припуску, залишеного на чистовий прохід, залежить довжина контакту обумовленої множини дотичних ліній із профілем який оброблювався.

У роботі також розглядається альтернативний спосіб отримання евольвентного профілю – за допомогою сліду із точок, що розташовуються на проекціях нормалей до евольвентного профілю.

Обидва випадки взаємодії різальної кромки фрези та оброблюваної евольвентної поверхні (при розташуванні дотично та по нормалі) показано на схемі рис. 3.1. Необхідно дослідити вплив схеми взаємодії на утворення форми евольвентного профілю, процес різання та інші показники.

На рис. 3.1, а, приведено схему обробки при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні. Як видно, бічні різальні кромки зубця фрези (вхідна та вихідна) розташовуються дотично до евольвентної поверхні у процесі обкату та обробки міжзубової впадини, тобто у цьому випадку поверхня різання та оброблювана поверхня співпадають.

На рис. 3.1, б приведено схему обробки при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні. Даний спосіб характеризується формоутворенням по методу сліду, тобто евольвентна поверхня оброблюваної деталі утворюється точкою на різальній кромці, яка в свою чергу розташовується по нормалі до оброблюваної поверхні.

Підсумовуючи, згідно теорії формоутворення при різанні, приведені способи зубообробки являють собою:

- метод обкату (огинання) – при якому різальна кромка фрези розташовується дотично до оброблюваної евольвентної поверхні;
- метод сліду – при якому різальна кромка фрези розташовується по нормалі до оброблюваної евольвентної поверхні.

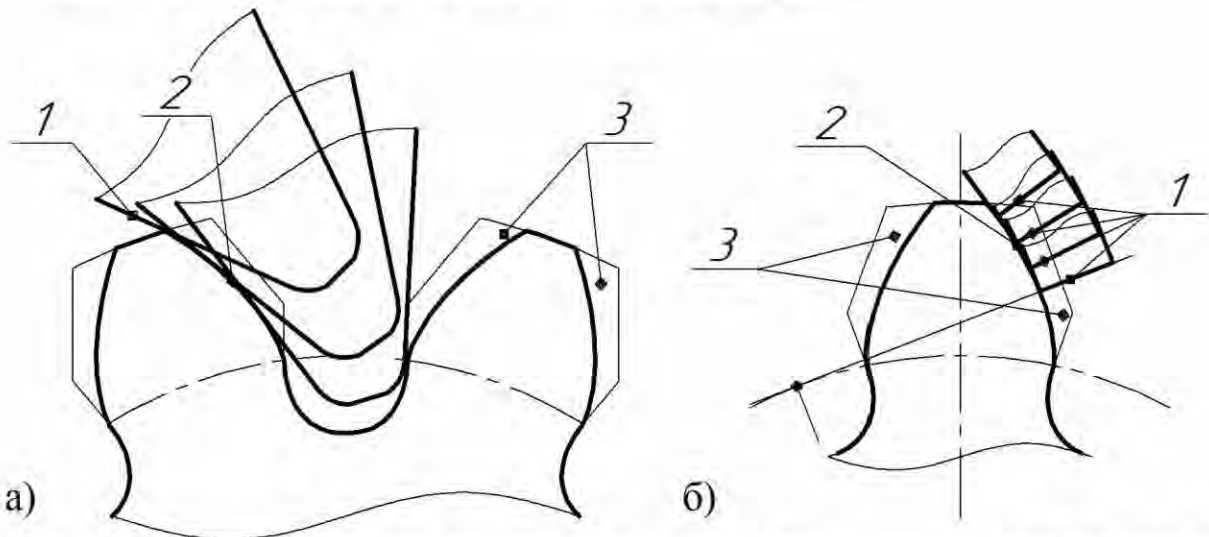


Рис. 3.1 Варіанти взаємодії різальних кромek інструменту та оброблюваної евольвентної поверхні

а) метод обкату із дотичною різальною кромкою;

б) метод сліду з різальною кромкою, розташованою по нормалі.

1 – різальна кромка інструменту; 2 – евольвентний профіль; 3 – припуск на бічних сторонах зубців заготовки.

Здійснимо математичне описання схем взаємодії. Система рівнянь в параметричній формі, яка описує евольвенту має вигляд:

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

де r – радіус основного кола зубчастого колеса;

φ – кут розгорнення евольвенти.

Продиференціювавши рівняння (3.1) отримаємо рівняння дотичних та нормалей до евольвенти, а саме:

- дотична до евольвенти:

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

- нормаль до евольвенти:

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

де X, Y – поточна координата точки, що визначає геометричні параметри поверхні різання.

Схеми утворення евольвентного профілю методами обкату (дотичних) та сліду (нормалей) наведені на рис. 3.2.

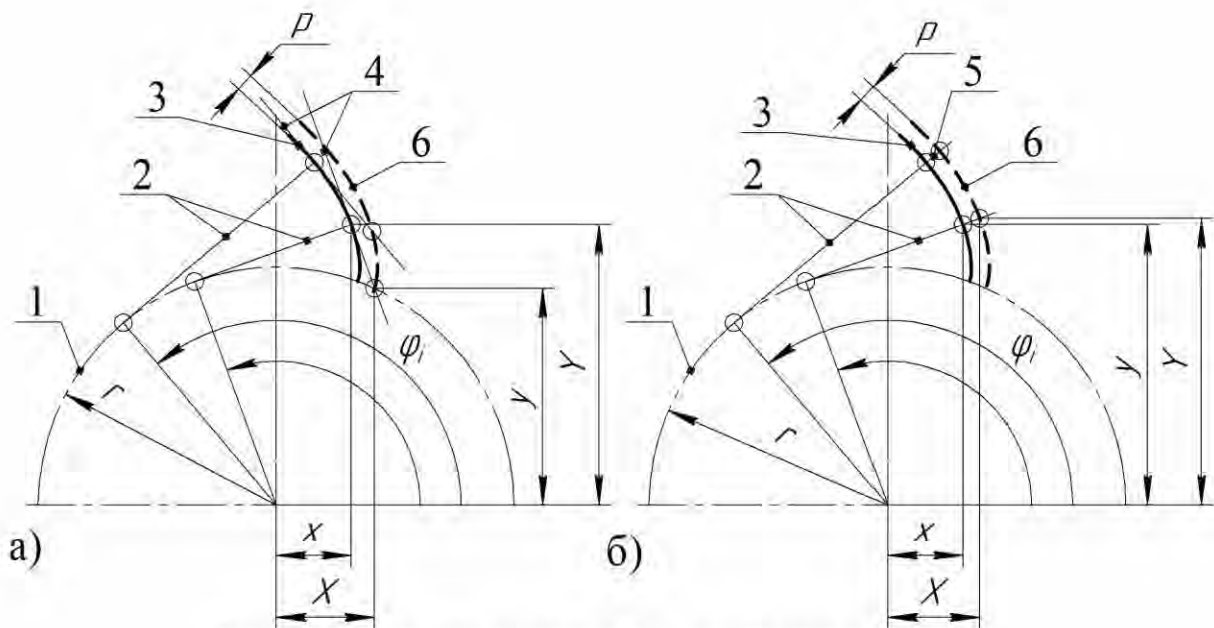


Рис. 3.2 Схема утворення евольвентного профілю

а) методом обкату; б) методом сліду;

- 1 – основна окружність; 2 – нормалі, приведені до евольвентного профілю; 3 – евольвентний профіль (теоретичний); 4 – дотичні до евольвентного профілю (теоретичного), які утворюють реальну оброблену поверхню, яка також являється поверхнею різання;
- 5 – нормалі до евольвентного профілю (теоретичного), які утворюють поверхню різання;
- 6 – контур заготовки (припуску);

X, Y – координати точок на продовженні дотичних 2 до основної окружності 1;
 x, y – координати точок евольвентного профілю; r – радіус основної окружності; p – припуск.

Довжину дотичної до евольвентного профілю, рис. 3.2, а, поз. 4, можна обчислити за допомогою 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 розгорнення евольвенти, приймає значення від $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = \varphi_{max}$.

Довжина нормалі, рис. 3.2, б, поз. 5, дорівнює припуску на механічну операцію p , як видно із схеми, тому необхідності у математичному вираженні немає.

Із виразу (3.4) та схеми рис. 3.2, а видно, що при обробці зубчастого колеса методом обкату із дотичною до евольвентного профілю різальною кромкою (поз. 4) існує залежність між зміною довжини цієї кромки протягом обробки одного профілю (від $\varphi = 0^\circ$ до $\varphi = \varphi_{max}$) та силою різання F_c , що суттєво впливає на динамічні характеристики процесу різання.

Зменшити динамічне навантаження на вузли верстату під час різання може допомогти використання методу сліду із розташованою по нормалі до евольвентного профілю різальною кромкою (поз. 5). Цей ефект досягається за рахунок коливання довжини різальної кромки тільки в межах коливання величини припуску, як видно на рис. 3.2, б. Зменшення динамічного навантаження якісно посприяють підвищенню точності обробки зубчастого колеса.

3.2 Реалізація методу черв'ячно-контурного зубофрезерування

Метод зубообробки під назвою «черв'ячно-контурне зубофрезерування», який розглядається у роботі, має як схожі риси із традиційним черв'ячним зубофрезеруванням, так і принципові відмінності.

Черв'ячно-контурне зубофрезерування – спосіб чистового зубофрезерування, якому характерне розміщення різальної кромки зубця фрези по нормалі до оброблюваної евольвентної поверхні та на продовженні радіусів

кривизни останньої. Поверхня різання при цьому не співпадає із оброблюваною евольвентною поверхнею [3, 4].

Ключовою відмінністю від традиційного черв'ячного зубофрезерування є те, що черв'ячно-контурне зубофрезерування може застосовуватися тільки як метод напівчистої або чистої обробки зубчастих коліс із попередньо прорізаною міжзубовою западиною. Також, на відміну від традиційного методу, який характеризується вихідним профілем інструментальної рейки фрези із трьома різальними кромками, черв'ячно-контурна фреза здійснює різання однією різальною кромкою, яка розміщується на гвинтовій лінії з кроком, який рівний кроку зубчастого колеса яке оброблюється, по дузі основного кола, мм:

$$P = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha, \quad (3.5)$$

де m – модуль колеса, мм;

α – кут профілю вихідного контуру, град.

Кінематика процесу обробки зубчастого колеса методом черв'ячно-контурного зубофрезерування аналогічна як у зачепленні черв'ячного колеса із черв'ячним валом. Обертання черв'ячно-контурної фрези узгоджено із обертанням оброблюваної деталі, та визначається з відношення числа заходів черв'ячно-контурної фрези до числа зубців оброблюваної деталі. Тобто за один оберт однозахідної черв'ячно-контурної фрези, заготовка повинна обернутись на один зубець, як показано у виразі:

$$i = \frac{k}{z}, \quad (3.6)$$

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

z – число зубців оброблюваної деталі.

На рис. 3.3 показано процес утворення форми евольвентного профілю при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні. Як видно зі схеми, формоутворююча різальна кромка інструмента розміщена на продовженні радіусів кривизни теоретичного евольвентного профілю зубця оброблюваної деталі таким чином, щоб початкова точка в процесі обробки описувала обумовлений теоретичний евольвентний профіль, тобто працювала за методом сліду. Існує проблема по

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

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

Схему налагодження фрези на кут нахилу гвинтової лінії показано на рис. 3.4.

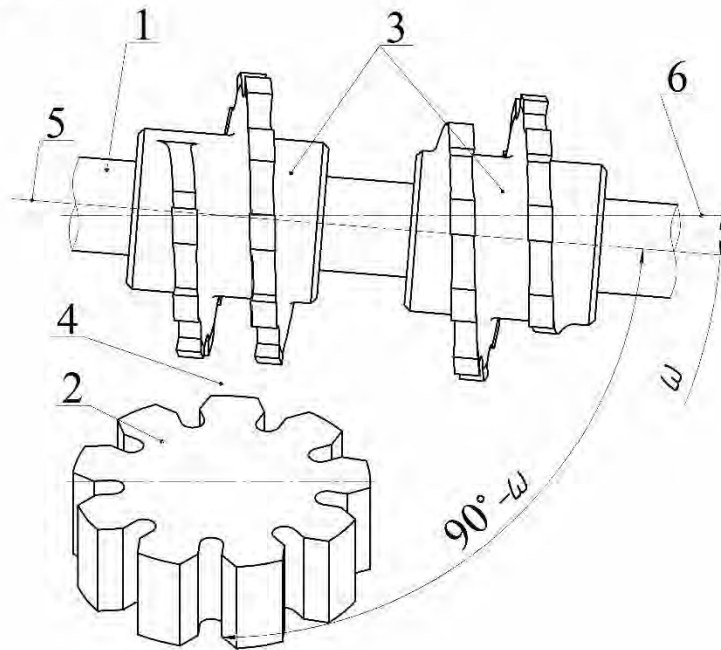


Рис. 3.4 Схема налагодження черв'ячно-контурної фрези на кут нахилу гвинтової лінії

- 1 – оправка інструментальна;
- 2 – оброблювана деталь;
- 3 – черв'ячно-контурні фрези;
- 4 – вісь обертання деталі;
- 5 – вісь обертання фрез;
- 6 – ортогональне положення вісі;
- ω - кут нахилу гвинтової лінії фрези.

Повна обробка зубчастого колеса методом черв'ячно-контурного зубофрезерування виконується за два проходи. Це викликано тим, що за один прохід фреза оброблює тільки однойменні (ліві або праві) профілі. Звідси ж і впливає необхідність у створенні наладки із двох однакових фрез, для збільшення продуктивності обробки, при цьому фрези встановлюються так, щоб їх передні грані розташовувались протилежно одна одній.

Окремі етапи циклу обробки однойменних профілів, однією з комплекту фрез, на першій позиції показано на схемі рис. 3.4. Як видно, обробку на кожній з позицій можна умовно розділити на врізання, обробку першого профілю та наступну послідовну обробку усіх однойменних профілів, на усіх зубцях. Обробка евольвентних профілів супроводжується віцевою подачею S_a фрези відносно заготовки, для розповсюдження профілю на всю ширину зубчастого вінця.

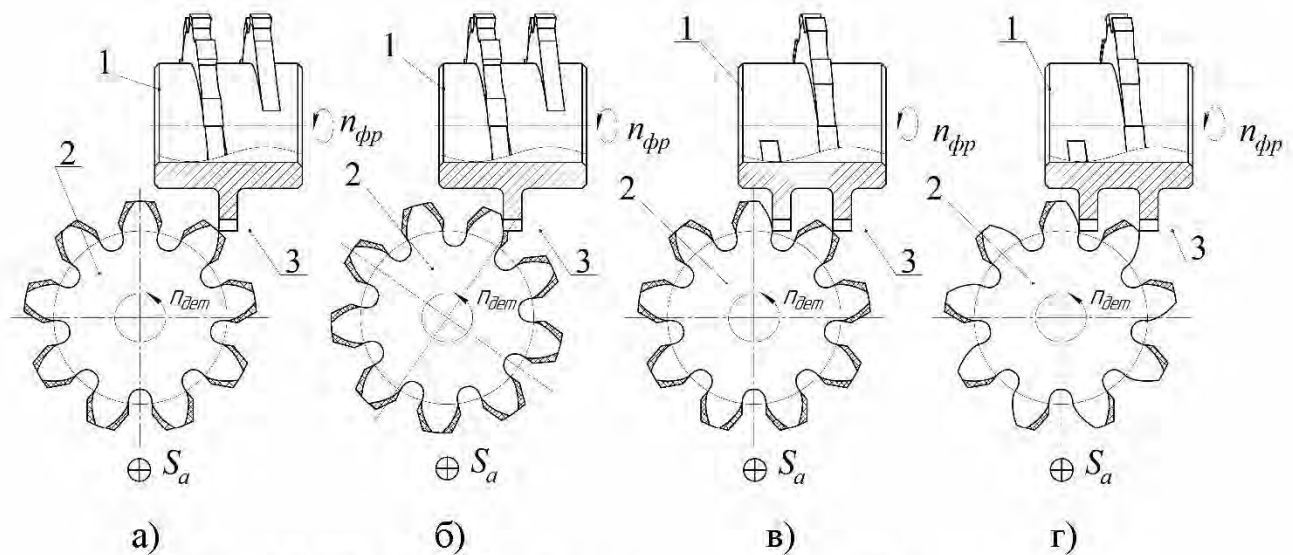


Рис. 3.5 Обработка однойменных профилей зубчатого колеса

а) врізання фрези при обробці першого профілю; б), в) процес обробки і завершення формоутворення евольвентного профілю; г) кінцевий результат обробки зубчастого колеса;
 1 – черв'ячно-контурна фреза; 2 – оброблювана деталь; 3 – дотична до основного кола;
 $n_{дет}$ – обертання деталі; $n_{фр}$ – обертання фрези; S_a – вісєва подача.

По завершенні обробки усіх однойменних профілів на першій позиції, необхідно перевести інструментальний шпіндель у другу позицію, а саме перемістити на відстань L , для того, щоб у роботу могла вступити друга з комплекту черв'ячно-контурна фреза. Обробка на другій позиції відбувається із реверсом усіх напрямків обертання (фрези $n_{фр}$ та заготовки $n_{дет}$) і напрямку подачі (вісєвої S_a), як показано на схемі рис. 3.6. На другій позиції відбувається обробка протилежних евольвентних профілів на всіх зубцях деталі та в результаті отримується готова деталь.

Реалізація обробки зубчастих коліс методом черв'ячно-контурного зубофрезерування більш доцільна за допомогою зубофрезерних верстатів і зубообробних центрів з ЧПУ, які дозволять повністю реалізувати всі позитивні сторони методу та значно зменшити час на допоміжні та установчі рухи.

Спосіб черв'ячно-контурного зубофрезерування більш детально описаний у патентах України [3] та [4].

