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

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Розширення технологічних можливостей зубообробного центру з ЧПУ шляхом розробки оптимальної компоновки та дослідження умов різання»

Виконав здобувач вищої освіти 2-го року магістратури групи ГМ-24М-3 ОНП «Галузеве машинобудування» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
_____ Ігор СУСЛОВ

Керівник роботи к.т.н., ст. викладач
_____ Антон АПАРАКІН

Рецензент: к.т.н., доцент
_____ Руслан ОСІН

Кропивницький – 2026

Форма № Н-9.01

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

«____» _____ 2026 р.

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

Суслова Ігоря Олександровича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розширення технологічних можливостей зубообробного центру з ЧПУ шляхом розробки оптимальної компоновки та дослідження умов різання

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

3. Строк подання роботи до захисту « » 2026 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: розширення технологічних можливостей зубообробного центру з ЧПУ шляхом розробки оптимальної компоновки верстата.

Завдання:

- визначити джерела виникнення негативних чинників процесу різання методу черв’ячного зубофрезерування;
- розробити проект технології зубообробки із врахуванням розширення технологічних властивостей та покращення умов різання;
- дослідити та порівняти досяжну точність та якість обробленої поверхні в умовах пропонованої технології, із традиційною;
- здійснити синтез компоновки та кінематики зубообробного центру з ЧПУ, яка б задовільнила вимоги розробленої гнучкої технології зубообробки, розробити конструкцію модулів верстату, різального інструменту;
- виконати економічне обґрунтування проекту.

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		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	Березень 2026	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Березень 2026	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Березень-Квітень 2026	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Квітень-Травень 2026	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Травень 2026	вик.
6	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Травень 2026	вик.
7	Графічна частина та оформлення	Травень 2026	вик.

Дата видачі завдання «_____» _____ 2026 р.

Керівник роботи _____ Антон АПАРАКІН
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «____» _____ 2026 р.

Здобувач _____ Ігор СУСЛОВ
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Ігор СУСЛОВ. Розширення технологічних можливостей зубообробного центру з ЧПУ шляхом розробки оптимальної компоновки та дослідження умов різання. Кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: ЦНТУ, 2026. – 84 с. Матеріали презентації 14 аркушів.

Метою роботи є розширення технологічних можливостей зубообробного центру з ЧПУ шляхом розробки оптимальної компоновки верстата.

У кваліфікаційній роботі проаналізовано сучасний стан методу черв'ячного зубофрезерування, виділено основні недоліки методу та запропоновано шляхи їх вирішення. Запропоновано гнучку технологію зубообробки, яка заснована на методах, що позбавлені недоліків традиційної технології. Проведено необхідні економічні розрахунки.

Актуальність. Через складну схему різання черв'ячної фрези процес зубофрезерування, як основний метод нарізання циліндричних зубчастих коліс, досі недостатньо теоретично вивчений. Підходи до його оптимізації не повністю відповідають реальним процесам, а пошуки ефективних варіантів модифікації фрез і схем різання не дають належних результатів. Це свідчить, що зубофрезерування залишається вузьким місцем у виробництві зубчастих коліс, тому робота є актуальною і відповідає вимогам сучасного виробництва.

Наукова новизна. Вперше розглянуто черв'ячну фрезу як інструмент, який вміщує в собі елементи кінематичної пари, ув'язані з елементами різального інструменту, проаналізовано недоліки, які виникають в процесі обробки внаслідок такого зв'язку. Також вперше виконано синтез гнучкої технології зубообробки на основі методів контурного зубофрезерування та зубообробного центру оригінальної компоновки.

Практичне значення. Запропонована гнучка технологія рекомендується для реалізації в умовах дрібносерійного та серійного виробництва, з огляду на скорочення часу на переналагодження обладнання та зменшення номенклатури зуборізного інструменту. Розроблена і обґрунтована компоновочна схема верстата типу зубообробний центр, із визначенням конструкції його окремих модулів, може використовуватися при модернізації наявного обладнання на машинобудівних підприємствах.

Ключові слова: черв'ячне зубофрезерування, шестерня, фреза, технологія, верстат з ЧПУ.

ABSTRACT

Igor SUSLOV. Expanding technological capabilities of a CNC tooth processing center by developing an optimal layout and researching cutting conditions. Master's thesis: CUNTU, 2026. – 84 p. Presentation materials 14 drawings.

The purpose of the work is to expand the technological capabilities of a CNC gear machining center by developing an optimal machine layout.

The qualification thesis analyzes the current state of the gear hobbing method, identifies its main drawbacks, and proposes ways to overcome them. A flexible gear machining technology based on methods free from the disadvantages of traditional technology is proposed. The necessary economic calculations have been performed.

Relevance. Due to the complex cutting scheme of the hob, the gear hobbing process, as the main method for manufacturing cylindrical gears, is still insufficiently studied from a theoretical perspective. Approaches to its optimization do not fully correspond to real processes, and attempts to find effective options for modifying hobs and cutting schemes do not yield adequate results. This indicates that gear hobbing remains a bottleneck in gear production; therefore, the work is relevant and meets the requirements of modern manufacturing.

Scientific novelty. For the first time, the hob is considered as a tool incorporating elements of a kinematic pair interconnected with the elements of the cutting tool, and the disadvantages arising during machining due to this relation are analyzed. Also, for the first time, a synthesis of a flexible gear machining technology based on contour gear hobbing methods and a gear machining center of an original layout has been carried out.

Practical value. The proposed flexible technology is recommended for implementation in small-batch and serial production, considering the reduction of machine setup time and the decrease in the range of gear cutting tools. The developed and substantiated layout scheme of a gear machining center, including the design of its individual modules, can be used for the modernization of existing equipment at machine-building factories.

Key words: gear hobbing, gear, hob, technology, CNC machine.

ЗМІСТ

ВСТУП 7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ ЧЕРВЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ 9
1.1 Історичний розвиток та роль зубообробки у сучасному машинобудуванні 9
1.2 Аналіз методів формоутворення зубчастих поверхонь 10
1.3 Сучасний стан технології черв'ячного зубофрезерування 11
1.4 Сучасні зубофрезерні верстати та системи ЧПУ 17
1.5 Висновки, мета і задачі дослідження 19
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ 21
2.1 Умови зачеплення між черв'ячною фрезою і оброблюваним зубчастим колесом 21
2.2 Дослідження закономірностей процесу зносу черв'ячної фрези 24
2.3 Аналіз геометрії одиничних зрізів 27
2.4 Передумови створення гнучких технологій зубофрезерування 31
2.5 Порівняльний аналіз технологій зубообробки 40
2.6 Висновки та рекомендації 46
РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА 48
3.1 Аналіз і синтез можливих компоновок верстатів для здійснення зубонарізання в умовах контурного зубофрезерування 48
3.2 Кінематика верстата для здійснення обробки в умовах контурного зубофрезерування 56
3.3 Конструкція окремих уніфікованих модулів верстата 61
3.4 Конструктивне виконання інструментів для здійснення контурного зубофрезерування 63
3.5 Висновки та рекомендації 67
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ЧЕРВ'ЯЧНО-КОНТУРНОЇ ФРЕЗИ 68
4.1 Загальні вихідні дані 68
4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва 69
4.3 Визначення собівартості та оптової ціни інструменту 70
4.4 Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки) 73
4.5 Розрахунок показників економічної ефективності 77
4.6 Висновки 79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 81

ВСТУП

Актуальність роботи. Внаслідок складної схеми різання черв’ячної фрези процес зубофрезерування як основний метод нарізання циліндричних зубчастих коліс сьогодні все ще недостатньо вивчено теоретично. Деякі положення, які традиційно приймають для його оптимізації та визначення раціональних параметрів інструментів, не повною мірою відповідають реальними процесам та явищам, а пошуки оптимальних варіантів модифікування черв’ячних фрез та їх схеми різання не забезпечили достатньо ефективного вирішення зазначеної проблеми.

Це свідчить про те, що процес зубофрезерування є вузьким місцем у циклі виготовлення зубчастих коліс. Встановлений на теперішній час компроміс між продуктивністю, затратами на виготовлення зубчастих коліс та їх якістю не відповідає вимогам сучасного виробництва, а модульні черв’ячні фрези стандартних конструкцій використовують на межі їх технічних можливостей.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розширення технологічних можливостей зубообробного центру з ЧПУ шляхом розробки оптимальної компоновки верстата. Для досягнення поставленої **мети** необхідно вирішити наступні **задачі**:

1) визначити джерела виникнення негативних чинників процесу різання методу черв’ячного зубофрезерування;

2) розробити проект технології зубообробки із врахуванням розширення технологічних властивостей та покращення умов різання;

3) дослідити та порівняти досяжну точність та якість обробленої поверхні в умовах пропонованої технології, із традиційною;

4) здійснити синтез компоновки та кінематики зубообробного центру з ЧПУ, яка б задовільнила вимоги розробленої гнучкої технології зубообробки, розробити конструкцію модулів верстату, різального інструменту;

5) виконати економічне обґрунтування проекту.

Об’єкт дослідження – фрези черв'ячні модульні.

Предмет дослідження – процес різання та формоутворення, передумови створення гнучких технологій зубофрезерування.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- вперше розглянуто черв’ячну фрезу як інструмент, який вміщує в собі елементи кінематичної пари, ув’язані з елементами різального інструменту. Проаналізовано недоліки, які виникають в процесі обробки внаслідок такого зв’язку.
- вперше виконано синтез гнучкої технології зубообробки на основі методів контурного зубофрезерування (контурного та черв’ячно-контурного) та зубообробного центру оригінальної компоновки.

Практичне значення роботи:

- запропонована гнучка технологія рекомендована для реалізації в умовах дрібносерійного та серійного виробництва, з огляду на скорочення часу на переналагодження обладнання та зменшення номенклатури зуборізного інструменту;
- розроблена і обґрунтована компоновочна схема верстата типу зубообробний центр, із визначенням конструктивного виконання його окремих модулів, може бути використана при модернізації наявного обладнання на машинобудівних підприємствах.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕХНОЛОГІЇ ЧЕРВ'ЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

1.1 Історичний розвиток та роль зубообробки у сучасному машинобудуванні

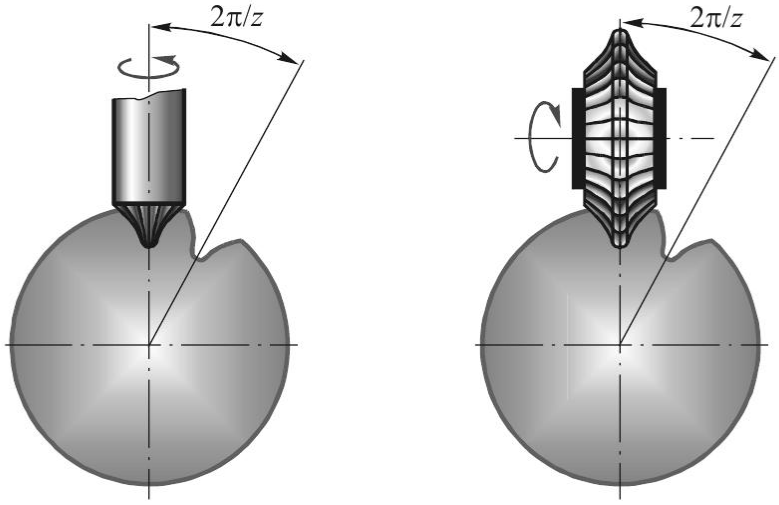
Становлення зубообробної галузі як самостійного та критично важливого напрямку в машинобудуванні відбулося у другій половині XIX століття. Цей період характеризується бурхливим розвитком машинобудування, механіки та створенням передумов для перших автоматизованих засобів виробництва. Історично склалося, що Німеччина, а саме регіон Саксонії, стала центром інновацій. Місто Хемніц перетворилося на осередок верстатобудування, де виникли підприємства, що визначили розвиток галузі на століття вперед: Pfauter, Modul, Niles та Heckert. Ці заводи-піонери розробляли перші конструкції верстатів, які працювали за принципом безперервного обкату, який дозволив радикально підвищити продуктивність порівняно з методами копіювання [5, 9].