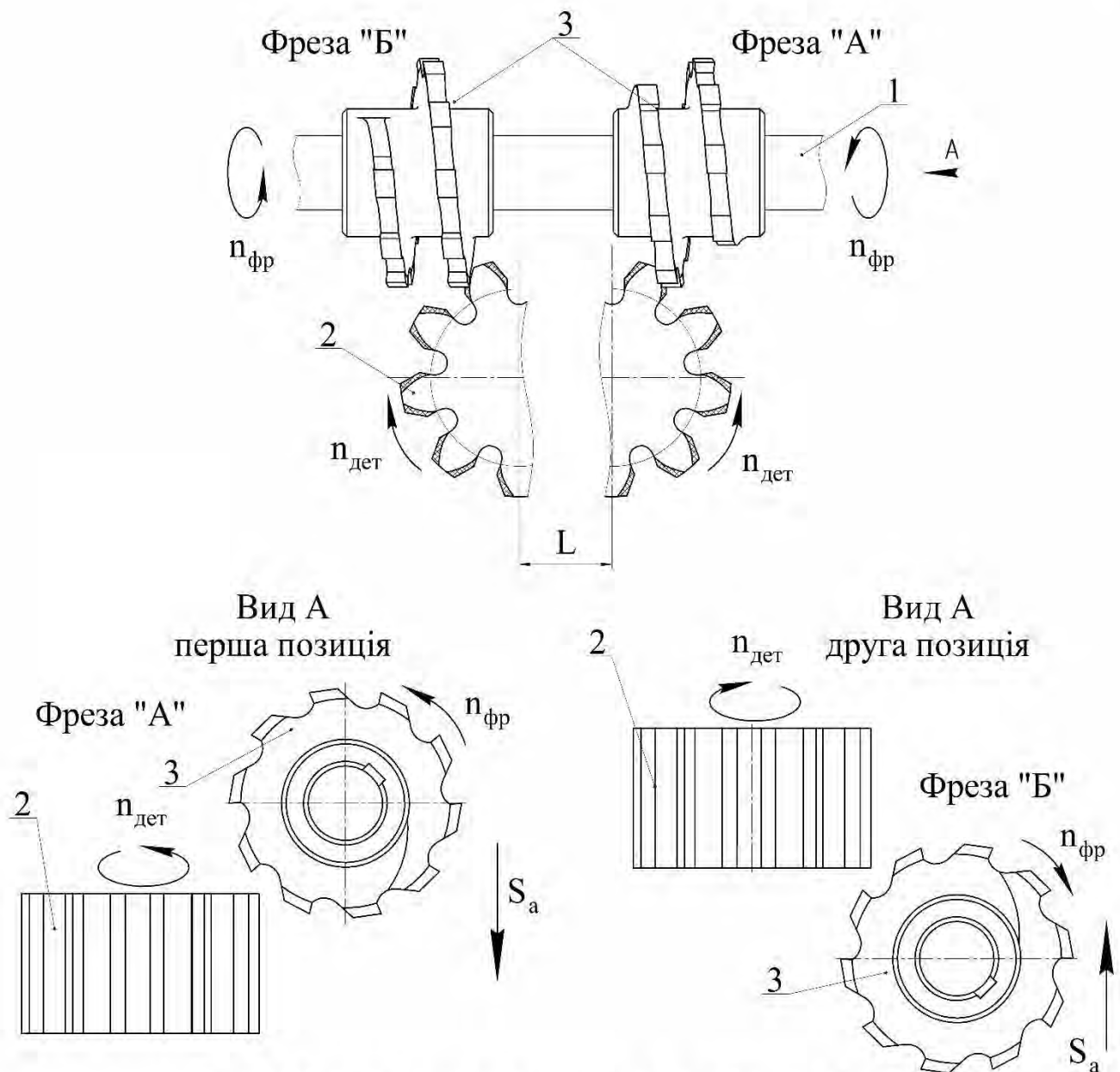


Рис. 3.6 Рухи різання та переміщення під час обробки

1 – інструментальна оправка; 2 – оброблювана деталь; 3 – черв'ячно-контурні фрези;
 $n_{фр}$ – обертання інструменту; $n_{дет}$ – обертання деталі; S_a – вісєва подача;
 L – величина зміщення системи координат на другу позицію.

3.2.1 Конструкція черв'ячно-контурної фрези зі змінними різальними пластинами

Черв'ячно-контурна фреза зі змінними різальними пластинами (ЗРП) з механічним кріпленням може бути застосована для чистової обробки зубофрезеруванням зубців зубчастих коліс в умовах обкату. Застосування запропонованої конструкції покликане розширити технологічні можливості, знизити собівартість чистової обробки черв'ячним зубофрезеруванням.

Запропонована збірна черв'ячно-контурна фреза має розташовані по спіралі ЗРП з механічним кріпленням із виконаними у корпусі базовими посадочними місцями для їх розміщення, рис. 3.7. Фреза призначена для чистового нарізання зубців, так як не здатна виконувати обробку дна міжзубової западини.

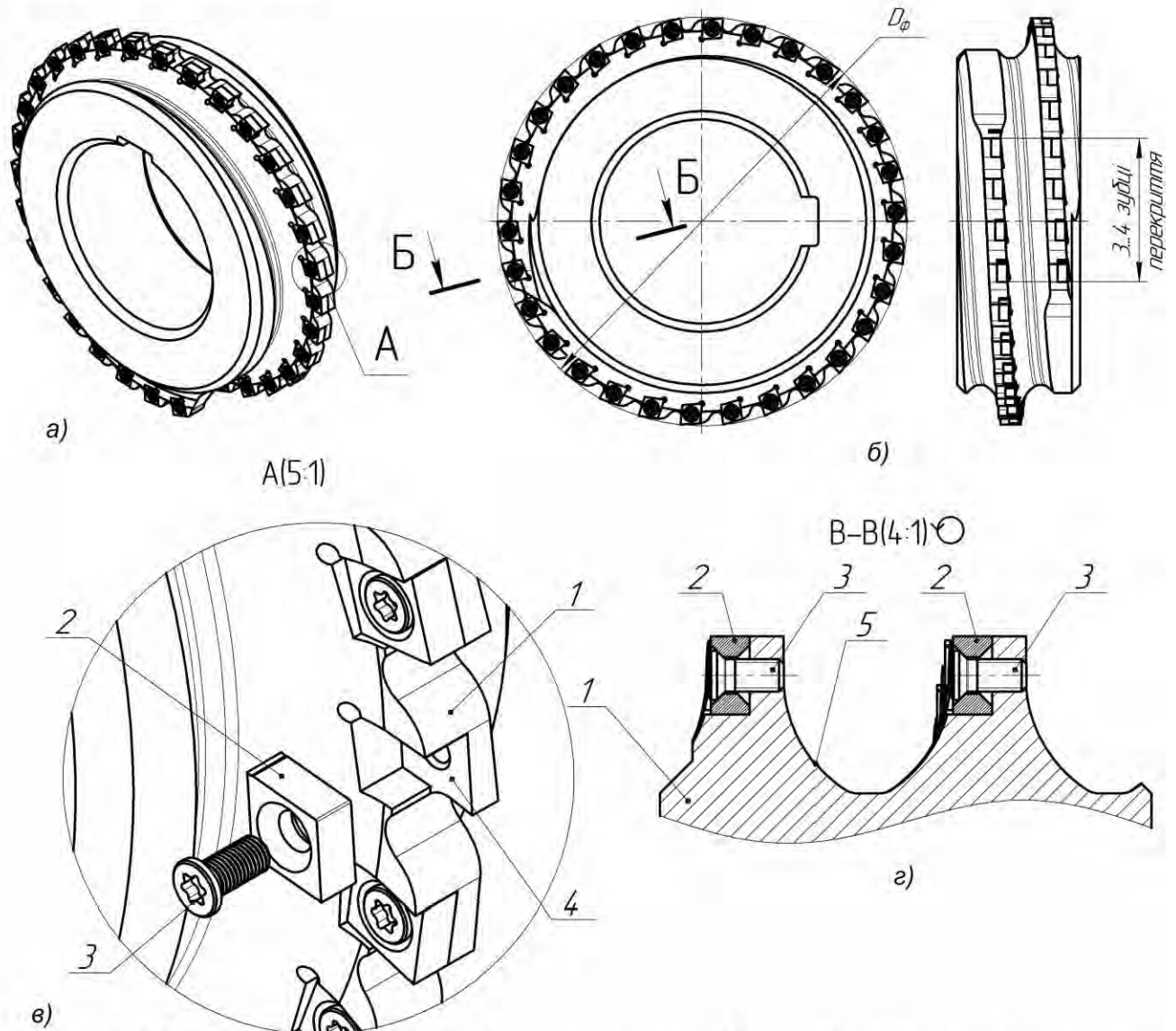


Рис. 3.7 Збірна конструкція черв'ячно-контурної фрези зі змінними різальними пластинами із механічним кріпленням

1 – корпус; 2 – змінні різальні пластини; 3 – гвинт; 4 – посадочне місце;
5 – западина корпуса; D_ϕ – зовнішній діаметр.

На рис. 3.7, а зображено тривимірну модель черв'ячно-контурної фрези в зборі. Послідовність кріплення ЗРП показано на виносному елементі А (рис. 3.7, в), видно, що у корпусі поз. 1 розміщені по гвинтовій лінії посадочні

місця поз. 4 для розміщення ЗРП поз. 2. Кріплення ЗРП до корпусу відбувається гвинтами поз. 3. На рис. 3.7, б зображено збірну черв'ячно-контурну фрезу у двох проекціях, вказано, що довжина гвинтової лінії корпусу поз. 1 повинна мати один повний оберт та перекриття у 3...4 зубці, для спрощення налагодження фрези по попередньо обробленій впадині заготовки. Зовнішній діаметр D_{ϕ} запропонованої фрези приблизно дорівнює діаметру черв'ячної фрези для аналогічного модуля. Кількість зубців фрези приймається виходячи з міркувань міцності, жорсткості та можливості розміщення ЗРП 2 у корпусі 1. На розрізі В-В (рис. 3.7, г) показано вісевий переріз різальної частини фрези.

На рис. 3.8 зображено нормальний переріз різальної частини збірної черв'ячно-контурної фрези.

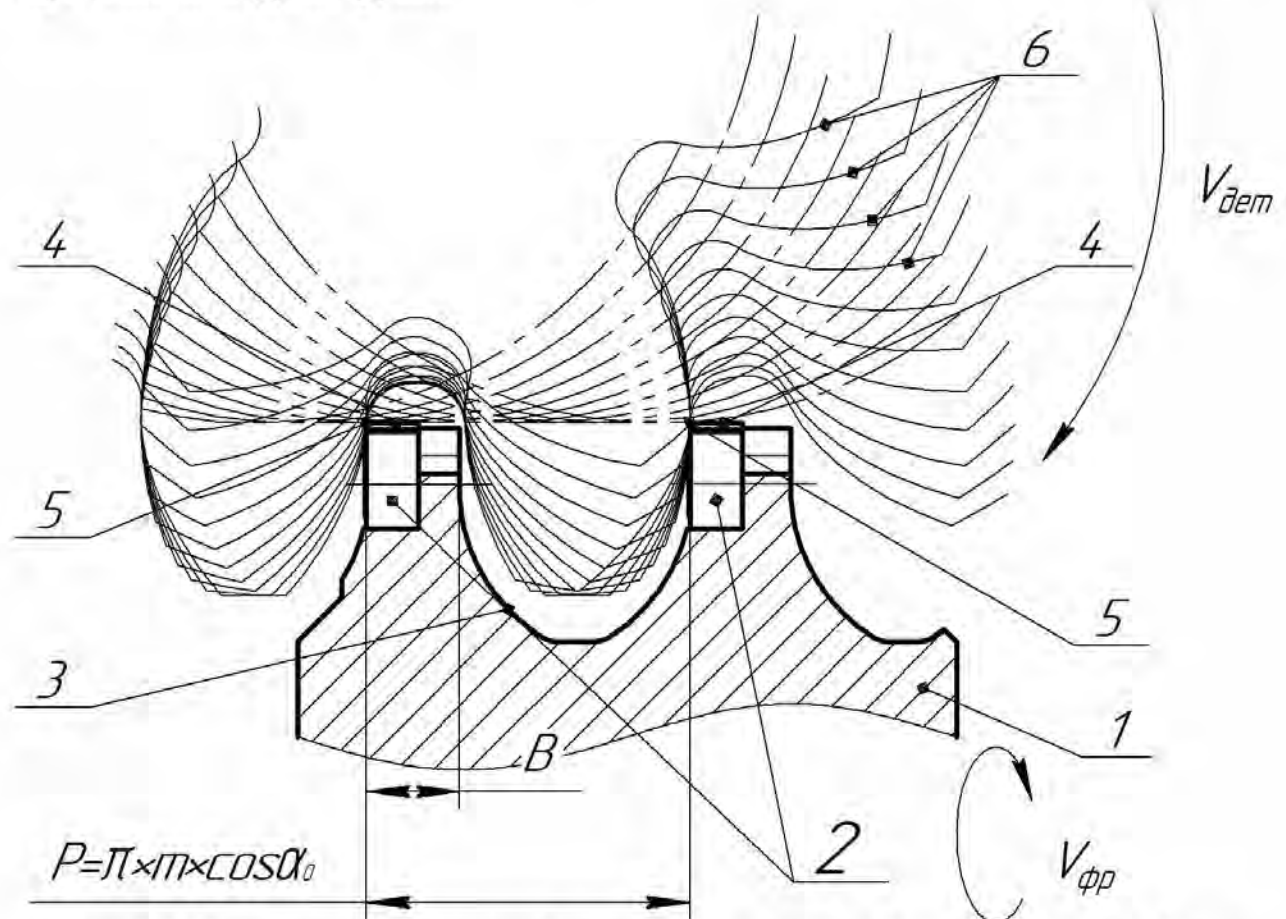


Рис. 3.8 Нормальний переріз різальної частини черв'ячно-контурної фрези

1 – корпус; 2 – змінні різальні пластини; 3 – западина корпусу; 4 – головна різальна кромка; 5 – формуюча точка; 6 – заготовка; B – ширина різальної частини фрези; P – крок гвинтової лінії; $V_{\phi p}$ – обертання фрези; $V_{дет}$ – обертання деталі.

Як видно на рис. 3.8, утворення евольвентного профілю відбувається в початкових точках 5 ріжучих кромок 4, які є продовженням радіусів кривизни евольвенти і розміщені на гвинтовій лінії з кроком P , рівним кроку оброблюваного зубчастого колеса. Крок P гвинтової лінії визначається за формулою (3.5). Ширина різальної частини B визначається з можливості її розміщення у міжзубовій западині і може визначатися з відношення $B \approx 0,85 \cdot m$.

Різальна частина корпусу поз. 1 утворена западиною поз. 3, що має фасонну форму з метою підвищення жорсткості та запобігання контакту збірної черв'ячної фрези з заготовкою 6 під час обробки.

Зображення ЗРП приведено на рис. 3.9, видно, що форма ЗРП подібна формі CNMQ по ISO 1832, за винятком деяких відмінностей: головна задня поверхня поз. 3 та передня поверхня поз. 4 розташовані на периферії. Для більш ефективного використання інструментального матеріалу є можливість розміщення декількох різальних кромок поз. 1 на поверхні ЗРП, як показано на виносному елементі А.

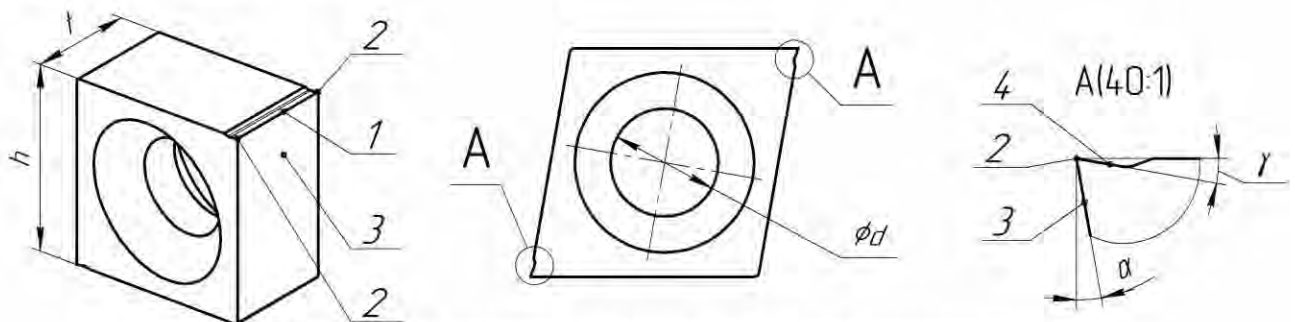


Рис. 3.9 Геометрія змінної різальної пластини

1 – головна різальна кромка; 2 – формуюча точка; 3 – задня поверхня; 4 – передня поверхня; t – товщина пластини; h – ширина пластини; d – діаметр внутрішнього отвору; α – головний задній кут; γ – головний передній кут.

Рекомендована геометрія ріжучої частини:

- головний передній кут $\gamma = 5 \dots 10^\circ$;
- головний задній кут $\alpha = 10 \dots 12^\circ$.

Конструкція ЗРП передбачає наскрізний отвір d з заглибленнями для розміщення головки гвинта при закріпленні. Розміри h , t і d обираються відповідно до умов обробки та розмірів фрези.

3.3 Теоретичні дослідження процесів традиційного черв'ячного зубофрезерування

3.3.1 Аналіз процесу утворення профілю традиційного черв'ячного зубофрезерування на базі тривимірної комп'ютерної моделі кінематики зубофрезерування

Процес утворення профілю, при обробці зубчастого колеса методом традиційного черв'ячного зубофрезерування, досліджується в умовах моделювання, при цьому визначаються геометричні розміри недеформованих одиничних зрізів, а саме ширину, товщину та площу що знімається кожним зубцем фрези у позиціях генерації та радіальних позиціях по траєкторії руху цього зубця.

Методика дослідження в умовах комп'ютерного моделювання описана у р. 2.3, при цьому для традиційного черв'ячного зубофрезерування розглядається обробка однієї міжзубової впадини. Отримана модель обробленої деталі показана на рис. 3.10.

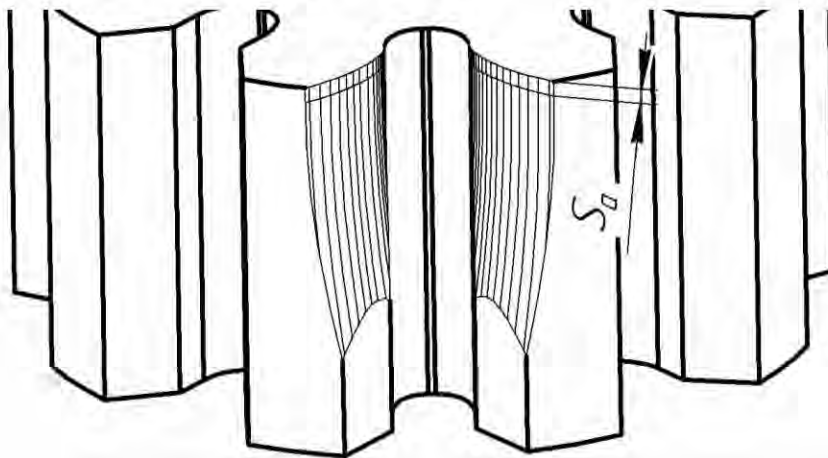
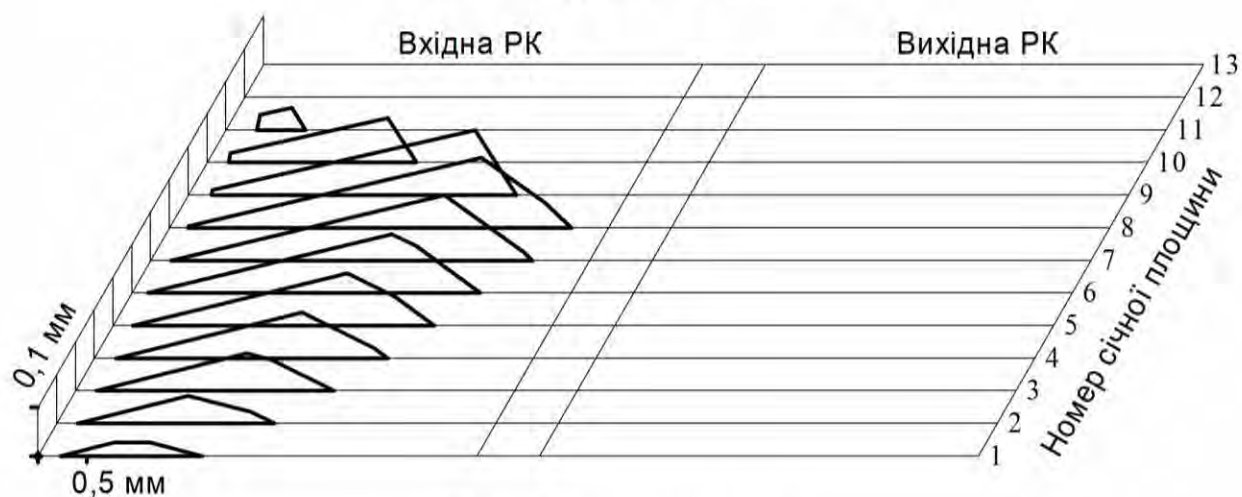


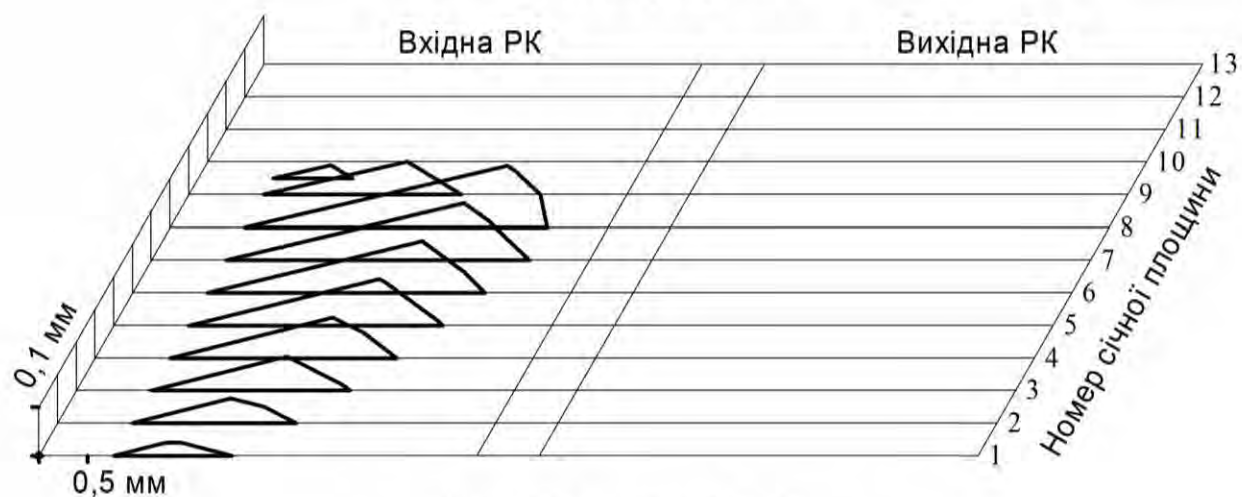
Рис. 3.10 Розподілення
одиничних зрізів на
моделі традиційного
черв'ячного
зубофрезерування
 S_a – вісєва подача

Сама геометрична форма зрізів у вигляді перерізів на діаграмах (згідно методики, рис. 2.3), показана на рис. 3.11 – для вхідної різальної кромки (від'ємні значення позицій генерації), та рис. 3.12 – для вихідної (додатні значення позицій генерації).

Позиція генерації «-13»



Позиція генерації «-9»



Позиція генерації «-5»

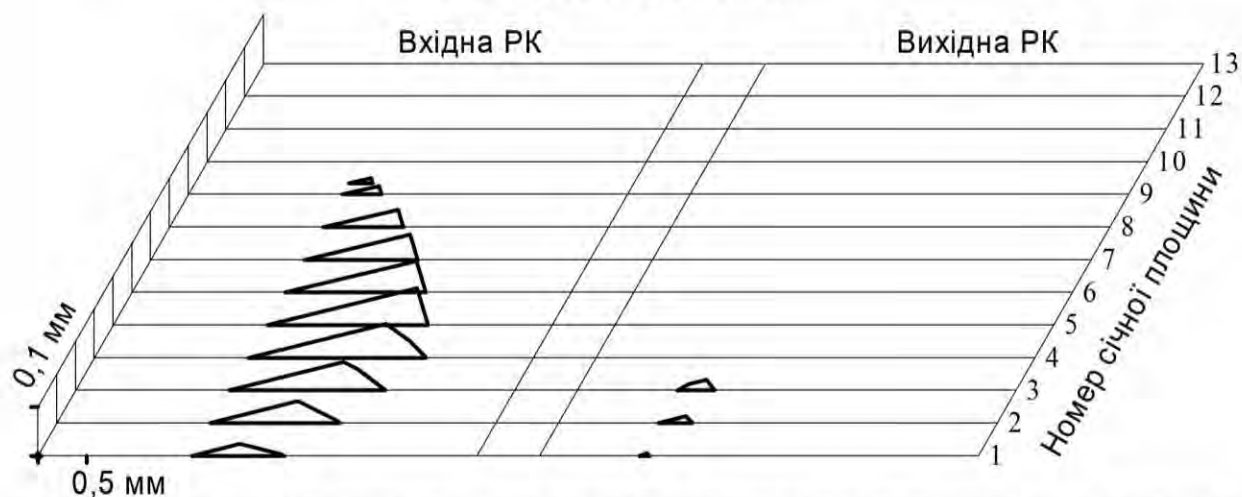
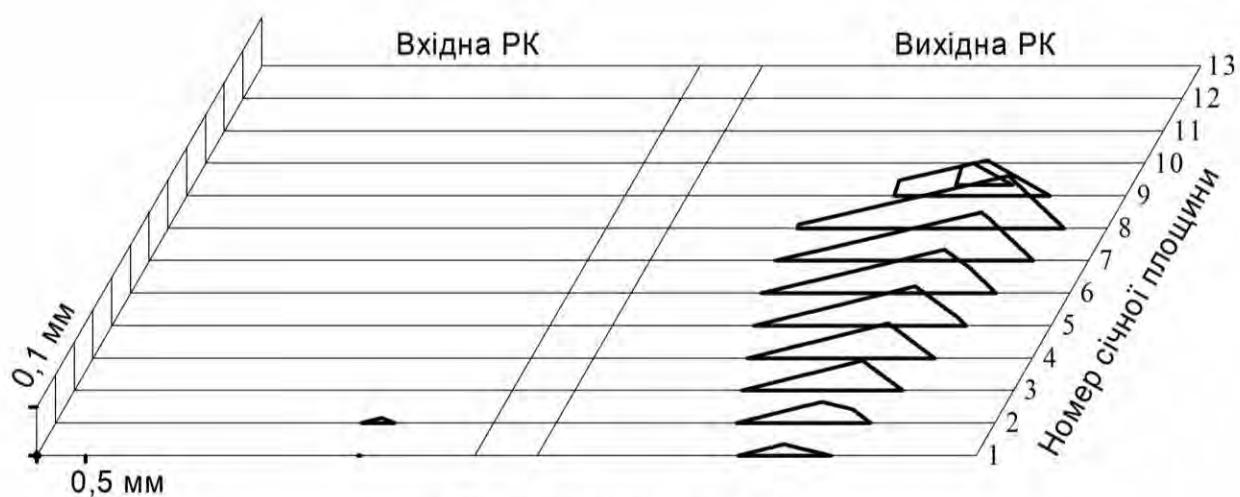
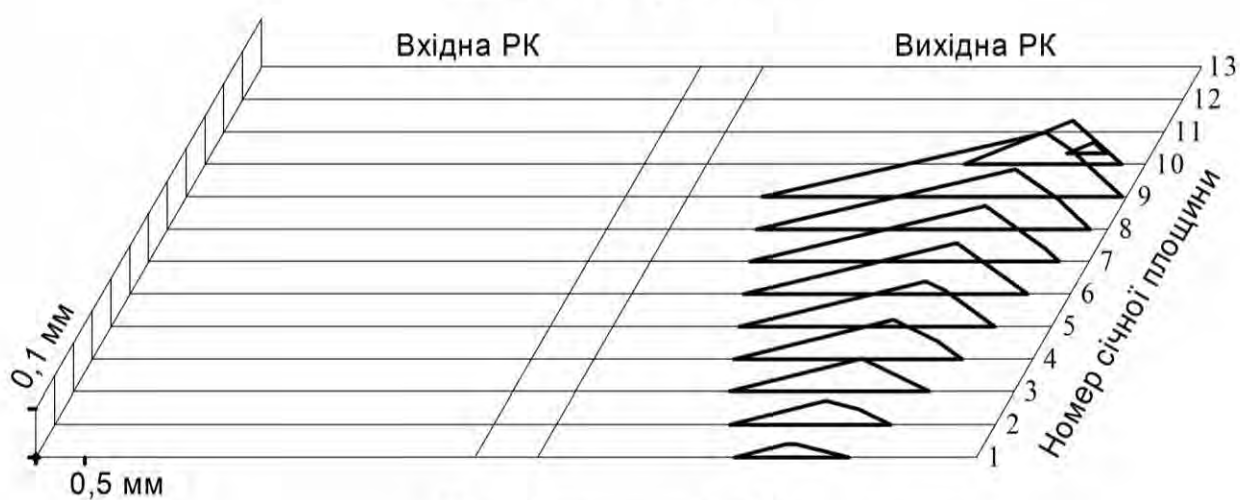


Рис. 3.11 Діаграма розміщення недеформованих площин зрізів при роботі вхідною різальною кромкою по траєкторії руху зубця черв'ячної фрези

Позиція генерації «4»



Позиція генерації «8»



Позиція генерації «11»

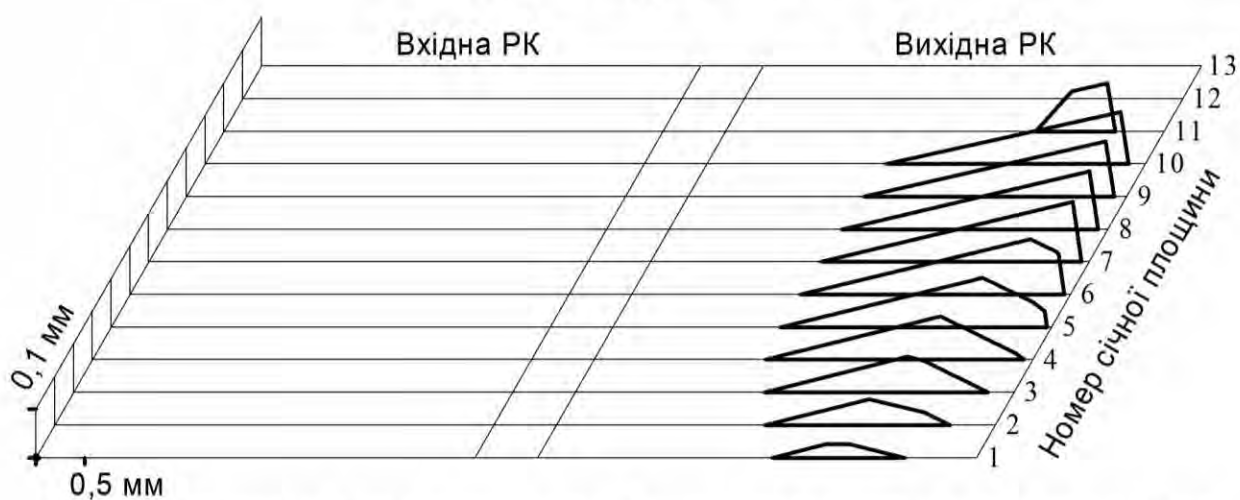


Рис. 3.12 Діаграма розміщення недеформованих площин зрізів при роботі вихідною різальною кромкою по траєкторії руху зубця черв'ячної фрези

Отримані дані дослідження вказують на те, що для традиційного методу характерні зрізи, які мають у ~ 25 разів більшу ширину, ніж товщину. Така форма зрізів може викликати високі значення сили різання під час обробки [25, 28].

Також на рисунках виразно видно, що зубець фрези знімає найбільші об'єми матеріалу при обробці зубчастого колеса у зоні початку евольвенти, тобто біля зовнішнього діаметру. Це в зайвий раз доводить, що різні ділянки, різних різальних кромки зубця фрези навантажені неоднаково, тому і мають нерівномірний знос.

З огляду на те, що моделюється нарізання попередньо оброблених заготовок, у яких відсутній припуск по дну міжзубової западини, де мають місце найскрутніші умови різання [10, 25], то частину негативного впливу на черв'ячну фрезу вдалося уникнути.

Тривимірні зображення недеформованих зрізів, отриманих моделюванням, представлені на рис. 3.13. Зрізи мають форму стрічки, що має деяке потовщення на кінці, а на деяких позиціях генерації присутня обробка двома різальними кромками одночасно, тобто відбувається плавний перехід між обробкою вхідною різальною кромкою і вихідною, з перекриттям.

По чисельним значенням ширини, товщини та площі недеформованих зрізів, які отримані під час моделювання (додаток А), було побудовано графіки, приведені на рис. 3.14...3.16. На графіках видно, що перетини зрізів розподіляються по двом бічним різальним кромкам зубця фрези. Починаючи з позиції генерації «-7», та до положення «4» різальні кромки черв'ячної фрези працюють одночасно.

Великі значення ширини різання при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні (рис. 3.15), які сягають $a = 3,92$ мм на вхідній та $a = 3,85$ мм на вихідній різальній кромках, здебільшого викликані властивостями схеми формоутворення – реальний евольвентний профіль утворюється в умовах безперервного обкату із послідовних положень нескінченної інструментальної рейки (зубців фрези) у тілі деталі. Значення товщини зрізів, як видно по

рис. 3.13, розподіляються на вхідну кромку $b = 0,16$ мм, порівняно із $b = 0,14$ мм на вихідній різальній кромці. Площини недеформованих зрізів зайвий раз вказують, що кромки навантажені неоднаково (рис. 3.14).