У сучасному машинобудуванні виготовлення зубчастих коліс має свою специфіку. Сучасні деталі повинні витримувати значні механічні навантаження або тиски робочої рідини, що вимагає ідеальної точності евольвентного профілю. Сьогодні розвиток технології черв'ячного зубофрезерування спрямований на інтеграцію високошвидкісного різання та використання інноваційних інструментальних матеріалів. Таким чином, історія зубообробки продовжується через впровадження автоматизації та нових фізико-хімічних методів обробки поверхонь.

Точність виготовлення зубчастих передач безпосередньо впливає на коефіцієнт корисної дії машин, рівень шуму та довговічність експлуатації. В умовах глобальної конкуренції виробники прагнуть максимально скоротити технологічний цикл, що ставить перед інженерами завдання оптимізації кожного етапу - від заготовки до фінішної обробки.

1.2 Аналіз методів формоутворення зубчастих поверхонь

Аналіз існуючих методів формоутворення зубчастих поверхонь дозволяє класифікувати їх за принципом роботи інструменту на методи копіювання та методи обкатки [5, 9]. Метод копіювання (рис. 1.1) базується на використанні різального інструменту (дискової або пальцевої фрези), профіль якого повністю відповідає формі западини зубчастого колеса. Це дозволяє виконувати обробку на звичайних фрезерних верстатах, що є перевагою для одиничного виробництва. Однак, суттєві обмеження щодо точності поділу та низька швидкість обробки роблять цей метод малопридатним для серійного виготовлення деталей. Похибки ділильних механізмів та дискретність процесу не дозволяють досягти високої однорідності профілю всіх зубців.



а) б)

Рис. 1.1 Метод копіювання

а) обробка міжзубової западини пальцевою фрезою;
б) обробка міжзубової западини дисковою фрезою.

Метод обкатки (рис. 1.2) є найбільш досконалим та поширеним у сучасному виробництві. Він відтворює роботу реальної зубчастої пари, де інструмент та заготовка здійснюють узгоджене взаємопов’язане обертання.

Найпоширенішим інструментом є черв’ячна фреза. Її перевага полягає у безперервності процесу різання, що забезпечує високу продуктивність. Крім того, метод обкатки дозволяє нарізати колеса з різною кількістю зубців одним і

тим самим інструментом (за умови однакового модуля), що значно спрощує інструментальне господарство підприємства.

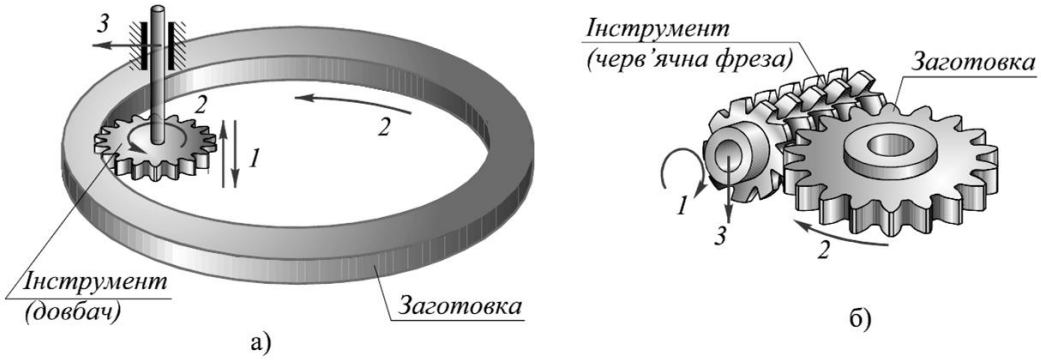


Рис. 1.2 Метод обкату

а) при обробці дисковим довбачем; б) при обробці черв'ячною фрезою.
1 – рух різання; 2 – обкат; 3 – рух подачі інструменту.

Технологічний маршрут на сучасних заводах часто передбачає комбінування методів. Наприклад, попереднє нарізання зубців здійснюється черв'ячною фрезою (чорнова обробка), а фінішне доведення виконується методами шевінгування або зубошліфування. Такий підхід дозволяє оптимізувати витрати: дорогий фінішний інструмент знімає мінімальний припуск, а основний об'єм металу видаляється продуктивною черв'ячною фрезою. Аналіз показує, що розвиток методів обкатки наразі зосереджений на підвищенні швидкостей різання та точності синхронізації рухів верстата. Важливим аспектом є також перехід до сухого фрезерування, що висуває нові вимоги до кінематики та жорсткості обладнання.

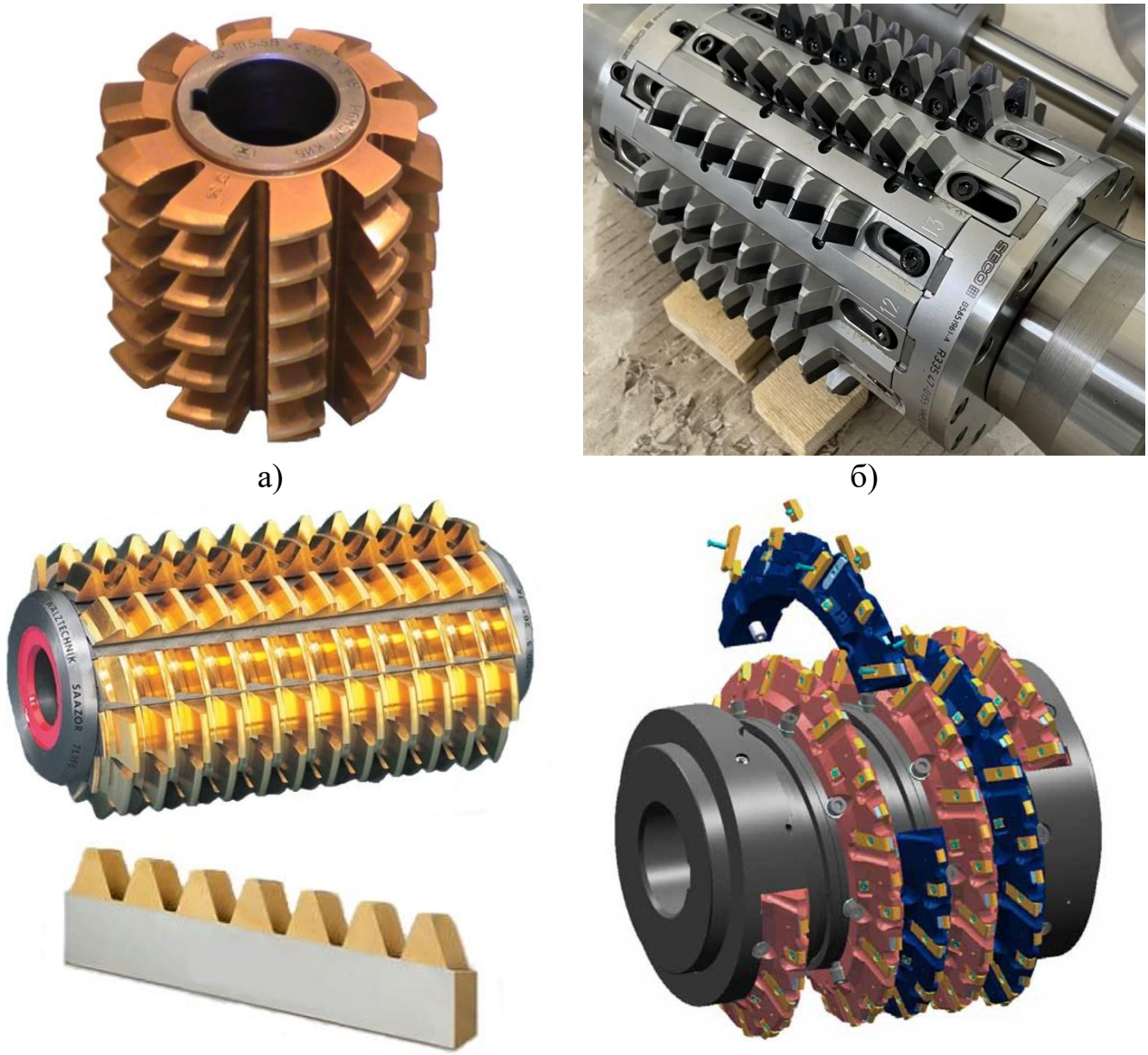
1.3 Сучасний стан технології черв'ячного зубофрезерування

1.3.1 Конструктивні особливості та класифікація черв'ячних фрез

Черв'ячна фреза є одним із найскладніших металорізальних інструментів. Конструктивно вона являє собою черв'як, у якому прорізані стружкові канавки, що формують передню поверхню та різальні кромки зубців. Залежно від конструкції, фрези поділяють на суцільні та збірні (рис. 1.3).

Суцільні фрези виготовляються з цільної заготовки швидкорізальної сталі, вони мають високу жорсткість, але їх вартість зростає разом із

габаритами. Збірні конструкції черв'ячних фрез дозволяють використовувати різні матеріали для корпусу та різальної частини. Різальні елементи у вигляді зубців, рейок або окремих сегментів виготовляються з високолегованих сталей або твердих сплавів і механічно закріплюються в корпусі. Це дає змогу замінювати лише зношені елементи, що дозволяє не лише економити інструментальну сталь, а й значно спрощує технологію виготовлення самого інструменту, підвищує економічну ефективність використання інструменту [12, 21, 26, 27, 33].



а) б)

в) г)

Рис. 1.2 Конструкції черв'ячних модульних фрез

а) суцільнометалева черв'ячна модульна фреза; б) збірна черв'ячна фреза із вставними зубцями; в) збірна черв'ячна фреза із вставними рейками; г) збірна черв'ячна фреза із вставними сегментами, які оснащені універсальними різальними елементами

Фрези класифікуються також за їх точністю (класи ААА, АА, А, В [19, 38]) та за призначенням - для чорнової обробки, під шліфування або для чистового нарізання. Важливою характеристикою геометрії фрези є затилування бічних та вершинних поверхонь зубців. Цей процес забезпечує створення необхідних задніх кутів, які мінімізують тертя інструменту об заготовку. Традиційно черв’ячні фрези мають відносно малі задні кути на бічних кромках (близько 2-4 градусів), що є одним із вузьких місць технології. Сучасні фрези мають модифікований профіль, який дозволяє збільшити ці кути та покращити умови різання. Також активно впроваджуються багатозахідні фрези, які дозволяють нарізати колеса за меншу кількість обертів столу, проте вони вимагають значно вищої жорсткості верстата.

Розглядаючи питання експлуатації, слід звернути увагу на вплив точності виготовлення самої фрези на якість нарізуваного колеса. Навіть незначні похибки кроку витків або радіальне биття інструменту призводять до систематичних помилок у профілі зубців колеса [36]. Тому перевірка параметрів фрези після виготовлення або переточування є обов'язковою процедурою.

1.3.2 Аналіз процесу різання та умов експлуатації інструменту

Процес зубофрезерування характеризується високою динамічністю та складною геометрією взаємодії інструменту з заготовкою. На відміну від звичайного фрезерування, кожен зубець черв’ячної фрези працює в умовах змінних перерізів зрізу. Товщина стружки постійно змінюється протягом одного циклу входу та виходу зубця із зачеплення. Більше того, навантаження розподіляється нерівномірно між різними зубцями фрези, що розташовані на різних витках. Ряд досліджень [10, 15, 16, 35, 37] показує, що найбільше навантаження припадає на центральні зубці фрези, які виконують основну роботу з прорізання западини на повну глибину, рис. 1.3. Периферійні зубці виконують роль попередньої обробки бічними різальними кромками. Така нерівномірність призводить до того, що фреза зношується локально, що

вимагає застосування методів осьового пересування (shift) для введення в роботу нових, гострих ділянок інструменту. Сили різання, зокрема головна складова Fz, залежать від багатьох факторів: модуля, подачі, швидкості різання та властивостей матеріалу заготовки.

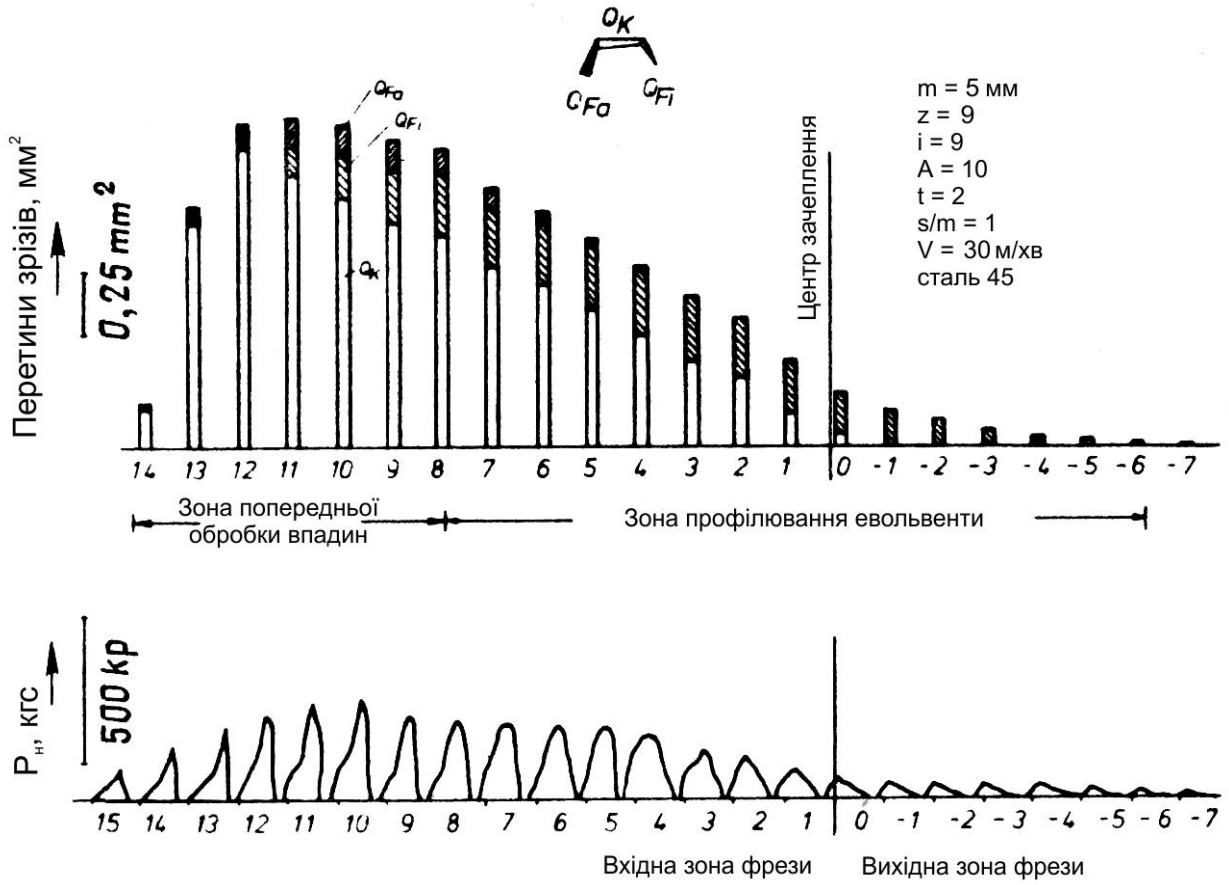


Рис. 1.3 Перетини зрізів, що знімаються окремим зубцем черв'ячної фрези і відповідні їм сили різання.

При обробці сталевих коліс (наприклад, зі сталі 45) спостерігається тенденція до стабілізації сил різання при швидкостях понад 20-30 м/хв. Однак при подальшому зростанні швидкості критичного значення набуває температура в зоні різання. Висока температура призводить до інтенсивної адгезії металу заготовки до інструменту. Для боротьби з цим явищем використовують спеціальні геометрії передньої поверхні, які сприяють кращому відведенню стружки та зниженню тертя. Вплив вібрацій на процес різання також є критичним фактором. Переривчастий характер входу зубців у метал провокує автоколивання технологічної системи "верстат-інструмент-

деталь". Це негативно впливає на чистоту поверхні та стійкість інструменту. Для демпфування вібрацій сучасні верстати мають станини з полімербетону або чавуну з високою демпфуючою здатністю. Крім того, вибір схеми фрезерування (попутне чи зустрічне) дозволяє змінити вектор сил різання та стабілізувати процес. При зустрічному фрезеруванні інструмент намагається відштовхнути деталь, що при наявності люфтів призводить до вібрацій, тоді як попутне фрезерування притискає деталь, забезпечуючи плавнішу роботу. Також необхідно враховувати явище наклепу поверхневого шару. Під час різання матеріал заготовки зазнає значних пластичних деформацій, що призводить до підвищення твердості поверхні. Детальний аналіз фізики процесу різання дозволяє проектувати інструменти з оптимальними передніми та задніми кутами, що забезпечують баланс між міцністю леза та легкістю зрізання шару металу.

1.3.3 Характер зносу та шляхи підвищення стійкості інструменту

Знос черв’ячних фрез є складним процесом, який включає абразивне тертя, адгезію та дифузію матеріалів [11, 13, 14, 31]. Переважним видом зносу для інструментів зі швидкорізальних сталей є знос по задній грані (VB), рис. 1.4. Ширина фаски зносу безпосередньо впливає на геометричну точність нарізаних зубців та шорсткість їх поверхні. Окрім задньої грані, часто спостерігається утворення лунок на передній поверхні, що може призвести до ослаблення різальної кромки та її сколювання.

Шляхи підвищення стійкості інструменту наразі лежать у площині вдосконалення матеріалів та нанесення захисних покриттів. Використання порошкових швидкорізальних сталей (PM-HSS) дозволяє отримати більш дрібнозернисту та однорідну структуру, що підвищує стійкість до циклічних навантажень.

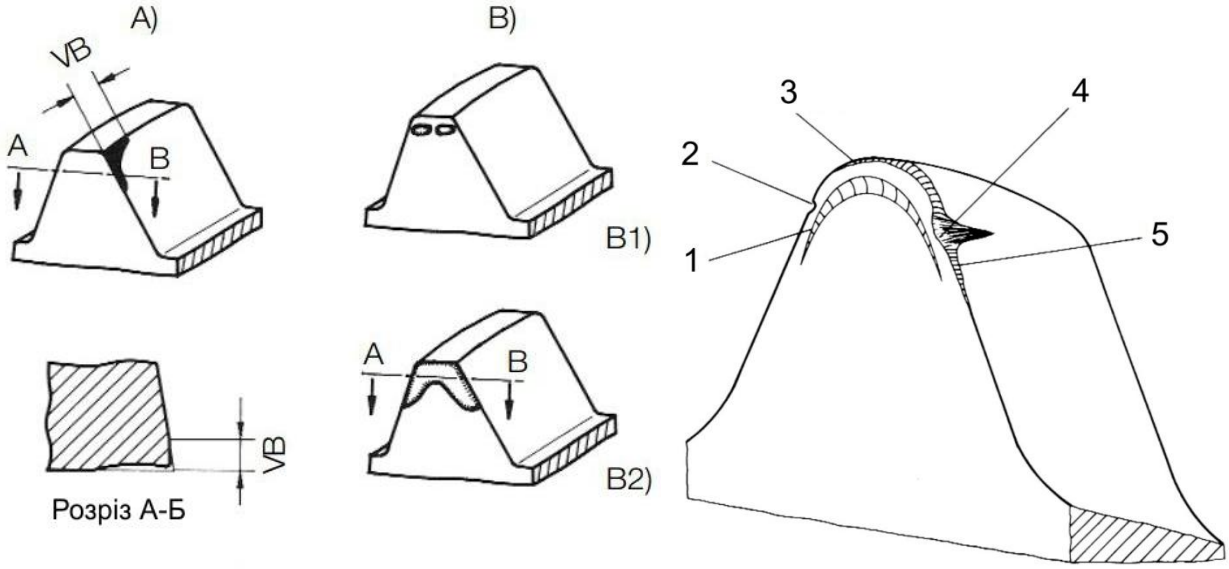


Рис. 1.4 Типовий знос зубця черв'ячної модульної фрези

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

Проте найбільш радикальним методом підвищення ресурсу є нанесення зносостійких покриттів [29, 30, 32] на основі нітридів титану та алюмінію (TiN, TiAlN, AlCrN). Наприклад, покриття AlCrN характеризується надзвичайною термічною стабільністю та здатністю зберігати твердість при температурах понад 1000 градусів Цельсія. Це робить можливим впровадження так званого «сухого» фрезерування [14]. Важливим фактором є також застосування мастильно-охолоджувальних технологій нового покоління, таких як мінімальна кількість змащення (MQL). Замість заливання зони різання великими об’ємами мастила, подається тонкодисперсний масляний туман безпосередньо в точку контакту [28]. Це зменшує тертя без різкого охолодження інструменту, що запобігає появі термічних тріщин. Аналіз зносу показує, що правильний вибір стратегії пересування фрези (shift) дозволяє збільшити сумарний пробіг інструменту між переточками на 30-50%. Узагальнюючи, підвищення стійкості - це комплексне завдання, яке включає вибір матеріалу, розробку покриття, оптимізацію режимів та правильний догляд за інструментом у процесі виробництва.