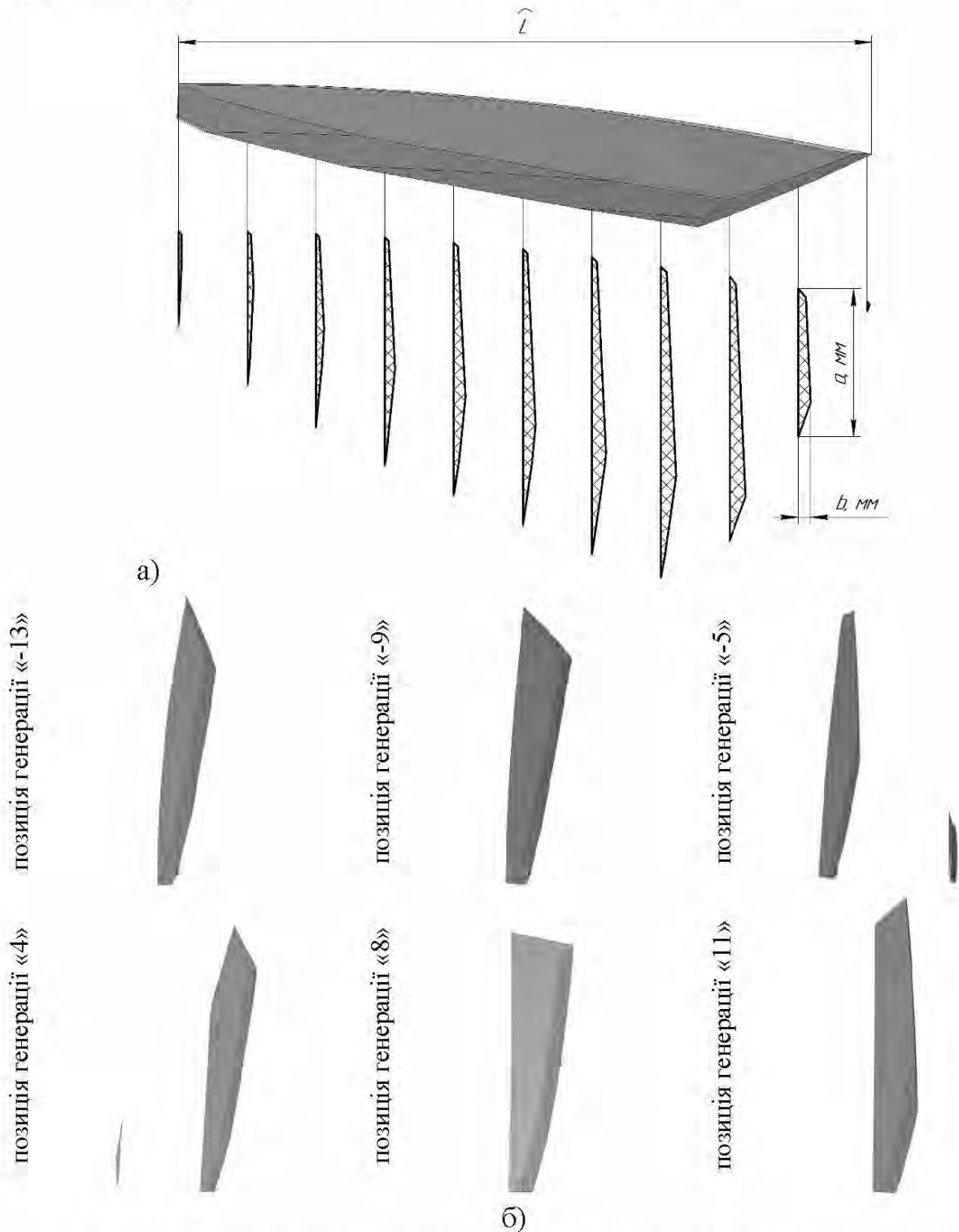
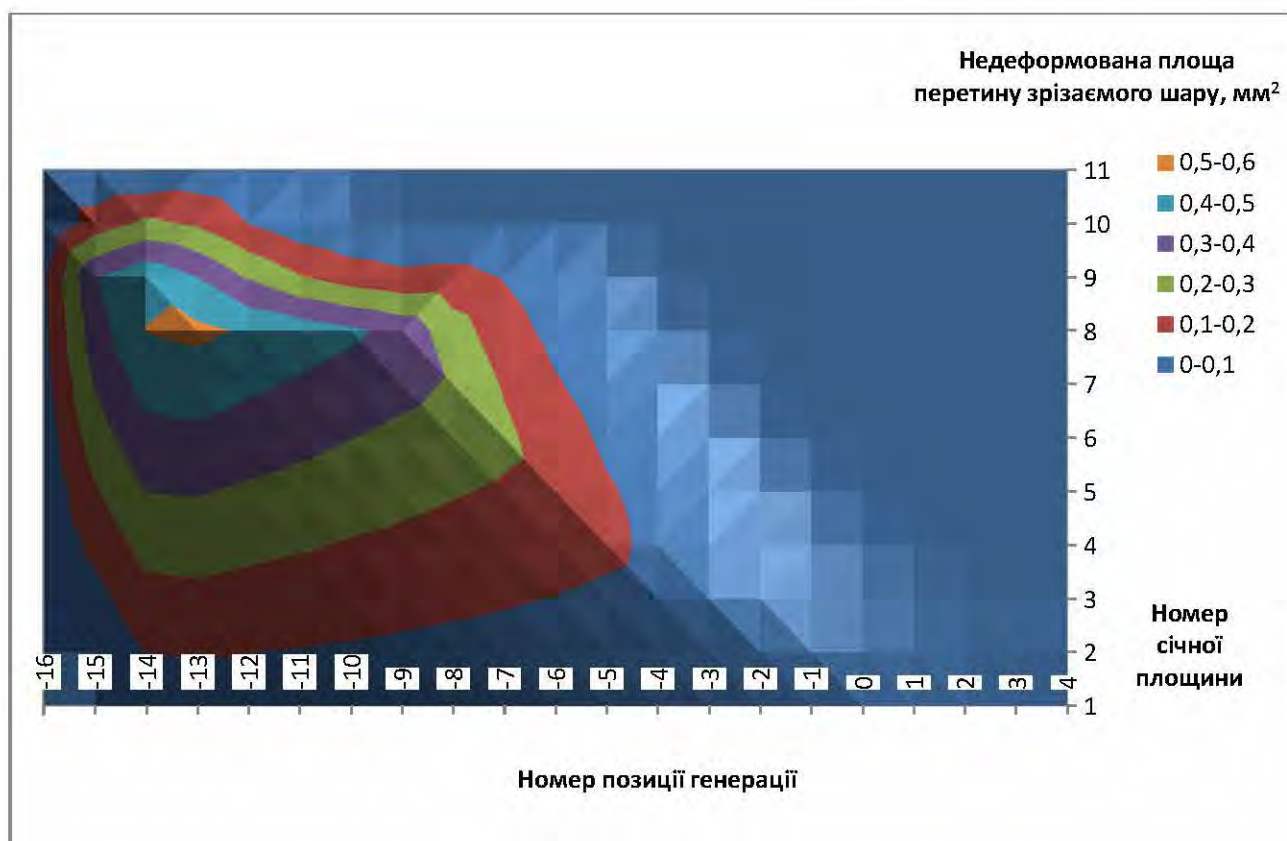
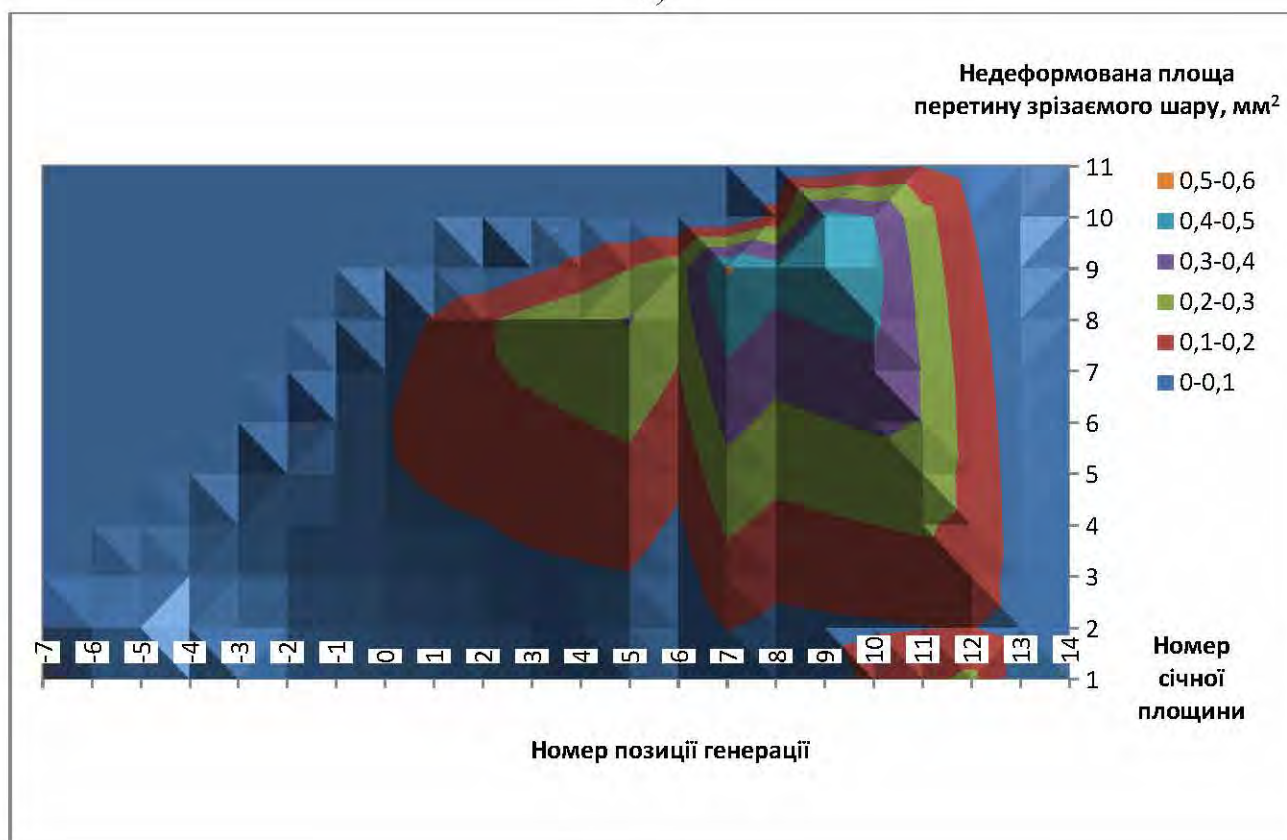


Рис. 3.13 Тривимірні зображення недеформованих зрізів, отриманих моделюванням методу традиційного черв'ячного зубофрезерування

- а) перерізи відокремлюваних елементів;
 б) форми недеформованих відокремлюваних елементів на позиціях генерації.



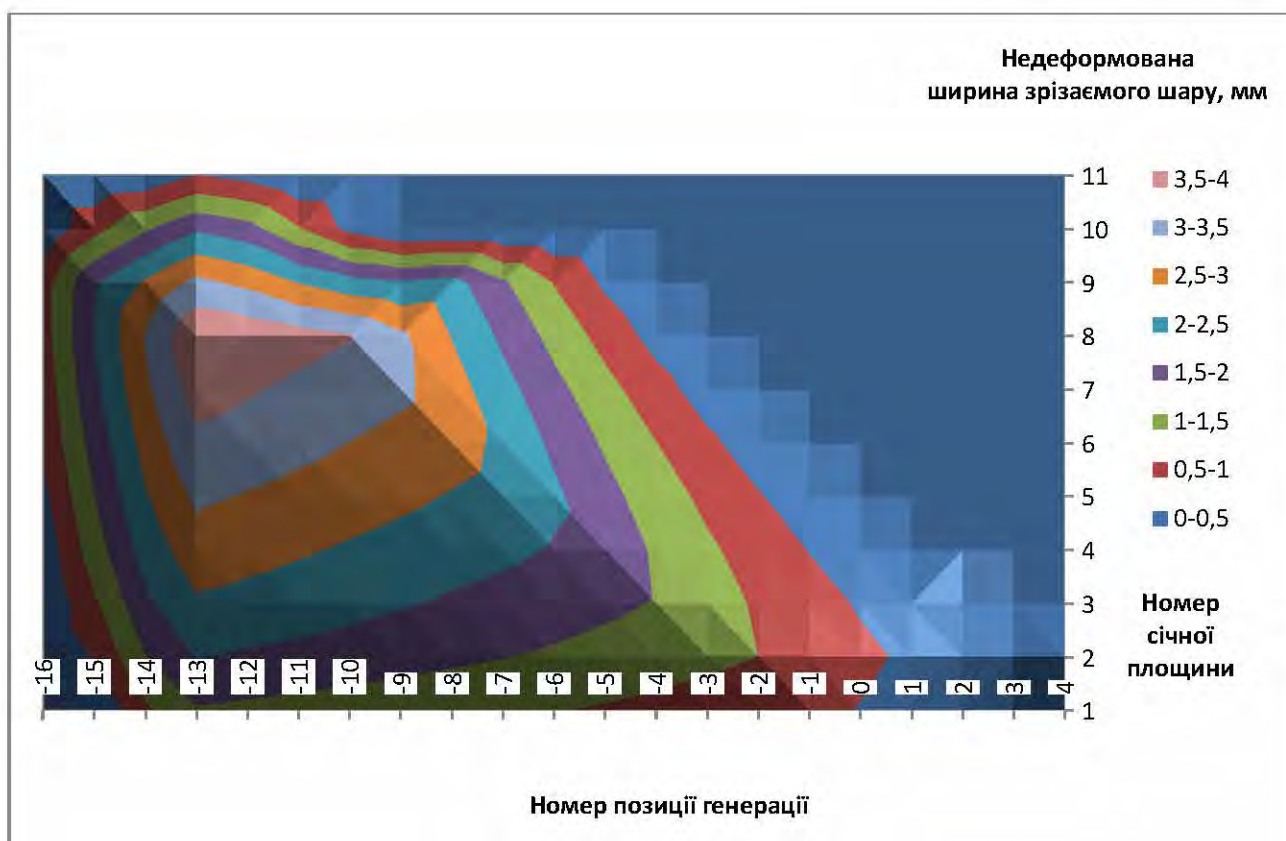
а)



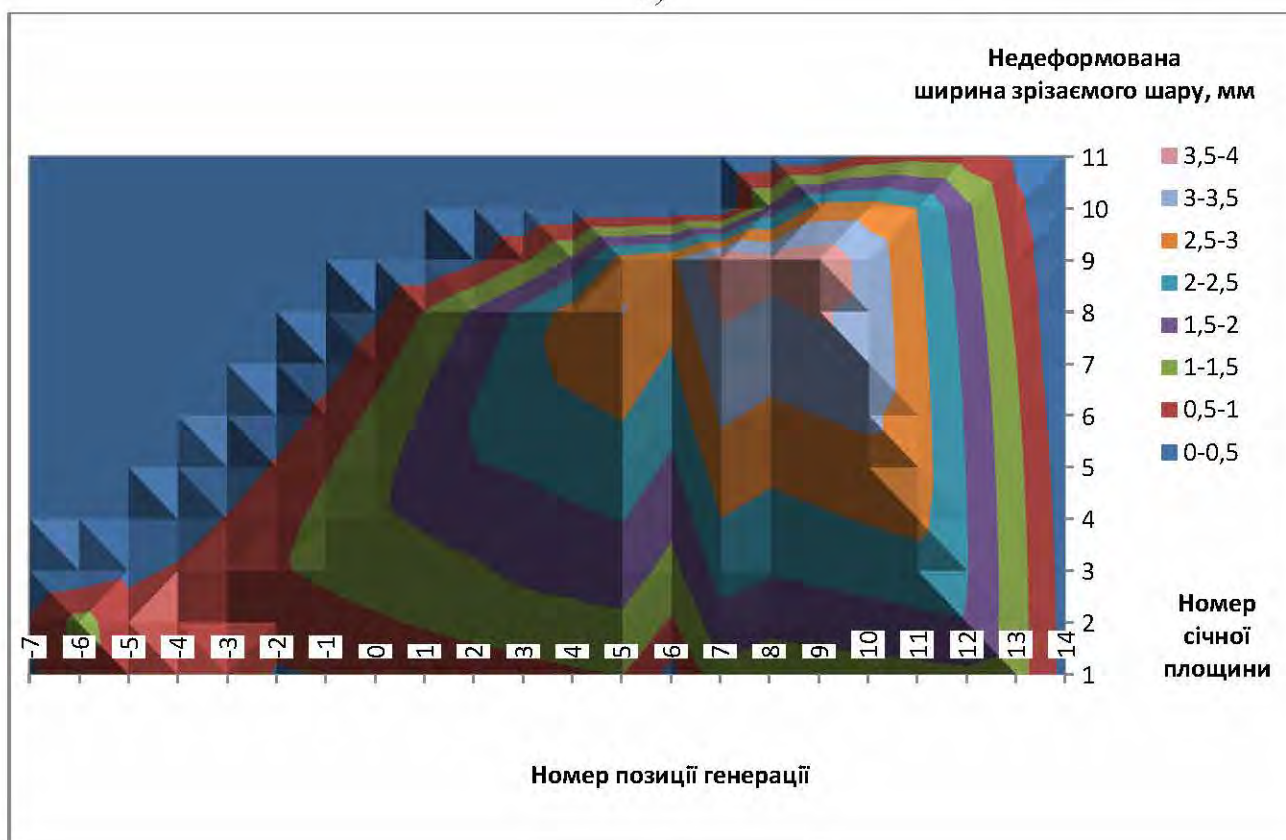
б)

Рис. 3.14 Недеформована площа перетину зрізаємого шару

а) вхідна різальна кромка; б) вихідна різальна кромка.



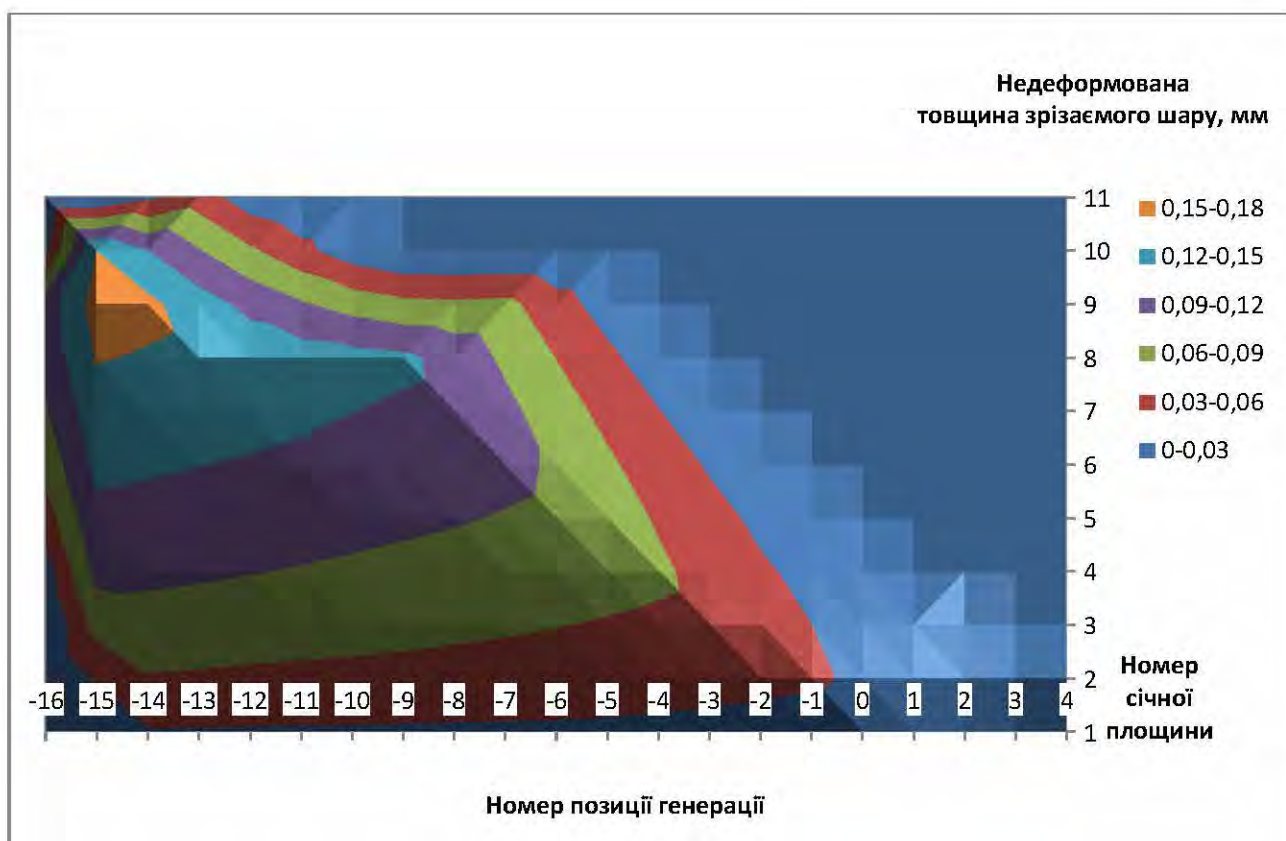
а)



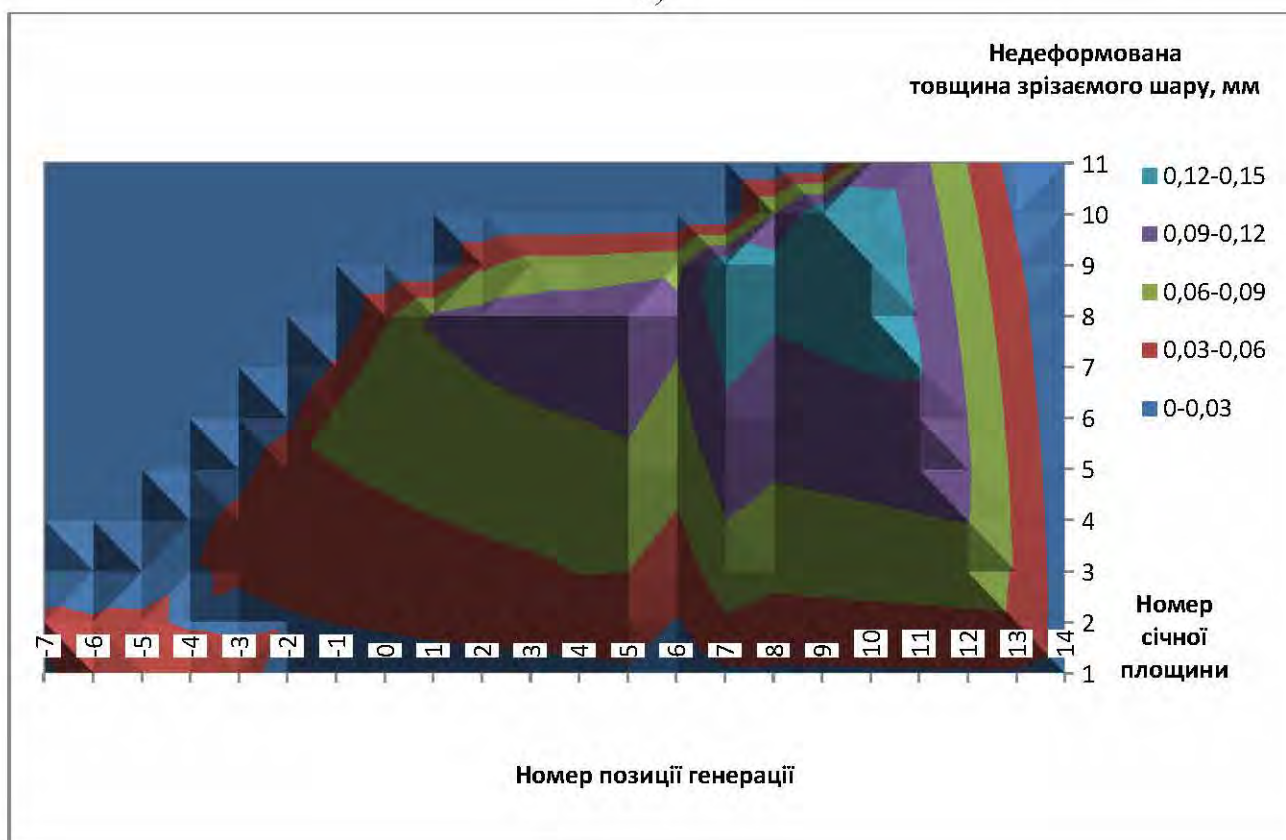
б)

Рис. 3.15 Недеформована ширина зрізаємого шару

а) вхідна різальна кромка; б) вихідна різальна кромка.