1.4 Сучасні зубофрезерні верстати та системи ЧПУ

Сучасний стан зубообробного обладнання визначається переходом від жорстких механічних зв’язків до гнучкого програмного управління. Традиційні зубофрезерні верстати базувалися на складних кінематичних ланцюгах, де зв’язок між фрезою та столом забезпечувався через гітари змінних зубчастих коліс. Такі верстати потребували тривалого часу на налаштування та мали обмежені можливості щодо корекції профілю. Сучасні верстати з числовим програмним управлінням (ЧПУ), рис. 1.5, працюють за принципом «електронної гітари». Це означає, що кожен виконавчий орган верстата (шпиндель інструменту, обертання столу, поздовжня та радіальна подачі) має власний сервопривод, а їх синхронізація здійснюється програмно. Провідні виробники, такі як Gleason, Liebherr, пропонують центри, що забезпечують точність за 4-5 класом [20, 25].

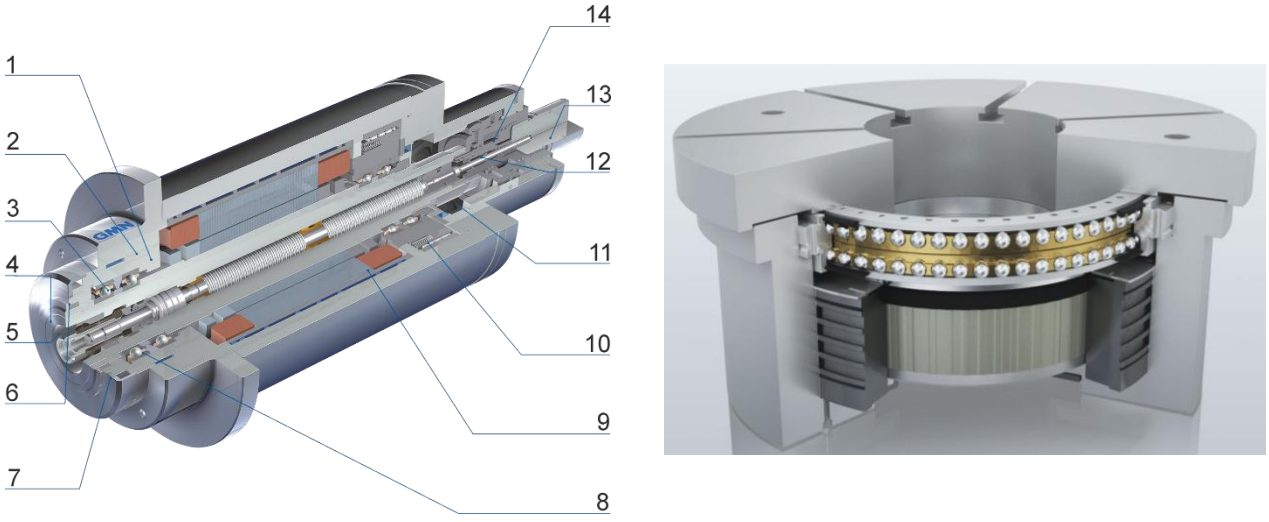


Рис. 1.5 Сучасний зубофрезерний верстат з ЧПУ.

Особливістю сучасних ЧПУ верстатів є висока жорсткість та динамічна стійкість, система ЧПУ також бере на себе завдання компенсації температурних деформацій вузлів верстата, що виникають під час тривалої роботи. Крім того, інтегровані системи моніторингу дозволяють верстату автоматично коригувати режими різання залежно від стану інструменту.

Застосування лінійних двигунів та прямих приводів дозволяє позбутися механічних люфтів, що критично важливо для прецизійної зубообробки. Все більше в конструкції верстатів починає з’являтися риса модульності - окремими вузлами почали розроблятися уніфіковані мехатронні верстатні модулі з прямим приводом, зокрема інструментальні шпінделі [23, 40] та шпінделі заготовки [22, 34, 39].

Приклад типової конструкції шпінделя з прямим приводом показано на рис. 1.6, а. Шпіндель позбавлений кінематичних ланцюгів, статор електродвигуна монтується у корпусі, а ротор фактично і являється шпінделем інструмента. Виріб має датчики, інформація з яких надходить до системи ЧПУ верстата і служить для адаптації до умов різання.



а) б)

Рис. 1.6 Фрезерний шпіндель (а) та поворотний стіл (б) із прямим приводом

1 – демпфер; 2 – датчик вібрації; 3 – прецизійні шпіндельні підшипники; 4 – контактний датчик інструментальної оправки і шпінделя; 5 – очищувач конусу інструменту; 6 – захист від забруднень; 7 – датчик вісевого зазору; 8 – датчик температури; 9 – прямий привод (ротор і статор); 10 – система адаптивного переднатягу підшипників; 11 – енкодер; 12 – датчик затиску інструменту; 13 – блок системи змащування; 14 – система розтиску інструменту.

По аналогії з фрезерним шпінделем, шпіндель заготовки також виконується по схемі прямого приводу, як показано на рис. 1.6, б [34]. У конструкції відсутня традиційна для зубофрезерних верстатів черв’ячна ділильна передача, яка являлась перепоною для забезпечення високих швидкостей обертання, що підтримуються сучасними інструментами.

Програмне забезпечення сучасних верстатів має інтуїтивно зрозумілі інтерфейси, де оператор лише вводить параметри колеса, а система самостійно генерує оптимальну траєкторію руху та режими різання. Також сучасні верстати дозволяють реалізовувати складні види обробки, такі як бочкоподібна або конусна модифікація зубців. У перспективі розвиток верстатобудування піде шляхом створення інтелектуальних систем (Smart Machines), які за допомогою датчиків вібрації та струму будуть передбачати поломку інструменту ще до її настання.

1.5 Висновки, мета і задачі дослідження

Сучасна технологія черв’ячного зубофрезерування все ще залишається найбільш універсальним та продуктивним способом виготовлення зубчастих коліс у широкому діапазоні модулів. Проте, вона стикається з обмеженнями, які продиктовані стійкістю інструменту, складністю кінематики процесу та складними умовами різання. Ці негативні чинники мають значний вплив на точність та якість обробки, на ресурс інструменту. До способів підвищення різальних властивостей та стійкості черв’ячних фрез, які застосовуються, є перехід на сучасні інструментальні матеріали, використання зносостійких покриттів та розробка прогресивних конструкцій (навіть з змінними різальними елементами), що дозволяють підвищити швидкість обробки та стійкість фрез у кілька разів.

Описані в розділі недоліки черв’ячного зубофрезерування гальмують розвиток верстатних систем. Технологічне відставання в питаннях удосконалення схеми різання черв’ячного зубофрезерування (яка є головним джерелом недоліків методу) [1], дещо нівелюється впровадженням

зубофрезерних верстатів із ЧПУ, які забезпечують незначну гнучкість виробництва та дозволяють відмовитися від складних механічних налаштувань.

Сучасний розвиток верстатних мехатронних систем та модульність вузлів створюють підґрунтя для розширення технологічних можливостей верстатів, та дають змогу відійти від традиційних компоновок та схем формоутворення [3].

Метою досліджень кваліфікаційної роботи є розширення технологічних можливостей зубообробного центру з ЧПУ шляхом розробки оптимальної компоновки верстата.

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

1) визначити джерела виникнення негативних чинників процесу різання методу черв’ячного зубофрезерування;

2) розробити проект технології зубообробки із врахуванням розширення технологічних властивостей та покращення умов різання;

3) дослідити та порівняти досяжну точність та якість обробленої поверхні в умовах пропонованої технології, із традиційною;

4) здійснити синтез компоновки та кінематики зубообробного центру з ЧПУ, яка б задовільнила вимоги розробленої гнучкої технології зубообробки, розробити конструкцію модулів верстату, різального інструменту;

5) виконати економічне обґрунтування проекту.

РОЗДІЛ 2
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ

Ефективність черв’ячного зубофрезерування суттєво обмежена специфічною кінематикою зачеплення, що провокує виникнення низки деструктивних явищ у зоні різання. Складні умови взаємодії інструмента з колесом зумовлюють нерівномірне навантаження на різальні кромки, що стає головною причиною інтенсивного спрацювання фрези та погіршення якості обробленої поверхні.

У розділі досліджуються причини виникнення негативних чинників в процесі різання черв’ячною фрезою, наслідки цих чинників, та запропоноване рішення, яке дозволить нівелювати їх вплив і розширити технологічні можливості механічної обробки.

2.1 Умови зачеплення між черв’ячною фрезою і оброблюваним зубчастим колесом

У роботі [35] зона контакту між фрезою і колесом розділяється на дві частини - вхідну і вихідну зони, що розділяються центральним зубцем фрези. Розрізняється також профілююча зона і зона попередньої прорізки западини. Центральним зубцем фрези є той, який лежить на міжвісевому перпендикулярі фрези і колеса. Тим самим центральний зубець розташовується в середині профілюючої зони. Довжина зони попередньої прорізки западини залежить від конструкції фрези: у фрез циліндричного виконання вона довша, ніж у фрез, які мають конусну або криволінійну заборну частину.

Для того, щоб мати можливість розрахувати довжини дуг зрізів і товщини зрізів необхідно точно визначити криву перетину фрези з колесом. При взаємному проникненні фрези і колеса крива їх перетину являє собою еліпс. Положення цього еліпса залежить від кута схрещування обох осей. Крім того, форма еліпса визначається співвідношенням розмірів черв’ячної фрези і колеса. При цьому справжня фігура еліпса, оскільки він утворюється на циліндричній

бічній поверхні, не має істотного значення. Для оцінки правильної установки фрези на верстаті істотно важлива проекція цього еліпса перетину на площину, паралельну вісі фрези.

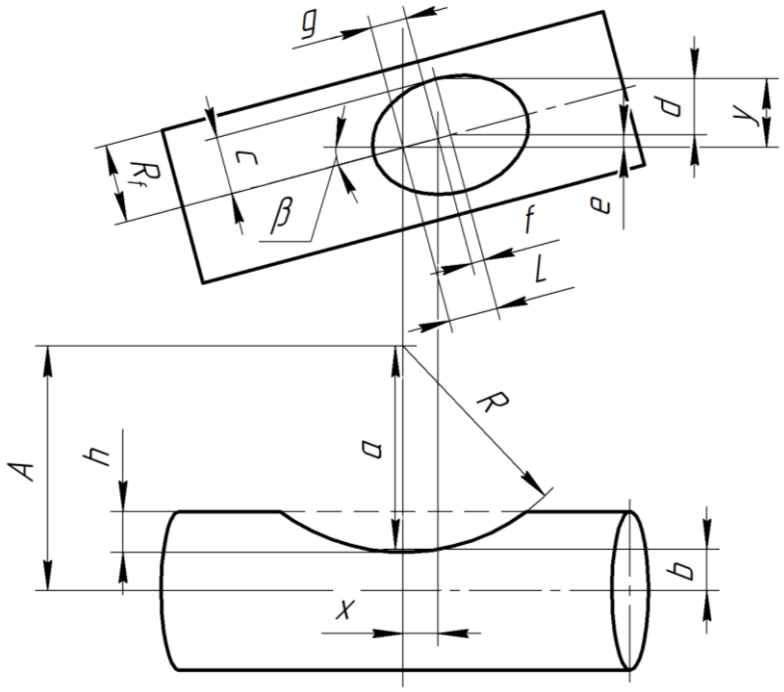


Рис. 2.1 Крива перетину фрези і колеса

R_F - радіус фрези; h - глибина фрезерування; R - зовнішній радіус колеса;
β_o - кут нахилу зубців колеса; γ_m - кут підйому гвинтової лінії фрези.

Отримати графічну картину положень фрези можна за допомогою змінної X, якщо повести розрахунок для відповідних вихідних даних. Якщо прийняти позначення, наведені на рис. 2.1, то криву перетину можна розрахувати за наступними формулами:

$$\beta = \beta_o - \gamma_m;$$

$$A = R_F - h + R;$$

$$a = R \cdot \sqrt[2]{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2};$$

$$b = A - R \cdot \sqrt[2]{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2};$$

$$c = R_F \cdot \sqrt[2]{1 - \left(\frac{A - R \cdot \sqrt[2]{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}}{R_F} \right)^2};$$

$$d = R_F \cdot \sqrt[2]{1 - \left(\frac{A - R \cdot \sqrt[2]{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}}{R_F} \right)^2} \cdot \frac{1}{\cos\beta};$$

$$e = x \cdot \tan\beta;$$

$$f = R_F \cdot \sqrt[2]{1 - \left(\frac{A - R \cdot \sqrt[2]{1 - \left(\frac{x}{R}\right)^2}}{R_F} \right)^2} \cdot \tan\beta;$$

$$g = \frac{x}{\cos\beta};$$

$$y = d + e;$$

$$L = f + g.$$

На еліпсі перетину для ординати Y мається максимальне значення. Проекція цього значення на вісь фрези дає зону врізання для зустрічного фрезерування. Якщо слідувати по кривій перетину за точку Y - Max, до точки, в якій значення Y = Y - Max мінус величина подачі на оберт колеса (рис. 2.2), то отримане значення для Y дозволяє визначити зону врізання для попутного фрезерування. Проекція цього значення Y на вісь фрези і відповідає цій зоні врізання.

При розгляді таким же чином кривої перетину для фрези, що має на вхідній стороні забірний конус, виявляється, що довжина її вхідної частини різко зменшується у порівнянні з цією довжиною для циліндричної фрези, особливо при нарізанні коліс великих модулів. У цьому випадку слід дуже ретельно вибирати форму і кут забірної частини фрези відповідно до умов, щоб уникнути перевантаження зубів забірної частини і їх передчасного зносу. На

основі знання положення черв'ячної фрези на зубофрезерному верстаті можна систематично досліджувати знос фрези.

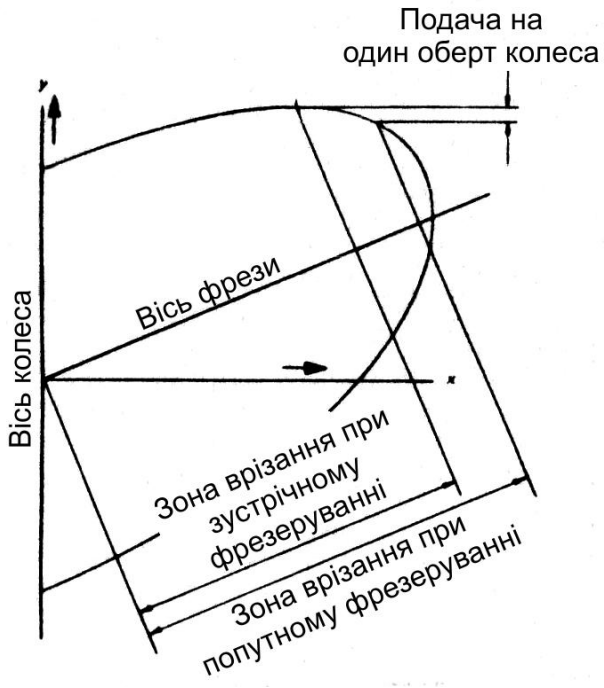


Рис. 2.2 Крива перетину фрези і колеса.

2.2 Дослідження закономірностей процесу зносу черв’ячної фрези

При замірах зносу на зубці черв'ячної фрези розрізняють знос по вершинній кромці B_K, знос по вихідній кромці зубця B_Z і знос по вхідний кромці B_A. В якості вихідної бічної кромки зубця фрези розглядається та, яка оброблює вихідну сторону профілю зубця колеса. Вхідною кромкою зубця фрези є та, яка оброблює вхідну сторону профілю зубця колеса. При зіставленні розподілу зносу по зубцям фрез, що працювали попутним і зустрічним методом, яке зроблено на рис. 2.3, збережено однаковий напрям обертання колеса й обертання фрези в обох випадках.

В результаті цього на кривій зносу центральний зубець (позначений нулем) знаходиться на діаграмі для попутного фрезерування праворуч, а для зустрічного - зліва. З наведених на рис. 2.3 графіків видно, що при попутному фрезеруванні бере участь у різанні більше число зубів, ніж при зустрічному. Навантаження на вершинні кромки при зустрічному фрезеруванні трохи вище, ніж при попутному, що пояснюється меншим числом зубців, що беруть участь

у роботі. Навантаження і тим самим знос при попутному фрезеруванні є найбільшими по вихідній стороні зубця фрези. Це особливо помітно на зубцях фрези, що здійснюють попередню прорізку западини і утворюють найбільшу довжину дуги зрізу.

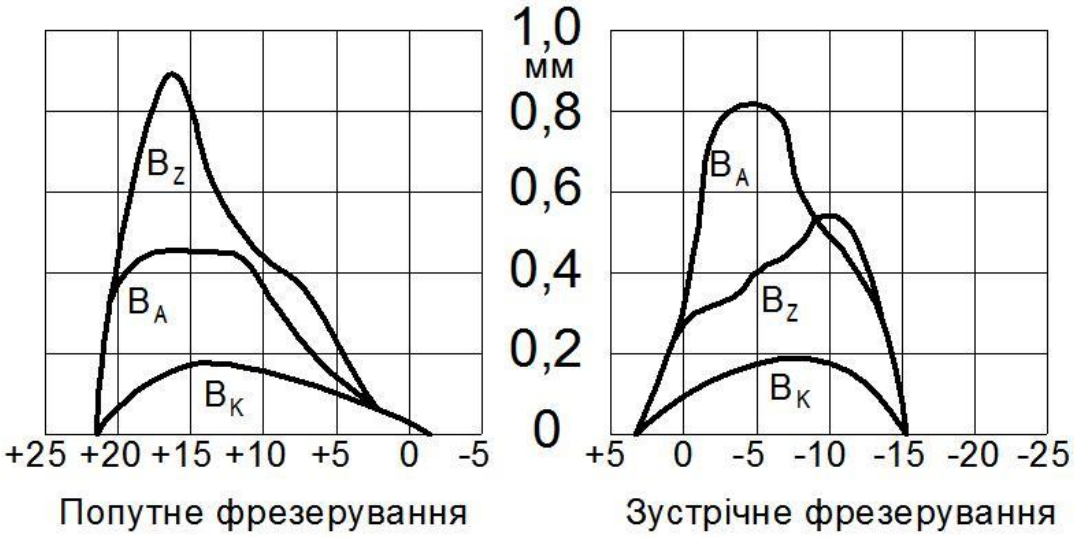


Рис.2.3. - Розподіл зносу по зубам черв'ячної фрези:

B_K - ширина стрічки зносу по вершинним кромкам; B_A - ширина стрічки зносу по вхідній стороні бокової різальної кромки; B_Z - ширина стрічки зносу по вихідній стороні бокової різальної кромки.

Найбільше навантаження при зустрічному фрезеруванні припадає на вхідні кромки зубців фрези. У цьому випадку навіть в зоні профілювання має місце ще значний знос. Це пояснюється тим, що при зустрічному фрезеруванні навіть в зоні профілювання мають місце відносно довгі дуги зрізів. Таким чином, при попутному фрезеруванні робоча зона розташовується на вхідній стороні фрези, а при зустрічному фрезеруванні на її вихідній стороні. Наведені на графіках на рис. 2.3 криві зносу можна пояснити і в такий спосіб: при попутному фрезеруванні задній бічний кут на зовнішній (вихідний) кромці зуба фрези менше, ніж на внутрішній (вхідний), внаслідок чого максимальний знос виникає саме на зовнішній кромці зубця B_Z. Це пояснення, однак, не придатне для зустрічного фрезерування. Боковий знос виникає і в цьому випадку на зовнішній кромці зубця фрези, але при цьому вона має більший бічний задній кут. Внаслідок цього вплив величини ефективного бічного заднього кута можна визнати єдиною причиною виникнення бічного зносу на профілі зубця.

Особливий інтерес представляє вплив елементів режиму різання на знос інструменту. На рис. 2.4, а представлено розподіл зносу (ширини стрічки зносу В по задній поверхні) по зубцям черв'ячної фрези при величині подачі в якості параметра, а на рис. 2.4, б поле максимальних зносів у вигляді функції подачі. При малих подачах товщини зрізів і сили різання невеликі, але велике число врізань фрези, необхідних для зняття деякого обсягу стружки. При збільшених подачах зростають товщини зрізів і тим самим навантаження на ріжучі кромки і температура різання, але зменшується число врізань. Порівнюючи середній знос при різних подачах, можна прийти до висновку, що зростання зносу зі збільшенням подачі настільки незначне, що воно далеко перекривається отриманими в результаті цього вигодами від зниження машинного часу обробки. З цього можна зробити висновок, що в дослідженому інтервалі збільшення подачі обмежується не зносом, а якістю оброблених профілів зубів, зокрема, виникаючими на них слідами подачі. На відміну від подачі швидкість різання робить на знос великий вплив, який буде детальніше розглянуто далі.