а)



б)

Рис. 3.16 Недеформована товщина зрізаного шару

а) вхідна різальна кромка; б) вихідна різальна кромка.

3.3.2 Оцінка енергоємності традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування за результатами дослідження процесів утворення форми

Існує велика кількість відомих досліджень, які присвячені встановленню силового портрету зубофрезерування [7, 9, 14, 16, 25, 28]. Переважна кількість дослідників виконують розрахунки сили різання при зубофрезеруванні на основі даних про геометричні розміри стружок, які знімаються зубцями черв'ячної фрези. Методика такого дослідження розвивалася в часі і пройшла шлях від графоаналітичного визначення розмірів одиничних зрізів, до залучення для обчислення методів тривимірного комп'ютерного моделювання.

Визначення сили різання робиться з метою прогнозування точності оброблюваної деталі, задля врахування впливу сили різання на деформації верстатних вузлів та технологічної системи.

Вплив на геометричні розміри недеформованих елементів подачі та швидкості різання незначний, вирішальний вплив мають розміри та параметри заготовки й інструмента.

Дослідження проводиться відповідно до описаної у р. 2.4.2 методики.

Отримані значення швидкості знімання матеріалу (material removal rate) Q , шляхом підстановки значення ширини і товщини різання у формулу (2.2) та розраховані на її основі споживана потужність P_c (2.3) та сила різання F_c (2.4), представлено у вигляді графіка на рис. 3.17. Відносний крутний момент $M(F_c)$ визначений по формулі (2.8) також представлений на рис. 3.17.

Кожний пік кривої це оберт інструменту на один зубець, за який значення крутного моменту змінюється від мінімуму до максимуму, і назад. Значення мінімального крутного моменту знаходиться у залежності від розмірів дуги контакту зубця черв'ячної фрези із деталлю під час обробки.

При аналізі кривих (рис. 3.17) можна дійти висновку, що під час обробки методом черв'ячного чистового зубофрезерування наявні ділянки із крутним моментом, який рівний нулю, та ділянки на яких крутний момент не знижується за рахунок перекриття по окружному кроку. Це показник нерівномірності роботи фрези, що є причиною вібрацій під час обробки.

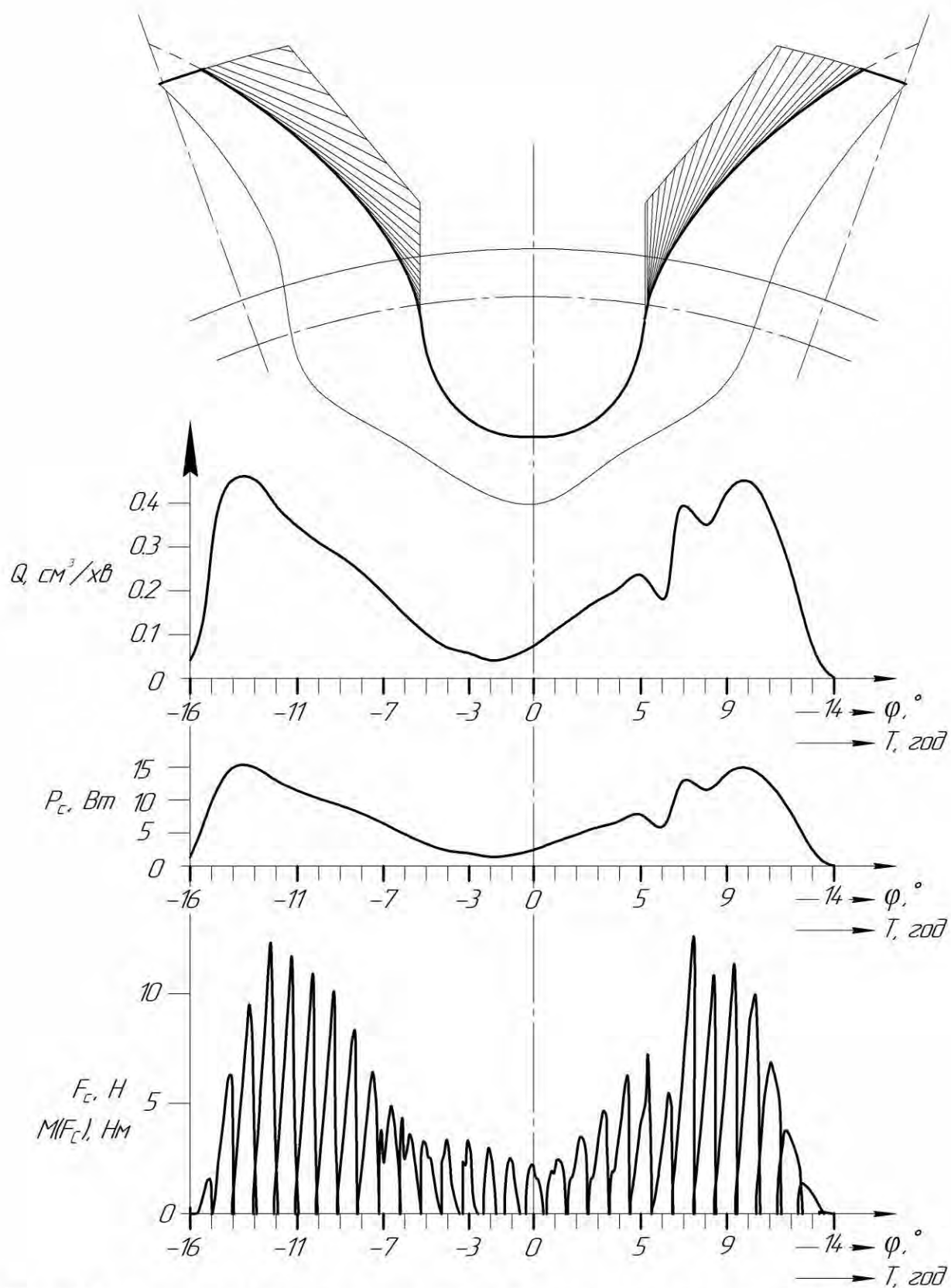


Рис. 3.17 Показники продуктивності, потужності та сил різання в межах однієї міжзубової впадини при чистовому черв'ячному зубофрезеруванні.

Відносна енергоємність $|E|$, визначена по формулі (2.10) для традиційного чистового черв'ячного зубофрезерування дорівнює $|E| = 7,56$, в умовних одиницях енергії.

Вихідні дані дослідження зведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Найменування параметру	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення
Швидкість знімання матеріалу (material removal rate)	Q	смЗ/хв	0,003...0,4542
Споживана потужність	P_c	Вт	0,104...14,989
Діапазон сили різання (крутного моменту)	F_c $(M(F_c))$	Н (Нм)	0,07...10,1175
Відносний модуль енергозатрат при обробці міжзубової впадини	$ E(M_c) $	відносні одиниці енергоємності	7,56

3.4 Теоретичні дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування

3.4.1 Аналіз процесів утворення форми при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні на базі тривимірної комп'ютерної моделі кінематики зубофрезерування

Аналіз процесів утворення евольвентного профілю при обробці методом черв'ячно-контурного зубофрезерування виконуємо на основі вимірів ширини, товщини та визначення площі одиничних різів, які здійснюються кожним зубцем фрези.

Дослідження здійснюється в умовах тривимірного комп'ютерного моделювання, відповідно до методики, описаної у р. 2.3. В результаті модулювання виконується обробка одного евольвентного профілю, тривимірна модель якого приведена на рис. 3.18.

Геометричні форми одиничних зрізів представлені на рис. 3.19, для деяких позицій генерації при обробці одного евольвентного профілю.

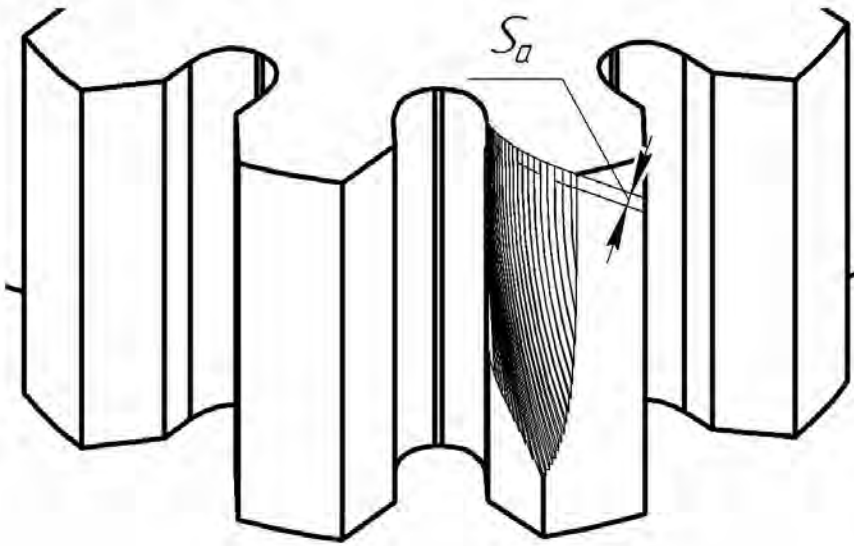


Рис. 3.18 Розподілення
одиничних зрізів на
моделі черв'ячно-
контурного
зубофрезерування.

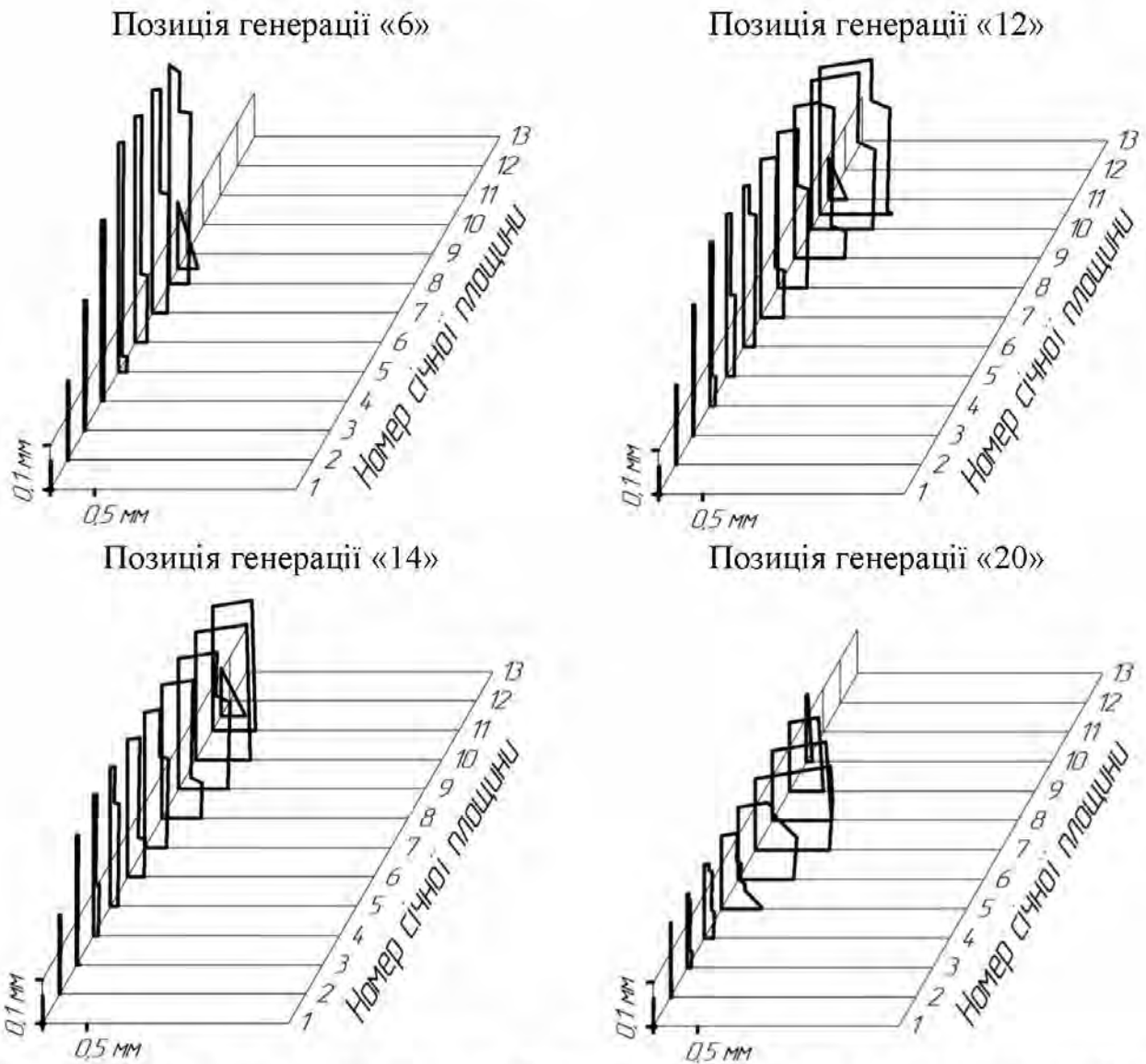


Рис. 3.19 Діаграма розміщення недеформованих площин зрізів по траєкторії по траєкторії руху зубця черв'ячно-контурної фрези.

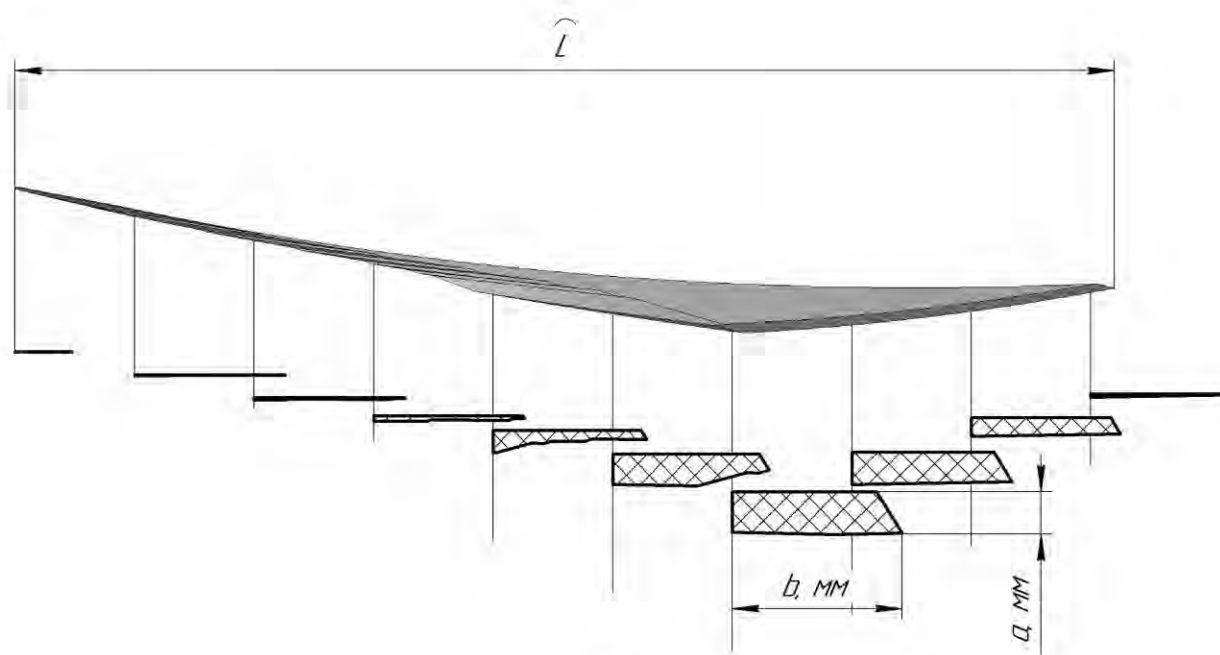
На основі рис. 3.19, можна зробити висновок, що зубець черв'ячно-контурної фрези здебільшого зрізає стружки у 3...9 разів більшою товщиною, ніж шириною. Таке співвідношення геометричних розмірів зрізуваних елементів може характеризуватися низькими значеннями питомих енергозатрат [25, 28].