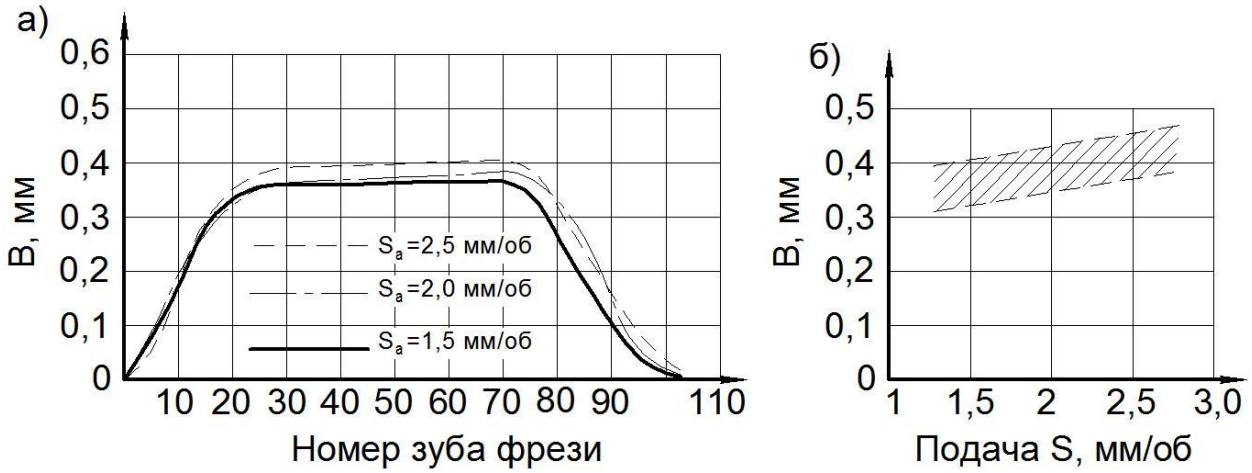


Рис. 2.4 Залежність величини зносу від вісевої подачі

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

Аналізуючи фактори, що зумовлюють знос черв’ячної фрези, доцільно об’єднати їх у дві ключові групи:

1. геометрія зачеплення**:** визначає кінематику контакту, довжину та товщину зрізів, що припадають на окрему кромку. Сюди належать

параметри інструмента (діаметр, число заходів і рейок), характеристики колеса (модуль, кут нахилу, зміщення профілю) та глибина різання.

2. технологічне середовище: параметри режиму обробки (крок осьових пересувок фрези S_H, осьова подача S і швидкість різання V, а також глибина різання a.), фізико-механічні властивості матеріалів, стан обладнання, схема фрезерування (попутна/зустрічна) та умови охолодження (МОР).

Така класифікація дозволяє звести розрізнені конструктивні особливості до єдиного показника – питомого навантаження на різальну кромку.

2.3 Аналіз геометрії одиничних зрізів

Складна кінематика процесу зубофрезерування зумовлює значні труднощі в моделюванні, оскільки кожна западина шестерні формується шляхом послідовного проникнення зубців інструменту в заготовку в окремих твірних положеннях. Для дослідження процесів зубофрезерування набув поширення метод [10, 14, 16, 18, 24, 35, 37], що дозволяє точно визначити геометрію окремих зрізів, що знімаються зубцем черв'ячної фрези. Для цієї мети досліджується утворення стружки в різних січних площинах (рис.2.5, в) при проходженні по оброблюваній западині заготовки. Чисельні значення товщини зрізу, представлені графічно на рис. 2.5, б. Отримані графічні зображення перетинів зрізів для всіх січних площин і для всіх що беруть участь в роботі зубців фрези, дають повну картину розмірів перерізів і форми зрізів при зубофрезеруванні.

На основі цих даних можна також отримати уявлення про ступінь навантаження окремих зубців черв'ячної фрези і окремих ділянок різальних кромок одного зубця. При моделюванні різних процесів зубофрезерування, як наприклад, зустрічне або попутне фрезерування, виходять різні розміри перерізів і різні форми зрізів. Цей розрахунковий метод визначення геометрії зрізів підтверджує те, що найбільший знос по бічних крайках відбувається на переходах від вершинної кромки до бічних, де навантаження відносно невеликі.

Найбільша ширина стрічки зносу по задній поверхні спостерігається по куточках нижче вершинної кромки, де майже відсутнє різання, що дозволяє зробити висновок про відсутність прямої залежності між товщиною зрізу і зносом ріжучої кромки зубця фрези.

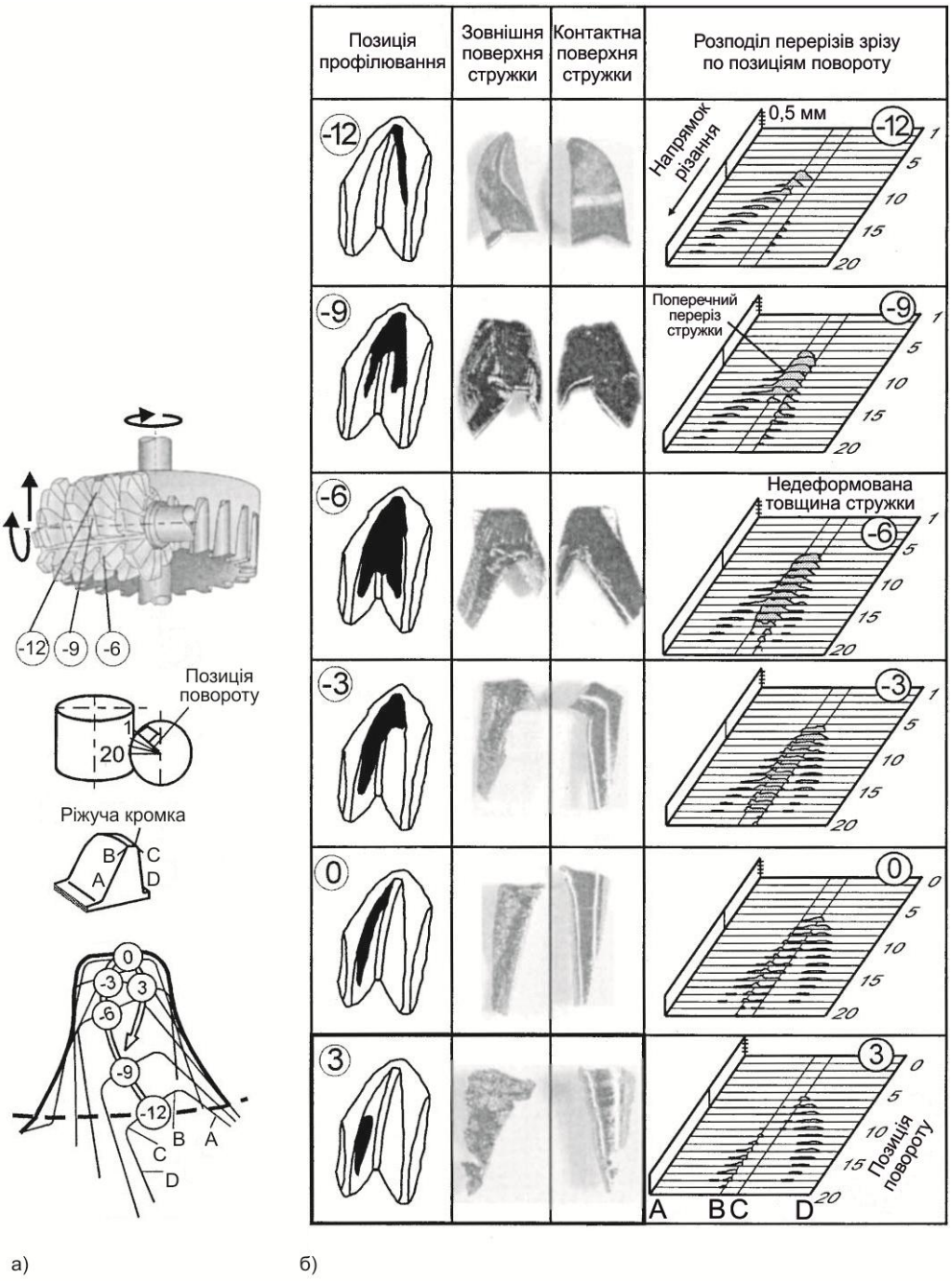


Рис. 2.5 Схема формоутворення (а) і типові стружки на різних твірних позиціях інструменту (б) при зубофрезеруванні, а також відповідні аналітично визначенні поперечні перерізи стружки.

Процес формування стружки суттєво різниться залежно від того, чи працює інструмент у зоні врізання, повного різу чи на виході. У зонах повного різу (11-те та 12-те твірні положення) стружка досягає своїх максимальних габаритів, тоді як в інших позиціях формуються лише її частини, рис. 2.6. Важливим фактором впливу є співвідношення ширини зубчастого колеса b та довжини врізання q (рис. 2.7). Якщо ширина шестерні менша за довжину врізання, виникає специфічна перехідна зона, де стружка завжди залишається частиною повного різу. Ці геометричні параметри безпосередньо впливають на характер зносу фрези, проте прямої залежності між товщиною зрізу та інтенсивністю стирання часто немає. Зокрема, найбільший знос спостерігається на переходах від вершинної кромки до бічних, навіть якщо навантаження там відносно невеликі.

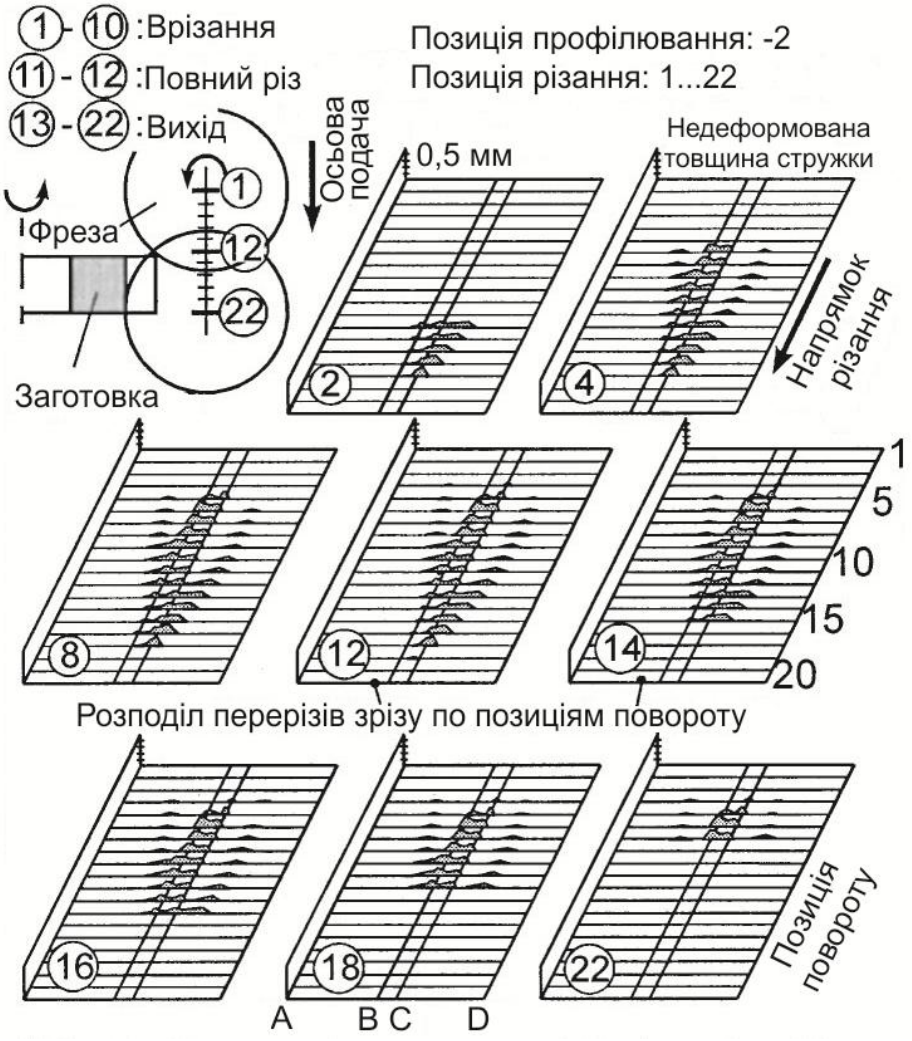


Рис. 2.6 Поперечні перерізи недеформованих стружок в зоні врізання, повному різі і виході або перехідній позиції різання при зубофрезеруванні.

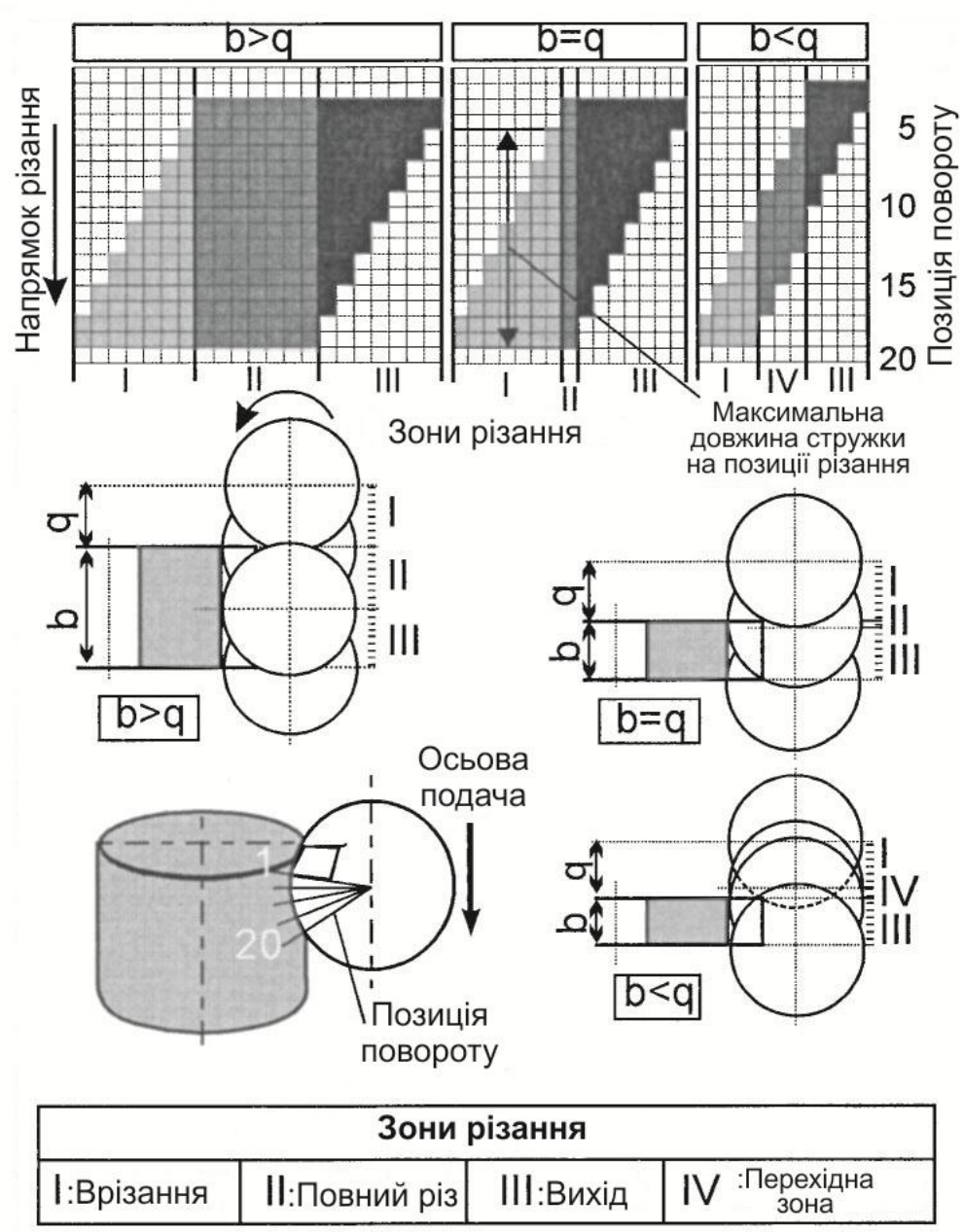


Рис. 2.7 Довжина недеформованої стружки L в різних зонах при обробці в твірних позиціях, в залежності від ширини шестерні.

Особливу роль у працездатності інструменту відіграють умови сходу стружки [11]. На початковій стадії, поблизу вершини зуба, стружка вільно завивається, проте згодом через тісноту в западині вона починає відкидатися до вихідної сторони профілю, де може приварюватися. Під час повороту колеса стружка переміщується по передній поверхні, створюючи зусилля розтягу, що викликає викрашування твердосплавного інструменту або появу характерного канавочного зносу у фрез із швидкорізальної сталі.

Для оптимізації процесу та боротьби зі зносом використовують різні стратегії, зокрема попутне чи різнонаправлене фрезерування [35]. Останнє вважається ефективним засобом проти бокового зносу, хоча воно може супроводжуватися вібраціями та появою слідів дроблення на профілі через коливання в кінематичному ланцюгу верстата. Загалом, розуміння взаємодії між геометрією зрізу та динамікою сходу стружки дозволяє краще прогнозувати ресурс інструменту та обирати найбільш раціональні режими обробки.

2.4 Передумови створення гнучких технологій зубофрезерування

З метою підвищення ефективності процесу механічної обробки зубчастих коліс та розширення технологічних можливостей зубообробних центрів з ЧПУ, пропонується використовувати методи лезової обробки, які позбавлені недоліків традиційного методу [1]. Зокрема, доцільно виконувати різання в умовах одиничного ділення, для зниження негативного впливу сил різання (р. 1.3.2), умов стружкоутворення (р. 2.3) на сумарну похибку. Для збереження рівня продуктивності, припустиме використання методів неперервного обкату, але в умовах вільного стружко утворення.

Числове програмне керування в зубообробних верстатах почало використовуватися пізніше, ніж в інших групах верстатів [2]. Це пояснюється, з одного боку, тим, що в більшості випадків вони працюють в умовах серійного і масового виробництва, а з іншого, - тим, що складним виявилося створення приводів і систем керування, що забезпечують необхідну точність узгодження і зміни швидкостей взаємопов'язаних обертових і поступальних рухів робочих органів. Однак сучасний стан розвитку програмних засобів ЧПУ здатен забезпечити управління і регулювання індивідуальних приводів виконавчих органів, що беруть участь у взаємозалежних складних виконавчих рухах. Таким чином, відпадає необхідність у жорстких механічних зв'язках (кінематичних ланцюгах з зубчастими передачами) та налаштування швидкостей взаємопов'язаних рухів за допомогою гітар змінних зубчастих коліс.

Налаштування зубообробних верстатів з ЧПУ здійснюється зміною програми, істотно спрощується і вимагає мінімального часу. Також спрощується і механічна частина (кінематика) верстата; в ній залишаються тільки передачі, необхідні для конструктивної компонування відповідних приводів, тобто для зв'язку двигунів з відповідними виконавчими робочими органами.

Отже, основні принципи створення гнучкої технології зубообробки:

- максимальне спрощення інструменту.
- можливість максимального спрощення кінематики верстата.
- зосередження в єдиному виробничому просторі повної обробки поверхонь (чорнових, чистових).
- поділ кінематичних ланцюгів верстата працюючих при чорновій і чистовій обробках.
- швидкий перехід на обробку інших деталей шляхом зміни управляючих програм, оснащення та інструменту.

2.4.1 Метод попереднього прорізання западин

З метою виокремлення етапу чорнової обробки зубчастого колеса та реалізації його згідно принципів гнучкої технології зубообробки, пропонується метод попереднього прорізання западин дисковими фрезами [1].

Схема попереднього прорізання западин представлена на рис. 2.8. Обробка ведеться комплектом дискових фрез, в умовах вільного стружкоутворення (рис. 2.8, б). Враховуючи конструктивне виконання фрез, вони можуть бути оснащені пластинками з матеріалів, працюючих на високих швидкостях різання (до 200 м/хв).

Схема припуску при такому попередньому прорізанні показана на рис. 2.9. Представлена схема припуску є раціональною для наступної чистової обробки, так як дно впадини зуба, де з’являються найбільш скрутні умови стружкоутворення, оброблене остаточно.

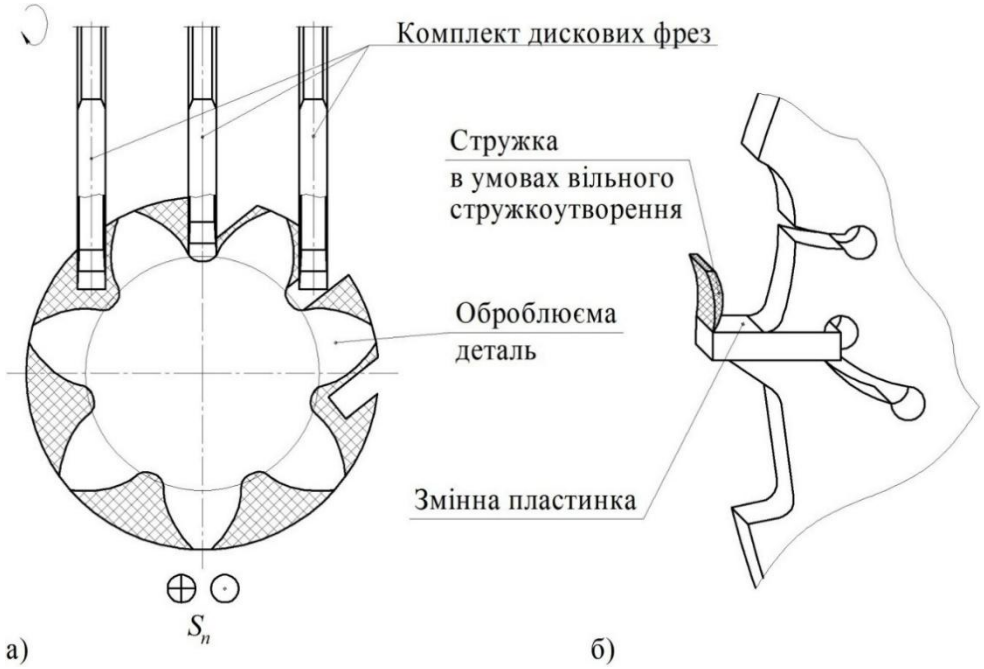


Рис. 2.8 Схема попереднього прорізання зубців

а) схема прорізання; б) фрагмент дискової фрези.