Майже на всіх позиціях генерації форми знімаємих стружок схожі одна на одну, а отже процес різання набуває стабільності та рівномірності. Це спрощує прогнозування стійкості фрези та точності оброблюваної деталі. Прогнозування стійкості та ресурсу фрези також спрощується за рахунок схеми різання, за якої, як видно з рис. 3.19, зубець фрези постійно навантажений на формоутворюючій вершині різальної кромки, яка при русі утворює евольвентний профіль деталі

Тривимірні зображення, отриманих моделюванням методу черв'ячно-контурного зубофрезерування, представлені на рис. 3.20. Зрізи мають просту форму, стабільно рівнобічну та дугоподібну, із невеликим потовщенням на одному із кінців.

Значення геометричних розмірів одиничних зрізів (ширина, товщина та площа) наведено у додатку Б. По цим даним було побудовано графіки залежностей, які приведені на рисунках рис. 3.21...3.23.

При обробці зубчастого колеса в умовах схеми різання за методом сліду, евольвентна поверхня утворена послідовними положеннями вершин різальних кромки на зубцях черв'ячно-контурної фрези в умовах безперервного обкату. Максимальна ширина недеформованого зрізу сягає $a = 0,562$ мм (рис. 3.22), товщина різку, згідно графіка рис. 3.23, сягає $b = 0,913$ мм. Характер розподілу значень площини одиничних недеформованих зрізів майже рівномірний, має місце незначний пік між позиціями генерації «11...13», рис. 3.21. Це може бути викликано формою припуску, залишеного на операцію зубофрезерування.



а)

позиція генерації «6»

позиція генерації «12»

позиція генерації «14»

позиція генерації «20»

б)

Рис. 3.20 Тривимірні зображення недеформованих зрізів, отриманих моделюванням методу черв'ячно-контурного зубофрезерування

а) перерізи відокремлюваних елементів;

б) форми недеформованих відокремлюваних елементів на позиціях генерації.

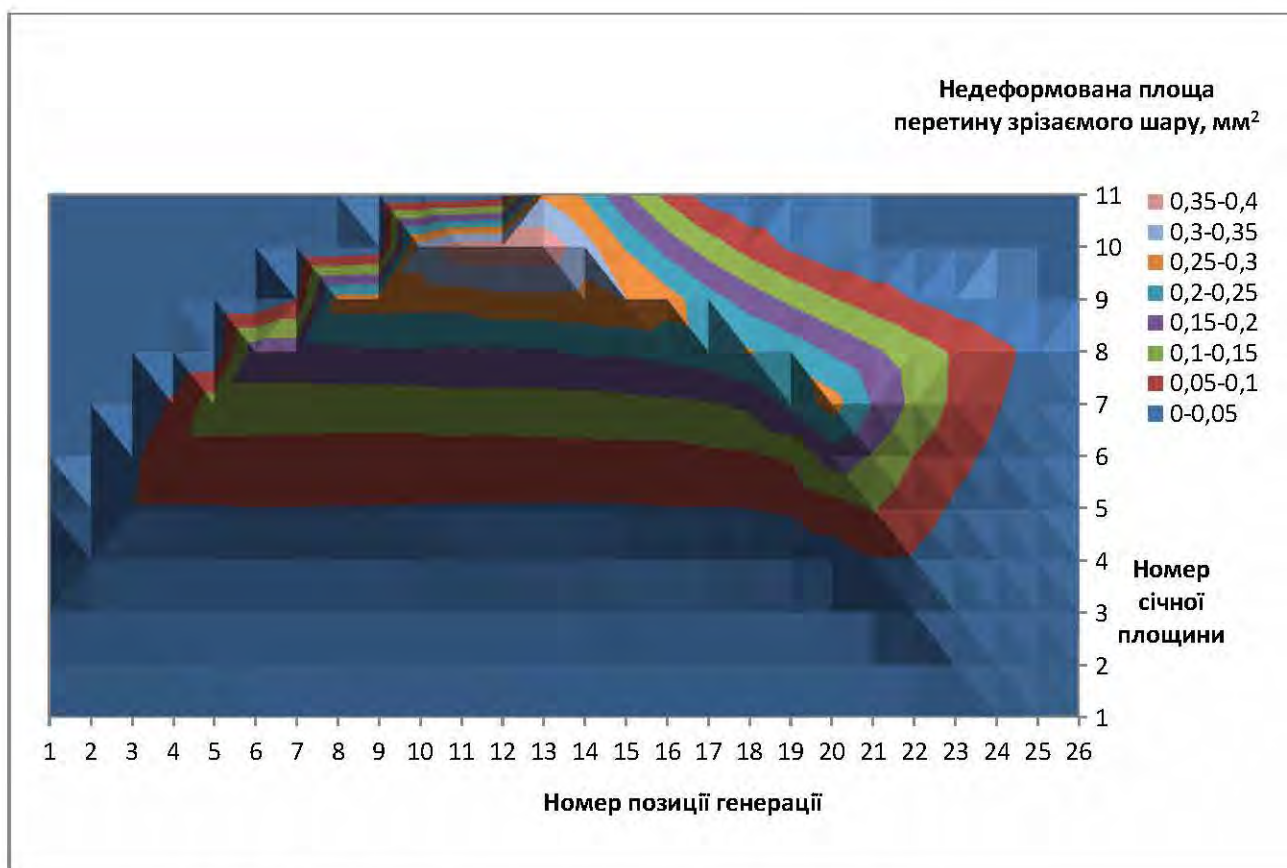


Рис. 3.21 Недеформована площа перетину зрізасюмого шару.

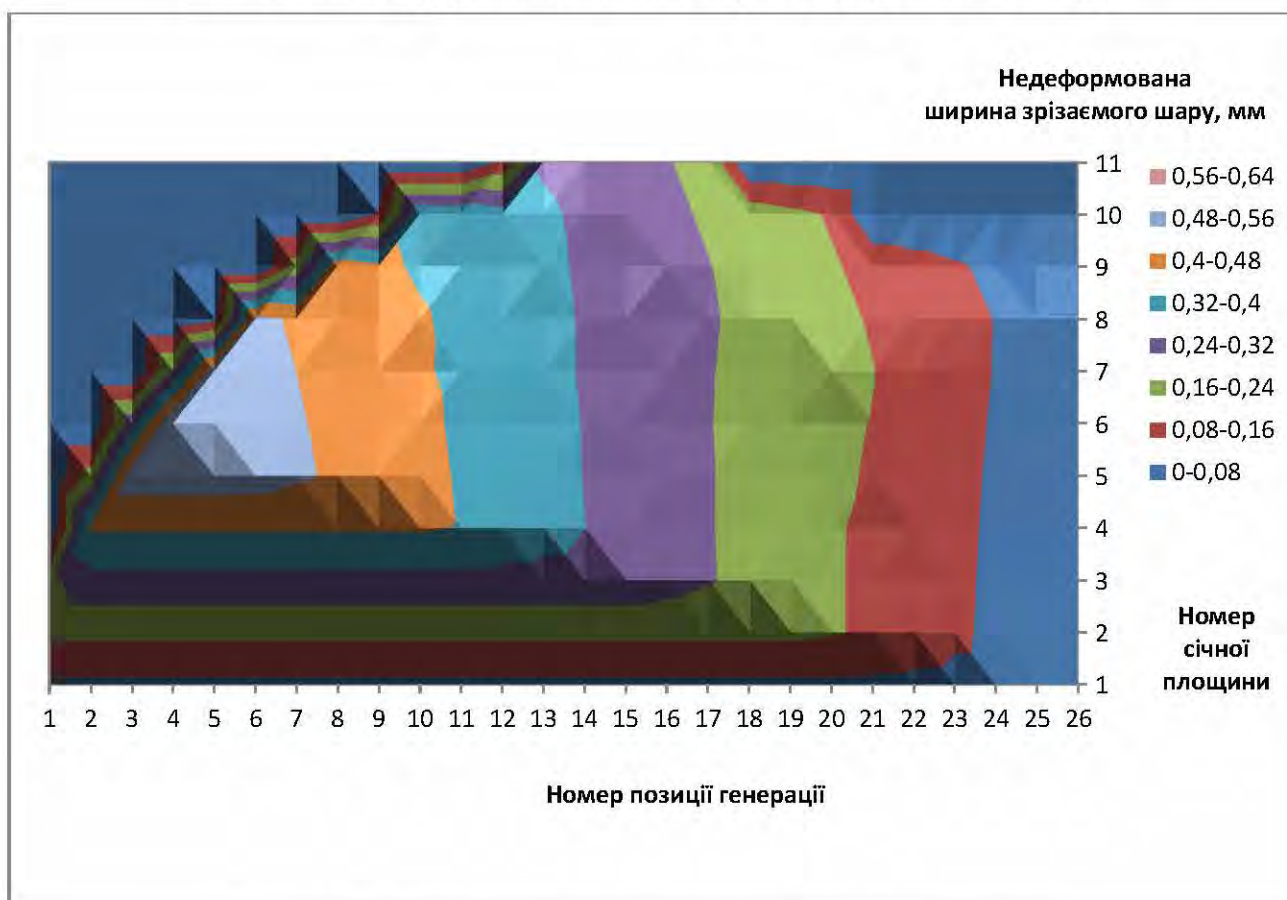


Рис. 3.22 Недеформована ширина зрізасюмого шару.

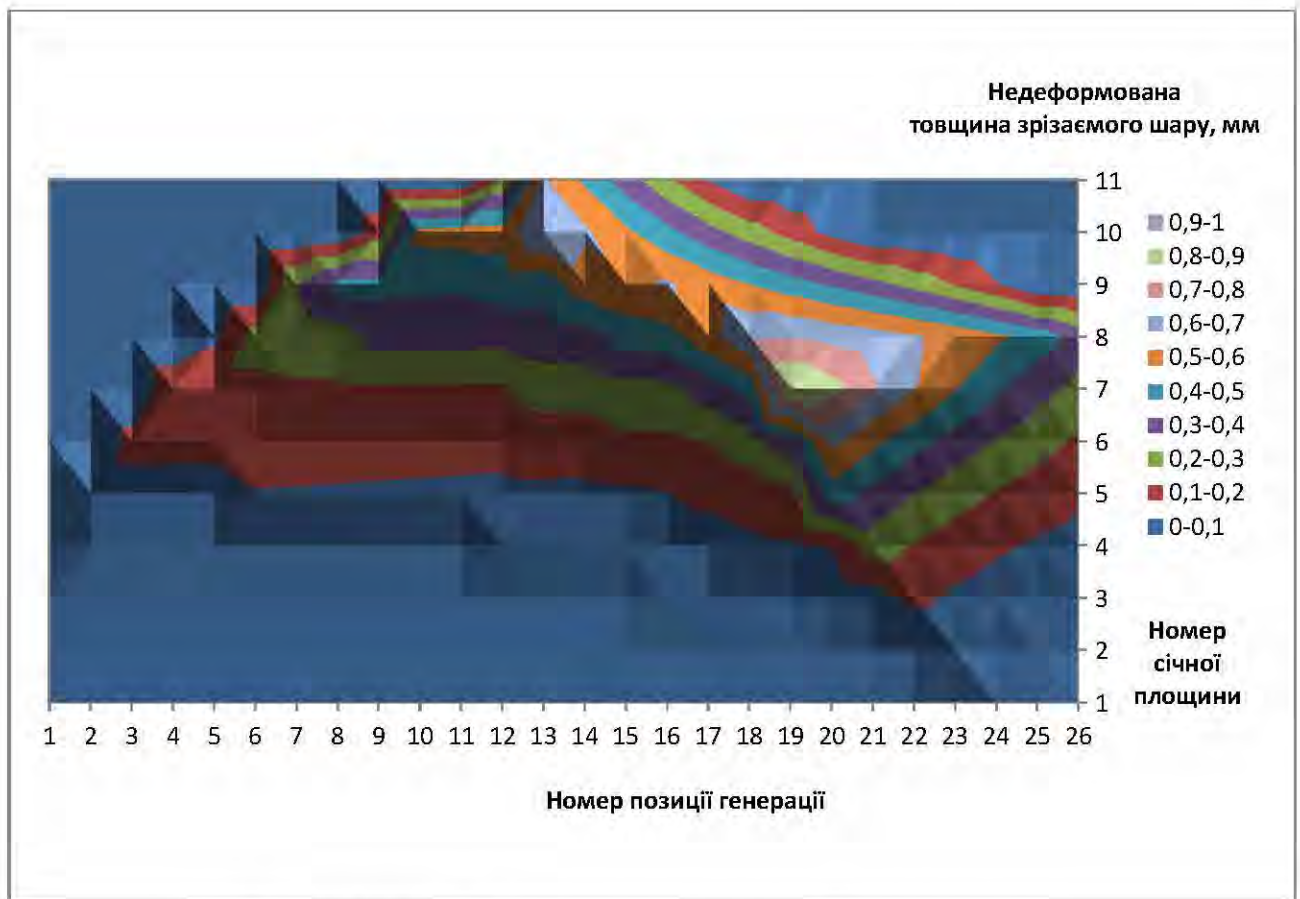


Рис. 3.23 Недеформована товщина зрізаємого шару.

3.4.2 Оцінка енергоємності черв'ячно-контурного зубофрезерування за результатами дослідження процесів утворення форми

Дослідження проводиться відповідно до описаної у р. 2.4.2 методики. Результати дослідження традиційного черв'ячного зубофрезерування приведені у р. 3.2.2.

Отримані значення швидкості знімання матеріалу (material removal rate) Q , шляхом підстановки значення ширини і товщини різання у формулу (2.2) та розраховані на її основі споживана потужність P_c (2.3) та сила різання F_c (2.4), представлено у вигляді графіка на рис. 3.24. Відносний крутний момент $M(F_c)$ визначений по формулі (2.8) також представлений на рис. 3.24.

На графіках рис. 3.24 видно, що при обробці черв'ячно-контурним зубофрезеруванням, протягом всієї обробки евольвентного профілю, зниження крутного моменту до нуля не відбувається. На відміну від традиційної черв'ячної фрези, черв'ячно-контурна, завдяки зменшеному окружному кроку

(більшої кількості зубців), працює набагато більш рівномірно, тому зменшується вплив динамічних характеристик на точність обробки.

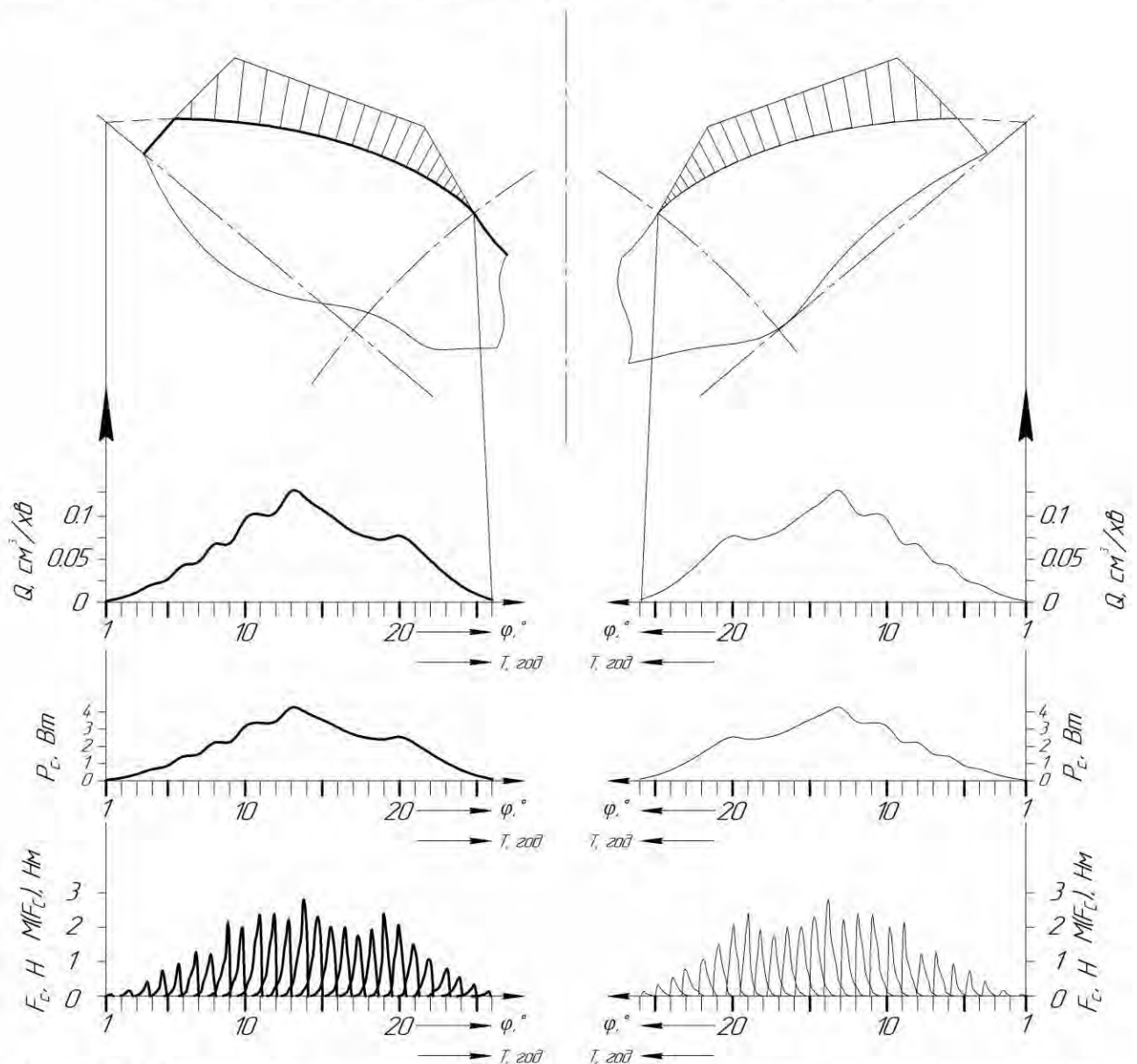


Рис. 3.24 Показники продуктивності, потужності та сил різання в межах однієї міжзубової впадини під час черв'ячно-контурного зубофрезерування

Розраховане значення відносної енергоємності $|E|$ по формулі (2.10) при обробці двох евольвентних профілів (однієї міжзубової западини) методом черв'ячно-контурного зубофрезерування рівне $|E| = 3,24$.

Вихідні дані дослідження зведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Найменування параметру	Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення
Швидкість знімання матеріалу (material removal rate)	Q	смЗ/хв	0,001...0,129
Споживана потужність	P_c	Вт	0,046...4,274
Діапазон сили різання (крутного моменту)	F_c $(M(F_c))$	Н (Нм)	0,032...2,885
Відносний модуль енергозатрат при обробці одного профілю / міжзубової впадини	$ E(M_c) $	відносні одиниці енергоємності	1,62 / 3,24

3.5 Висновки по розділу

1. Виконано аналіз схем взаємодії різальної кромки та оброблюваної поверхні при зубофрезеруванні, здійснено спробу переходу від методу формоутворення типу обкату, до методу сліду.

2. Запропоновано реалізацію схеми різання по методу сліду для зубофрезерування здійснювати на основі способу черв'ячно-контурного зубофрезерування. Розглянуто основні принципи обробки шестерень таким методом, представлено конструкцію черв'ячно-контурної фрези із змінними різальними пластинами.

3. Здійснено дослідження процесу утворення профілю в умовах тривимірного комп'ютерного моделювання для порівняння процесів різання традиційного та запропонованого методу зубофрезерування. Результати дослідження дозволили зробити наступні висновки:

- переважаюча більшість розмірів відокремлюваних елементів при традиційному зубофрезеруванні мають співвідношення ширини до товщини близько 20...30 разів, тоді як при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні співвідношення товщини до ширини знаходяться в межах 3...9 разів - таке співвідношення потребує менших відносних енергозатрат для механічної обробки;
- форма відокремлюваних елементів при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні проста, відносно рівнобічна, має характерне

симетричне потовщення на кінці, тоді як для традиційного методу характерні відокремлювані елементи стрічкоподібної форми, та фіксується різання двома кромками зубця одночасно, чого слід уникати при чистовій обробці;

- характер розподілення перетинів одиничних зрізів, при моделюванні методу черв'ячно-контурного зубофрезерування, відносно рівномірний, із збереженням рівномірності протягом обробки всього евольвентного профілю, протилежний характер розподілу при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні – більші величини перетинів недеформованих зрізів розташовані в зоні евольвенти на вершині зубця оброблюваного колеса.

4. За результатами досліджень утворення профілю, на основі визначених недеформованих перетинів зрізів, було розраховано показники продуктивності, потужності та сили різання, побудовано графіки та визначено відносну енергоємність обробки. Графіки показують навантаження від сили різання для кожного зубця черв'ячної фрези. На основі аналізу графіків можна зробити наступні висновки:

- рівномірність роботи краща при обробці методом черв'ячно-контурного зубофрезерування, за рахунок майже постійного перекриття зубців фрези по коловому кроку;
- обробка зубчастих коліс методом черв'ячно-контурного зубофрезерування дозволить знизити енергозатрати приблизно у 2,3 рази.

3.6 Рекомендації

1. Отримані при моделюванні процесів зубофрезерування залежності можуть бути використані у інших дослідженнях різання і формоутворення, при розробці принципово нових методів зубофрезерування, зубофрезерного інструменту, а також для пошуку шляхів збільшення точності обробки.

2. Застосування представлених у роботі методик, особливо методики для визначення відносної енергоємності, можливе для досліджень процесів різання.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ЧЕРВ'ЯЧНО- КОНТУРНОЇ ФРЕЗИ

4.1 Загальні вихідні дані

Для вирішення питання про економічну ефективність нової конструкції фрези [2] в якості бази для порівняння приймаємо спосіб обробки черв'ячного колеса на зубофрезерному верстаті моделі 53A80H 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.

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою, шт.:

$$k_i = \frac{N_d \cdot T_{\text{нор}} \cdot \gamma \cdot K_{\text{ет}}}{t_e \cdot (1 + p)}, \quad (4.1)$$

де N_d – річна програма виробництва деталей, шт./рік;

$T_{\text{нор}}$ – штучний час обробки однієї деталі, хв.;

γ – питома значення машинного часу в загальному його варіанті;

$K_{\text{ет}}$ – коефіцієнт випадкової втрати інструменту;

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

p – кількість переточок інструменту до повного зносу.

Потреба у базовому інструменті, шт.:

$$\kappa_{\delta} = \frac{800 \cdot 21,758 \cdot 0,45 \cdot 1,08}{30 \cdot (24 + 1)} = 12.$$

Потреба у фрезах в проектному варіанті, шт.:

$$\kappa_{np} = \frac{800 \cdot 32,967 \cdot 0,45 \cdot 1,0}{60 \cdot (30 + 1)} = 7.$$

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_p = \frac{N_{\partial} \cdot T_{нор}}{F_{\partial pm} \cdot 60 \cdot \kappa_e}, \quad (4.2)$$

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

κ_e – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Розрахункова кількість обладнання в проектному варіанті, шт.:

$$Q_{p, np} = \frac{800 \cdot 32,967}{3680 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,12.$$

Приймаємо один верстат.

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Програма виробництва деталей	шт./рік	800	800
2.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1
3.	Потреба в інструменті	шт./рік	12	7
4.	Штучний час обробки деталі	хв.	21,758	32,967
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	грн.	470000	470000
	- інструменту	грн.	65800	-

4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва

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

$$B_{\text{пк}} = H_{\text{оп}} \cdot T_{\text{кон}} \cdot Z_{\text{сз}}^{\text{к}} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\text{д}}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_{\text{с}}}{100}\right) + H_{\text{е}}, \quad (4.3)$$

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

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

$Z_{\text{сз}}^{\text{к}}$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

$\kappa_{\text{д}}$ – додаткова заробітна плата конструктора, %;

$B_{\text{с}}$ – відрахування у соціальні фонди від заробітної плати конструкторів, %;

$H_{\text{е}}$ – накладні витрати (визначаються у відсотках від основної заробітної плати конструктора), грн.

$$B_{\text{пк}} = 1 \cdot 19 \cdot 83,34 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 19 \cdot 83,34 \cdot \frac{45}{100} = 2837,57 \text{ грн.}$$

Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_{\text{т}} = H_{\text{оп}} \cdot T_{\text{тех}} \cdot Z_{\text{сз}}^{\text{м}} \cdot \left(1 + \frac{\kappa_{\text{д}}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_{\text{с}}}{100}\right) + H_{\text{е}}, \quad (4.4)$$

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

$Z_{\text{сз}}^{\text{м}}$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$B_{\text{т}} = 1 \cdot 21 \cdot 82,40 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 21 \cdot 82,40 \cdot \frac{55}{100} = 3273,72 \text{ грн.}$$

4.3 Визначення собівартості та оптової ціни інструменту

Після визначення трудомісткості виготовлення проектної фрези розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників, грн.:

$$Z_{\text{ор}} = \sum_{i=1}^n C_{\text{т}} \cdot T_i, \quad (4.5)$$

де n – кількість i -тих видів робіт;

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

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$Z_{\text{ор}} = 8,6 \cdot 77,979 = 670,62 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$P_o = \sum_{i=1}^n Z_{\text{ор}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{пп}_i}}{100}, \quad (4.6)$$

де $\Pi_{\text{пп}_i}$ – відсоток витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i -му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$P_o = 670,62 \cdot \frac{320}{100} = 2145,98 \text{ грн.}$$

в) цехові витрати:

$$K_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^n Z_{\text{ор}_i} \cdot \frac{\Pi_{\text{цп}_i}}{100}, \quad (4.7)$$

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

Для механічних робіт:

$$K_{\text{цех}} = 670,62 \cdot \frac{232}{100} = 1555,84 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати зводимо у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Трудовіткість виготовлення та окремі види витрат на виготовлення фрези

Види робіт	Трудовіткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $Z_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, B_o , грн.		Загально-цехові витрати $K_{цех}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	1,2	3	78,605	94,33	245	231,10	223	210,35
Механічні	8,6	4	77,979	670,62	320	2145,98	232	1555,84
Термічні	1,5	3	87,048	130,57	385	502,70	282	368,21
Всього	11,3	-	-	895,52	-	2879,78	-	2134,40

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

$$C_{пов} = M_o + M_d + E_{тех} + T_p + П_{тех} + Z_{ор} + Z_{др} + B_c + Z_{цп} + B_o + K_{цех} + K_{зав} + B_{ін} + K_{не}, \quad (4.8)$$

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

$$M_o = B_{чор} \cdot Ц_m - B_{відх} \cdot Ц_{відх}, \quad (4.9)$$

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

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

$$B_{мо} = 1,2 \cdot 220,0 - (1,2 - 0,95) \cdot 40,1 = 253,98 \text{ грн.}$$

M_d – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

$E_{тех}, П_{тех}$ – 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.;

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

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

$K_{\text{цех}}$ – цехові витрати, грн.;

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

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

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

Розрахунок собівартості інструменту зводимо до табл. 4.3.

Таблиця 4.3

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		253,98
2.	Матеріали допоміжні	M_d	4,2% від M_o	10,56
3.	Транспортно-заготівельні витрати	T_v	5% від $(M_o + M_d)$	10,98
3.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$P_{\text{тех}}, E_{\text{тех}}$	78,8% від $З_{\text{ор}}$	705,67
5.	Всього матеріальні витрати			980,80
6.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{\text{ор}}$	табл. 4.2	895,52
7.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{\text{др}}$	10% від $З_{\text{ор}}$	89,55
8.	Відрахування в фонд соціального страхування	B_c	22% від $(З_{\text{ор}} + З_{\text{др}})$	216,72
9.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{\text{цп}}$	8,2% від $З_{\text{ор}}$	73,43
10.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	B_o	табл. 4.2	2879,78
11.	Цехові витрати	$K_{\text{цех}}$	табл. 4.2	2134,40
12.	Загальнозаводські витрати	$K_{\text{зав}}$	180% від $З_{\text{ор}}$	1611,93
13.	Інші виробничі витрати	$B_{\text{ін}}$	1,9% від $З_{\text{ор}}$	17,01
14.	Виробнича собівартість	$C_{\text{вир}}$	$\Sigma(7 \div 15)$	8899,14
15.	Позавиробничі витрати	$K_{\text{пв}}$	1% від $C_{\text{вир}}$	88,99
16.	Повна собівартість	$C_{\text{пов}}$	$C_{\text{вир}} + K_{\text{пв}}$	8988,14
17.	Прибуток	$П_n$	18% від $C_{\text{пов}}$	1617,86
18.	Оптова ціна підприємства	$Ц$	$C_{\text{пов}} + П_n$	10606,00

Оптову ціну інструменту розраховуємо за формулою:

$$C_{\text{опт}} = C_{\text{пов}} + П_n, \quad (4.10)$$

де $П_n$ – нормативний прибуток, грн.

$$\Pi_n = \frac{P_c \cdot C_{нов.}}{100}, \quad (4.11)$$

P_c – встановлений рівень рентабельності виробу, %.

$$\Pi_n = \frac{18 \cdot 8988,14}{100} = 1617,86 \text{ грн.}$$

$$\Pi_{\text{опт}} = 8988,14 + 1617,86 = 10606,0 \text{ грн.}$$

4.4 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:

$$B_e = \sum_{i=1}^m B_i, \quad (4.12)$$

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 ріжучий інструмент, грн.;

B_a – витрати на амортизацію обладнання, грн.

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

$$B_z = C_r \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot (1 + K_d) \cdot (1 + K_c), \quad (4.13)$$

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

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

$$B_{\text{эл}} = 77,98 \cdot \frac{11,208}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 19,5485 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$P_e = \frac{N_{\text{в}} \cdot K_o \cdot K_N \cdot K_d}{\eta_m \cdot \eta_c} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot C_{\text{ел}}, \quad (4.14)$$

де $N_{\text{в}}$ – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

K_o – коефіцієнт одночасної роботи моторів ($K_o=0,65\dots0,8$);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для свердлильних верстатів $K_N=0,5\dots0,6$, для пресів $K_N=0,4\dots0,5$);

K_d – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом ($K_d=0,3\dots0,5$);

η_c – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів ($\eta_c=0,86\dots0,9$);

η_m – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_m=0,92\dots0,96$);

$C_{\text{ел}}$ – ціна 1 кВт-год силовій електроенергії, грн.

$$B_{\text{эл}}^{\text{п}} = \frac{12,5 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{11,208}{60} \cdot 7,5 = 4,3990 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{\text{мв}} = \frac{M_{\text{гв}} \cdot R_{\text{м}} \cdot T_{\text{нор}}}{60 \cdot 100} \cdot K_{\text{п}}, \quad (4.15)$$

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 $K_{\text{п}} = 1,0$).

$$B_{\text{дм}}^{\text{п}} = \frac{78,5 \cdot 15,0 \cdot 11,208}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 2,1995 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot \Gamma_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot \Gamma_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.16)$$

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.).

$$B_p^{\text{пр}} = \frac{15 \cdot 880 + 12 \cdot 720}{3680} \cdot \frac{11,208}{60} = 1,1086 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального різучого інструменту:

$$B_{ip} = \frac{(S_u + p \cdot S_{\text{пер}}) \cdot \gamma \cdot T_{\text{нор}}}{t_e (p + 1)} K_{\text{ет}}, \quad (4.17)$$

де S_u – первісна вартість різучого інструменту, грн.;

p – кількість переточувань різучого інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру різучої грані;

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

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

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

$K_{\text{ет}}$ – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{ip}^{\delta} = \frac{(65800,0 + 24 \cdot 25,66) \cdot 0,45 \cdot 21,758}{30 \cdot (1 + 24)} \cdot 1,08 = 936,409 \text{ грн.};$$

$$B_{ip}^{\text{пр}} = \frac{(10606,0 + 18,5 \cdot 30) \cdot 0,45 \cdot 32,967}{60 \cdot (1 + 30)} \cdot 1,0 = 89,0189 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_o \cdot K_d \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.18)$$

де F_o – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м²;

K_d – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [1];

C – річні витрати, пов'язані з використанням 1 м² виробничого приміщення, грн./м².

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{5,04 \cdot 3,0 \cdot 11,208}{3680 \cdot 60} \cdot 780 = 0,5987 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_a = \frac{\Phi_{\text{бал}} \cdot H_a}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.19)$$

де H_a – норма амортизації, %;

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

Балансову вартість верстатів знайдемо за формулою:

$$\Phi_{\text{бал}} = C_{\text{опт}} \cdot (1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\text{ф}}), \quad (4.20)$$

де $C_{\text{опт}}$ – оптова ціна верстата, грн.;

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

$$\Phi_{\text{бал}} = 470000 \cdot (1 + 0,08 + 0,06 + 0,05) = 559300 \text{ грн.},$$

$$B_a^{\text{нр}} = \frac{559300 \cdot 20 \cdot 11,208}{3680 \cdot 60 \cdot 100} = 5,6781 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 4.4.

Таблиця 4.4

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	-	19,5485
2.	Силова електроенергія	$B_{\text{ел}}$	-	4,3990
3.	Допоміжні матеріали	$B_{\text{дм}}$	-	2,1995
4.	Ремонт обладнання	B_p	-	1,1086
5.	Універсальний ріжучий інструмент	B_{ip}	936,409	89,0189
6.	Утримання приміщення	$B_{\text{ун}}$	-	0,5987
7.	Амортизація обладнання	B_a	-	5,6781
Загальна сума		B_e	936,409	122,551

4.5 Розрахунок показників економічної ефективності

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

$$E_{pe} = (C_{opt.np} - C_{nov.np}) \cdot P_e - E_n \cdot K_e, \quad (4.21)$$

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

P_e – програма виробництва інструменту, шт./рік;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K_e – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_e = B_{нк} + B_m = 2837,57 + 3273,72 = 6111,29 \text{ грн.}, \quad (4.22)$$

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

$$E_{pe} = (10606,0 - 8988,14) \cdot 5 - 0,16 \cdot 6111,29 = 7112 \text{ грн.}$$

Річний економічний ефект, який отримує підприємство-споживач, розраховуємо 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.

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

де $\Phi_{бал}^{np}$, $\Phi_{бал}^{\delta}$ – 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;

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

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

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

$$K_{\text{сп}} = 10606 \cdot 7 - 65800 \cdot 12 = -715358 \text{ грн.}$$

$$E_{\text{р.сп}} = (936,409 - 122,551) \cdot 800 - 0,16 \cdot (-715358) = 765500 \text{ грн.}$$

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

$$T_{\text{ок.в}} = \frac{K_{\text{в}}}{(\Pi_{\text{опт.пр}} - C_{\text{пов.пр}}) \cdot \Pi_{\text{в}}} = \frac{6111,29}{(10606,0 - 8988,14) \cdot 5} = 0,76 \text{ року} = 9,1 \text{ міс.}$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту, табл. 4.5.

Таблиця 4.5

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна,% (+,-)
1.	Потреба в інструменті:	шт./рік	12	7	-41,7
2.	Програма виробництва деталей	шт./рік	800	800	—
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	21,758	32,967	+51,5
4.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1	—
5.	Оптова ціна обладнання	грн.	470000	470000	—
6.	Повна собівартість фрези	грн.	—	8988,14	—
7.	Оптова ціна фрези	грн.	65800	10606	-83,9
8.	Собівартість одиниці обробки	грн.	936,41	122,55	-86,9
9.	Капітальні витрати на підготовку виробництва	грн.	—	6111,3	—
10.	Річний економічний ефект:				
	- у виробника	грн.	—	7112	—
	- у споживача	грн.	—	765500	—
11	Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника	міс.	—	9,1	—

4.6 Висновки

Згідно проведених розрахунків, річний економічний ефект від використання черв'ячно-контурних фрез буде становити $E_{\text{р.сп}} = 765500$ грн., із строком окупності додаткових капітальних вкладень у виробника інструменту у $T_{\text{ок.в}} = 9,1$ міс.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі по підвищенню ефективності чистового зубофрезерування шестерень завдяки використанню методу черв'ячно-контурного зубофрезерування. Пропонований метод раціонально використовувати для шестерень середніх модулів. Сутність методу полягає у зміні схеми формоутворення та зміні принципу взаємодії формоутворюючої різальної кромки фрези та оброблюваної евольвентної поверхні, що дозволить покращити якість та підвищити точність обробки.

Результати проведених досліджень дозволили зробити наступні висновки по роботі:

1. Визначено, що є можливість використовувати схему формоутворення евольвентного профілю по методу сліду, як альтернативу схемі обкату при традиційному черв'ячному зубофрезеруванні. При такій схемі евольвента утворюється як множина геометричних точок, що розташовуються на проекціях нормалей до теоретичного евольвентного профіля, однак в умовах неперервного обкату.

2. На основі запропонованої та описаної схеми формоутворення по методу сліду, було обрано спосіб черв'ячно-контурного зубофрезерування.

3. Розроблена методика дослідження процесу утворення форми в умовах комп'ютерного моделювання. Проведене дослідження по обумовленій методиці показало, що зміна схеми формоутворення для черв'ячного зубофрезерування на спосіб сліду, категорично змінила форму та розміри елементів матеріалу, відокремлюваних кожним зубцем черв'ячної фрези. Така форма більш раціональна з огляду процесу різання та експлуатації інструменту. Також визначено геометричні розміри одиничних зрізів та закономірності їх розподілення під час обробки.

4. На основі результатів дослідження процесу утворення форми по п. 3 були розраховані показники продуктивності, потужності та сил різання в межах однієї міжзубової впадини, які відтворюють навантаження від сили різання на

кожному зубці фрези. При отриманих графіків, було встановлено, що метод черв'ячно-контурного зубофрезерування характеризується зниженням відносної енергоємності обробки в 2,3 рази, також метод має кращі характеристики по рівномірності роботи за рахунок перекриття зубців фрези по окружному кроку.

5. В роботі проведено економічне обґрунтування впровадження результатів досліджень при конструюванні, виробництві та експлуатації запропонованої черв'ячно-контурної фрези. Очікуваний економічний ефект у споживача 765500 грн., у виробника 6111 грн., а строк окупності додаткових капітальних витрат – 9,1 місяці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 40 с.
2. Організація виробництва на промислових підприємствах: Навч. посібник / за ред. Ю.А. Єгупова. - Одеса: Автограф, 2004. 436 с.
3. 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.
4. Пат. 110741 Україна, МПК В23F 21/14, В23F 21/16, В23F 5/22. Спосіб фрезерування зубців циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2014 07893; заявл. 14.07.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. №3.
5. Радзевич С. П. Технология зуборезных работ. Справочник / С. П. Радзевич, В. А. Палагута, Е. D. Goodman. – Киев: ИПТТМ, 1999. – 298 с.
6. A.L.M.T. Corp. - Formula to calculate cutting process [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.allied-material.co.jp/en/products/diamond/knowledge/cutting_formula.html.
7. 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.
8. 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.

9. 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.
10. 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.
11. Gear hobs — Accuracy requirements : ISO 4468:2009. – [Valid from 2009.06.01]. – Geneve : International Organization for Standardization, 2009. – 32 P. – (International Standard).
12. Gleason – Инструмент [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.gleason.com/ru/products/tools/cylindrical/hobbing-and-milling/hobbing-and-milling-tools>.
13. GMN - Tool spindles for automatic tool change [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.gmn.de/wp-content/uploads/2505_1219_e1.pdf.
14. 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.
15. LMT Fette Gear Cutting [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.lmt-tools.com/en/products/gear-cutting>.
16. 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.
17. Mitsubishi Materials - Formulae for cutting power [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://www.mitsubishicarbide.net/contents/mhg/enuk/html/product/technical_information/information/formula4.html.
18. New Developments in Gear Hobbing / Dr. Oliver Winkel // Gear Technology. – 2010. – March/April. – P. 45–52.

19. 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.
20. Principles of Engineering Manufacture (Third Edition) / Stewart C. Black, Vic Chiles, A.J. Lissaman, S.J. Martin // Butterworth-Heinemann. - 1996. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-340-63195-9.X5000-7>.
21. 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).
22. SAAZOR Hobs [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://saazor.de/index.php/en>.
23. Sandvik coromant - CoroMill 176 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/coromill_176/Pages/default.aspx.
24. Schaeffler Industrial Drives - direct-drive rotary tables [Електронний ресурс] – Режим доступу 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.
25. Schmidthammer A. Die Verschleißerscheinungen an Wälzfräsern und ihre Ursachen / Schmidthammer. // Technische Nachrichten Fette. – 1980. – №270. – S. 211.
26. 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).
27. Star SU - Gear Cutting Tools [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.star-su.com/wp-content/uploads/hobs_milling_cutters_ed0.pdf.
28. Sulzer G. Bestimmung der Spanungsquerschnitte beim Wälzfräsen / G. Sulzer. // Industrie-Anzeiger. – 1974. – №92. – S. 246–247.
29. 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).

Таблиця А.2

Ширина зрізаемого шару, що знімається вихідною різальною кромкою, мм

Позиція генерації	Радіальна позиція по траєкторії руху зубця, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-7	0,398	0,552	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-6	0,851	1,179	0,145	-	-	-	-	-	-	-	-
-5	0,777	0,727	0,385	-	-	-	-	-	-	-	-
-4	0,870	0,682	0,567	0,192	-	-	-	-	-	-	-
-3	0,956	0,614	0,757	0,532	0,141	-	-	-	-	-	-
-2	0,442	0,735	0,956	0,843	0,569	0,167	-	-	-	-	-
-1	0,522	0,840	1,087	1,135	0,963	0,661	0,249	-	-	-	-
0	0,595	0,938	1,211	1,424	1,340	1,122	0,799	0,374	-	-	-
1	0,684	1,052	1,325	1,562	1,713	1,580	1,363	1,029	-	-	-
2	0,764	1,156	1,428	1,706	1,973	2,043	1,843	1,565	0,372	-	-
3	0,845	1,247	1,611	1,822	2,041	2,267	2,354	2,145	0,928	-	-
4	0,942	1,369	1,640	1,916	2,171	2,398	2,635	2,728	1,599	-	-
5	1,010	1,410	1,745	2,020	2,301	2,528	2,767	3,018	2,728	-	-
6	0,323	0,937	1,337	1,628	1,906	2,184	2,415	2,659	2,917	-	-
7	1,381	1,833	2,219	2,496	2,782	3,066	3,312	3,574	3,854	-	-
8	1,174	1,648	2,048	2,331	2,613	2,905	3,160	3,415	3,688	1,608	-
9	1,233	1,728	2,128	2,435	2,717	3,009	3,292	3,549	3,824	2,712	-
10	1,292	1,809	2,207	2,539	2,821	3,113	3,375	3,350	3,315	2,750	0,631
11	1,350	1,889	2,286	2,645	2,725	2,701	2,668	2,622	2,561	2,477	0,821
12	1,409	1,972	2,020	2,002	1,974	1,935	1,883	1,814	1,722	1,599	0,753
13	1,232	1,227	1,211	1,184	1,143	1,087	1,012	0,914	0,786	0,618	0,397
14	0,339	0,332	0,310	0,272	0,216	0,139	0,038	-	-	-	-

[illegible]

Таблиця А.4

Товщина зрізаного шару, що знімається вихідною різальною кромкою, мм

Позиція генерації	Радіальна позиція по траєкторії руху зубця, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-7	0,025	0,041	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-6	0,044	0,033	0,006	-	-	-	-	-	-	-	-
-5	0,047	0,033	0,022	-	-	-	-	-	-	-	-
-4	0,043	0,027	0,028	0,018	-	-	-	-	-	-	-
-3	0,045	0,024	0,033	0,041	0,016	-	-	-	-	-	-
-2	0,015	0,028	0,038	0,046	0,054	0,021	-	-	-	-	-
-1	0,016	0,031	0,042	0,051	0,059	0,067	0,034	-	-	-	-
0	0,017	0,033	0,045	0,055	0,064	0,072	0,080	0,054	-	-	-
1	0,019	0,036	0,049	0,059	0,069	0,078	0,085	0,093	-	-	-
2	0,021	0,039	0,052	0,063	0,073	0,083	0,092	0,100	0,054	-	-
3	0,022	0,041	0,055	0,068	0,080	0,088	0,095	0,103	0,073	-	-
4	0,023	0,043	0,061	0,071	0,081	0,090	0,100	0,108	0,072	-	-
5	0,026	0,047	0,060	0,073	0,084	0,094	0,103	0,112	0,077	-	-
6	0,008	0,028	0,044	0,057	0,070	0,079	0,089	0,098	0,082	-	-
7	0,026	0,057	0,076	0,090	0,103	0,115	0,124	0,133	0,142	-	-
8	0,027	0,049	0,068	0,081	0,093	0,105	0,114	0,123	0,132	0,090	-
9	0,027	0,050	0,070	0,083	0,096	0,108	0,118	0,127	0,136	0,145	-
10	0,027	0,052	0,071	0,086	0,098	0,111	0,122	0,131	0,140	0,140	0,098
11	0,027	0,053	0,073	0,088	0,101	0,113	0,122	0,118	0,113	0,106	0,098
12	0,028	0,055	0,074	0,091	0,093	0,090	0,086	0,081	0,075	0,068	0,059
13	0,028	0,056	0,058	0,056	0,054	0,050	0,046	0,041	0,034	0,026	0,016
14	0,016	0,016	0,015	0,013	0,010	0,006	0,002	-	-	-	-

[illegible]

Таблиця А.6

Недеформована площа перетину зрізаного шару,
що знімається вихідною різальною кромкою, мм²

Позиція генерації	Радіальна позиція по траєкторії руху зубця, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
-16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-7	0,010	0,024	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-6	0,030	0,041	0,001	-	-	-	-	-	-	-	-
-5	0,033	0,042	0,008	-	-	-	-	-	-	-	-
-4	0,040	0,030	0,016	0,003	-	-	-	-	-	-	-
-3	0,073	0,026	0,024	0,024	0,001	-	-	-	-	-	-
-2	0,006	0,018	0,028	0,043	0,045	0,003	-	-	-	-	-
-1	0,008	0,024	0,041	0,059	0,066	0,049	0,008	-	-	-	-
0	0,010	0,029	0,049	0,072	0,090	0,095	0,072	0,018	-	-	-
1	0,013	0,035	0,059	0,085	0,111	0,131	0,135	0,111	-	-	-
2	0,015	0,041	0,068	0,096	0,130	0,164	0,186	0,184	0,018	-	-
3	0,017	0,046	0,081	0,116	0,147	0,179	0,213	0,238	0,078	-	-
4	0,020	0,059	0,090	0,122	0,159	0,198	0,237	0,279	0,128	-	-
5	0,029	0,059	0,096	0,134	0,175	0,217	0,260	0,306	0,198	-	-
6	0,002	0,025	0,053	0,085	0,120	0,156	0,196	0,237	0,256	-	-
7	0,044	0,104	0,161	0,215	0,271	0,327	0,386	0,446	0,510	-	-
8	0,030	0,078	0,125	0,174	0,224	0,275	0,329	0,386	0,445	0,130	-
9	0,033	0,084	0,135	0,187	0,239	0,295	0,352	0,412	0,476	0,441	-
10	0,131	0,090	0,144	0,200	0,257	0,314	0,374	0,419	0,432	0,398	0,056
11	0,173	0,097	0,155	0,213	0,268	0,297	0,295	0,278	0,259	0,236	0,095
12	0,223	0,104	0,153	0,170	0,165	0,156	0,146	0,133	0,117	0,098	0,055
13	0,043	0,065	0,063	0,060	0,055	0,049	0,042	0,034	0,024	0,015	0,006
14	0,005	0,005	0,004	0,003	0,002	-	-	-	-	-	-

ДОДАТОК Б

**Результати дослідження параметрів одиничних зрізів
черв'ячно-контурного зубофрезерування**

Таблиця Б.1

Ширина зрізаемого шару, мм

Позиція генерації	Радіальна позиція по траєкторії руху зубця, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
1	0,064	0,180	0,216	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,064	0,180	0,295	0,410	0,191	-	-	-	-	-	-
3	0,064	0,180	0,295	0,410	0,523	0,291	-	-	-	-	-
4	0,064	0,180	0,295	0,410	0,523	0,562	0,247	-	-	-	-
5	0,064	0,180	0,295	0,410	0,523	0,537	0,529	0,056	-	-	-
6	0,064	0,180	0,295	0,410	0,518	0,512	0,505	0,496	-	-	-
7	0,064	0,180	0,295	0,410	0,493	0,487	0,480	0,472	0,188	-	-
8	0,064	0,180	0,295	0,410	0,468	0,462	0,455	0,451	0,448	-	-
9	0,064	0,180	0,295	0,410	0,444	0,437	0,431	0,423	0,415	0,087	-
10	0,064	0,180	0,295	0,410	0,419	0,415	0,406	0,407	0,391	0,382	-
11	0,064	0,180	0,295	0,397	0,394	0,390	0,388	0,383	0,377	0,376	-
12	0,064	0,180	0,295	0,371	0,369	0,365	0,363	0,359	0,353	0,353	0,094
13	0,064	0,180	0,295	0,346	0,343	0,340	0,339	0,335	0,335	0,330	0,312
14	0,064	0,180	0,295	0,320	0,318	0,317	0,314	0,315	0,311	0,308	0,296
15	0,064	0,180	0,295	0,295	0,293	0,292	0,290	0,290	0,284	0,282	0,269
16	0,064	0,180	0,271	0,269	0,269	0,267	0,268	0,266	0,268	0,256	0,243
17	0,064	0,180	0,245	0,244	0,244	0,242	0,243	0,246	0,242	0,230	0,217
18	0,064	0,180	0,219	0,218	0,219	0,220	0,222	0,225	0,217	0,204	-
19	0,064	0,180	0,194	0,194	0,195	0,197	0,200	0,203	0,192	0,179	-
20	0,064	0,168	0,168	0,168	0,171	0,174	0,189	0,178	0,166	0,153	-
21	0,064	0,142	0,143	0,144	0,154	0,157	0,162	0,153	0,140	-	-
22	0,064	0,117	0,118	0,123	0,126	0,129	0,133	0,128	0,115	-	-
23	0,064	0,091	0,094	0,096	0,098	0,102	0,105	0,103	0,090	-	-
24	0,064	0,066	0,067	0,069	0,071	0,074	0,077	0,078	0,064	-	-
25	0,040	0,040	0,041	0,042	0,045	0,047	0,050	0,052	0,019	-	-
26	0,014	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,023	0,026	-	-	-

Таблиця Б.2

Товщина зрізасмого шару, мм

Позиція генерації	Радіальна позиція по траєкторії руху зубця, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
1	0,015	0,021	0,027	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,015	0,020	0,030	0,043	0,047	-	-	-	-	-	-
3	0,014	0,020	0,030	0,043	0,059	0,136	-	-	-	-	-
4	0,014	0,020	0,029	0,042	0,059	0,134	0,175	-	-	-	-
5	0,013	0,019	0,029	0,042	0,058	0,133	0,173	0,080	-	-	-
6	0,013	0,019	0,028	0,041	0,098	0,131	0,171	0,244	-	-	-
7	0,012	0,018	0,028	0,041	0,096	0,129	0,189	0,244	0,298	-	-
8	0,012	0,018	0,027	0,040	0,094	0,127	0,189	0,243	0,427	-	-
9	0,011	0,017	0,027	0,040	0,092	0,125	0,189	0,343	0,423	0,156	-
10	0,011	0,017	0,026	0,040	0,090	0,124	0,188	0,338	0,419	0,530	-
11	0,010	0,016	0,026	0,039	0,089	0,122	0,188	0,333	0,416	0,543	-
12	0,010	0,016	0,026	0,061	0,087	0,120	0,185	0,329	0,444	0,536	0,207
13	0,010	0,015	0,025	0,059	0,085	0,140	0,254	0,352	0,439	0,701	0,608
14	0,009	0,015	0,025	0,057	0,083	0,138	0,250	0,352	0,557	0,617	0,480
15	0,009	0,015	0,024	0,055	0,083	0,185	0,271	0,440	0,584	0,517	0,346
16	0,008	0,014	0,035	0,054	0,098	0,181	0,269	0,462	0,610	0,423	0,217
17	0,008	0,014	0,033	0,052	0,127	0,201	0,353	0,569	0,552	0,334	0,091
18	0,008	0,013	0,032	0,083	0,139	0,258	0,435	0,683	0,497	0,245	-
19	0,007	0,013	0,029	0,088	0,178	0,373	0,913	0,695	0,442	0,157	-
20	0,005	0,014	0,036	0,106	0,454	0,627	0,837	0,669	0,386	0,066	-
21	0,005	0,014	0,052	0,249	0,370	0,524	0,712	0,642	0,327	-	-
22	0,005	0,019	0,118	0,194	0,300	0,437	0,603	0,610	0,263	-	-
23	0,005	0,044	0,084	0,150	0,242	0,361	0,505	0,570	0,190	-	-
24	0,013	0,024	0,058	0,115	0,194	0,295	0,418	0,521	0,106	-	-
25	0,010	0,020	0,041	0,088	0,153	0,237	0,339	0,459	0,010	-	-
26	0,002	0,008	0,030	0,067	0,120	0,186	0,268	0,363	-	-	-

Таблиця Б.3

Недеформована площа перетину зрізаемого шару, мм²

Позиція генерації	Радіальна позиція по траєкторії руху зубця, град.										
	180	183	186	189	192	195	198	201	204	207	210
1	0,002	0,006	0,009	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,002	0,006	0,013	0,027	0,014	-	-	-	-	-	-
3	0,001	0,005	0,013	0,026	0,047	0,041	-	-	-	-	-
4	0,001	0,005	0,013	0,026	0,047	0,083	0,058	-	-	-	-
5	0,001	0,005	0,012	0,026	0,048	0,082	0,127	0,004	-	-	-
6	0,001	0,005	0,012	0,025	0,049	0,082	0,127	0,184	-	-	-
7	0,001	0,005	0,012	0,025	0,049	0,081	0,125	0,184	0,051	-	-
8	0,001	0,005	0,012	0,025	0,048	0,080	0,125	0,192	0,273	-	-
9	0,001	0,005	0,012	0,024	0,048	0,080	0,124	0,195	0,272	0,012	-
10	0,001	0,004	0,011	0,025	0,047	0,079	0,125	0,194	0,270	0,327	-
11	0,001	0,004	0,011	0,026	0,047	0,078	0,132	0,193	0,269	0,390	-
12	0,001	0,004	0,011	0,025	0,046	0,078	0,131	0,191	0,287	0,388	0,018
13	0,001	0,004	0,011	0,025	0,046	0,082	0,130	0,194	0,288	0,386	0,290
14	0,001	0,004	0,010	0,024	0,045	0,084	0,129	0,207	0,286	0,322	0,241
15	0,001	0,004	0,011	0,024	0,047	0,083	0,135	0,205	0,301	0,245	0,155
16	0,001	0,004	0,011	0,023	0,049	0,082	0,141	0,217	0,272	0,180	0,084
17	0,001	0,003	0,011	0,023	0,049	0,090	0,145	0,229	0,221	0,125	0,026
18	0,001	0,003	0,010	0,026	0,050	0,092	0,160	0,253	0,177	0,080	-
19	0,001	0,003	0,010	0,025	0,054	0,106	0,215	0,231	0,138	0,042	-
20	0,000	0,003	0,010	0,028	0,075	0,175	0,271	0,194	0,104	0,011	-
21	0,000	0,003	0,012	0,048	0,104	0,146	0,197	0,159	0,074	-	-
22	0,000	0,003	0,022	0,045	0,069	0,099	0,137	0,126	0,048	-	-
23	0,000	0,007	0,016	0,027	0,043	0,064	0,090	0,094	0,027	-	-
24	0,001	0,004	0,008	0,015	0,023	0,037	0,054	0,064	0,010	-	-
25	0,000	0,001	0,003	0,007	0,012	0,019	0,027	0,036	0,000	-	-
26	0,000	0,000	0,001	0,002	0,003	0,006	0,009	0,013	-	-	-