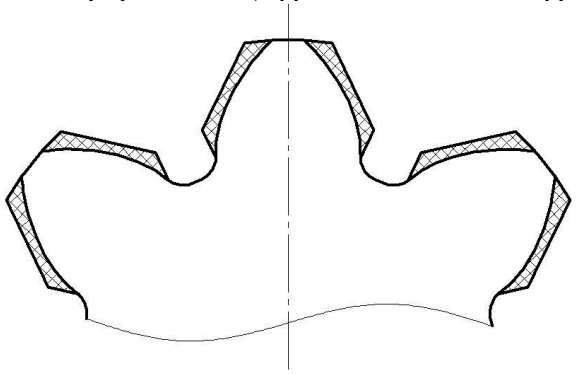


Рис. 2.9 Схема припуску, що залишається на чистовий прохід.

2.4.2 Метод кінематично-контурного зубофрезерування

Особливості запропонованого способу обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс [7] пояснюються графічними зображеннями.

На рис. 2.10 зображено оброблюване циліндричне зубчасте колесо 1, з припуском на чистову обробку 2.

Пропонований спосіб реалізується інструментом 3 за умови, що формоутворююча різальна кромка 4 інструмента знаходиться на продовженні радіусів кривизни 7 номінального евольвентного профілю 6 зубців оброблюваного колеса так, що її початкова точка 5 описує при русі формоутворення обумовлений номінальний евольвентний профіль зубця.

На рис. 2.11 зображено формоутворюючі рухи обкату циліндричного зубчастого колеса при обробці.

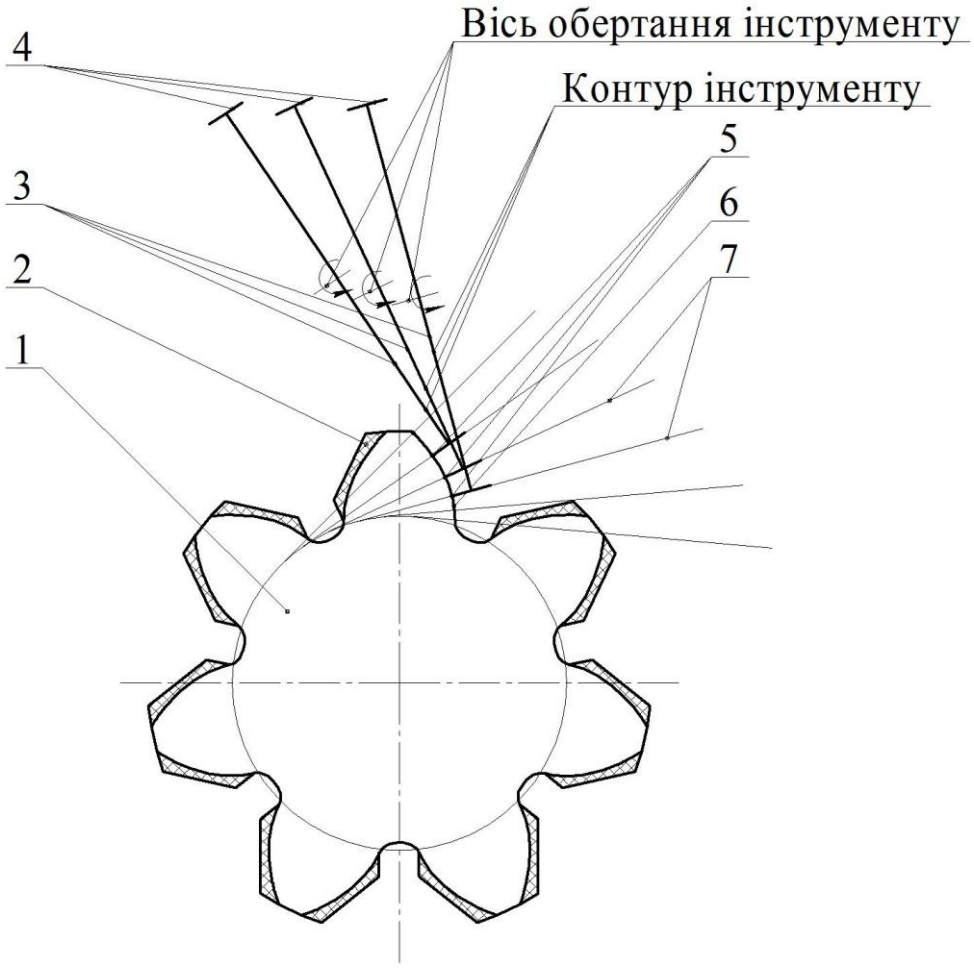


Рис. 2.10 Схема утворення евольвентного профілю оброблюваної деталі

1 - оброблюване циліндричне зубчасте колесо; 2 - припуск на чистову обробку;
3 – інструмент; 4 - формоутворююча ріжуча кромка інструменту;
5 - початкова точка формоутворюючої ріжучої кромки інструмента;
6 - номінальний евольвентний профіль зубця; 7 - продовження радіусів кривизни евольвентного профілю.

Деталь здійснює формоутворюючий рух обкату, що складається з двох рухів, а саме: кочення без проковзування основного циліндра 2 по площині 1, дотичній до неї та обертання навколо власної осі. В той же час, формоутворюючий рух обкату являється періодичним, з повторенням його при переміщенні інструменту повздовж деталі на величину повздовжньої подачі, та повторюваним на кожному знову оброблюваному однойменному евольвентному профілю зубця циліндричного зубчастого колеса. Утворення номінального евольвентного профілю 6 здійснюється сімейством окружностей

5, які повторюють траєкторію руху обумовленої різальної кромки, дотичних до оброблюваної поверхні 3 і утворюючих номінальний евольвентний профіль 6 в перерізі зубця, який співпадає з площиною діаметрального перерізу, яку утворюють вісі 4 обумовлених кіл.

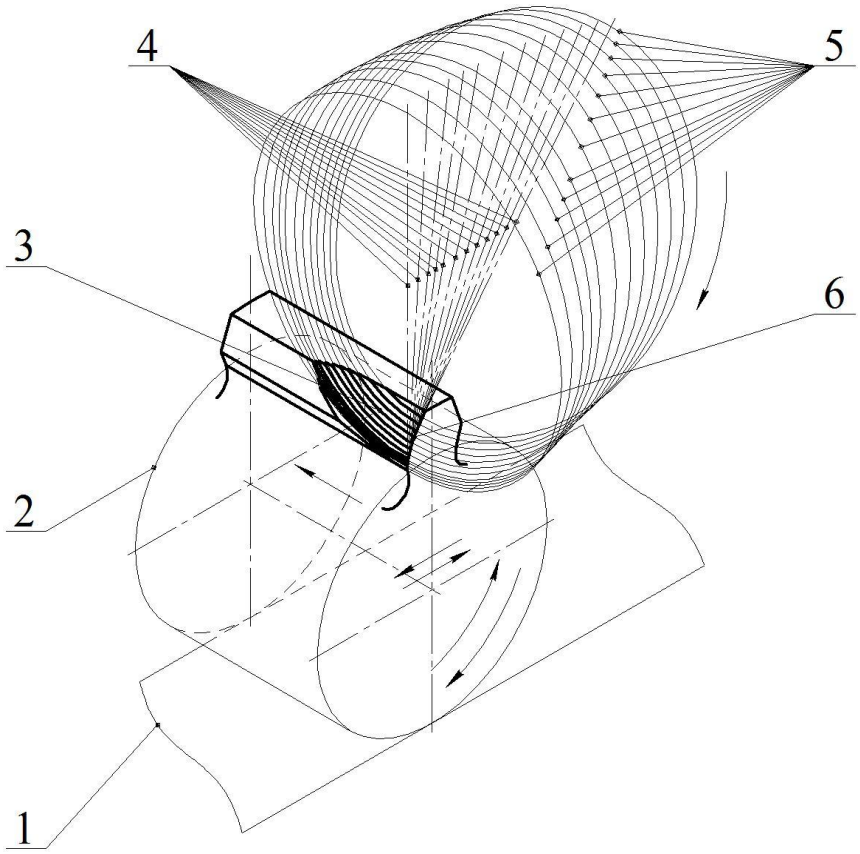


Рис. 2.11 Схема формоутворюючих рухів

1 - дотична до основного циліндра площина; 2 - основний циліндр оброблюваного зубчастого колеса; 3 - оброблювана поверхня; 4 - сімейство осей, які утворюють площину діаметрального перерізу; 5 - сімейство окружностей, які повторюють траєкторію руху обумовленої різальної кромки, дотичних до оброблюваної поверхні; 6 - номінальний евольвентний профіль зуба.

На рис. 2.12 зображено поворот циліндричного зубчастого колеса на один кутовий крок для обробки евольвентної поверхні зубця.

Обробка евольвентних поверхонь здійснюється при повороті зубчастого колеса на один кутовий крок φ по дузі основної окружності 2, одночасно з обкатом без ковзання обумовленої основної окружності 2 в положення 3 по прямій 1, дотичній їй, на величину лінійного кроку l рівного обумовленому кутовому l', тобто:

$$l = l'$$

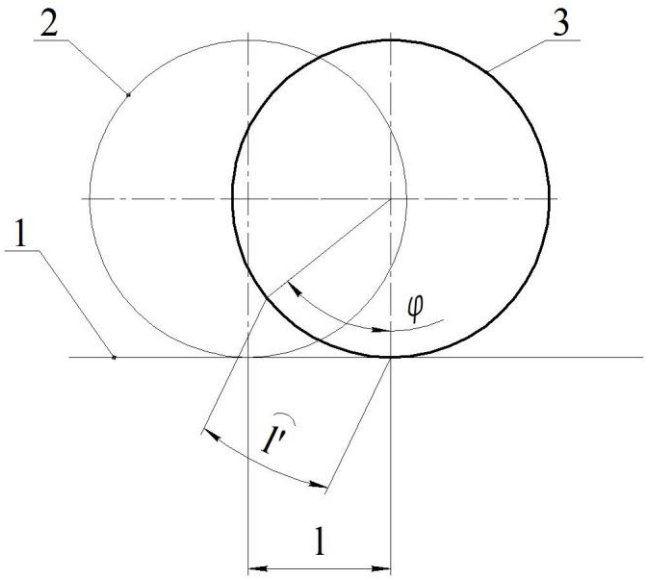


Рис. 2.12 Схема повороту оброблює мого колеса на один кутовий крок

1 - дотична до основної окружності пряма; 2 - основна окружність до повороту на кутовий крок; 3 - основна окружність після повороту на кутовий крок.

На рис. 2.13 зображено розміщення інструменту для обробки опозитних профілів зубця.

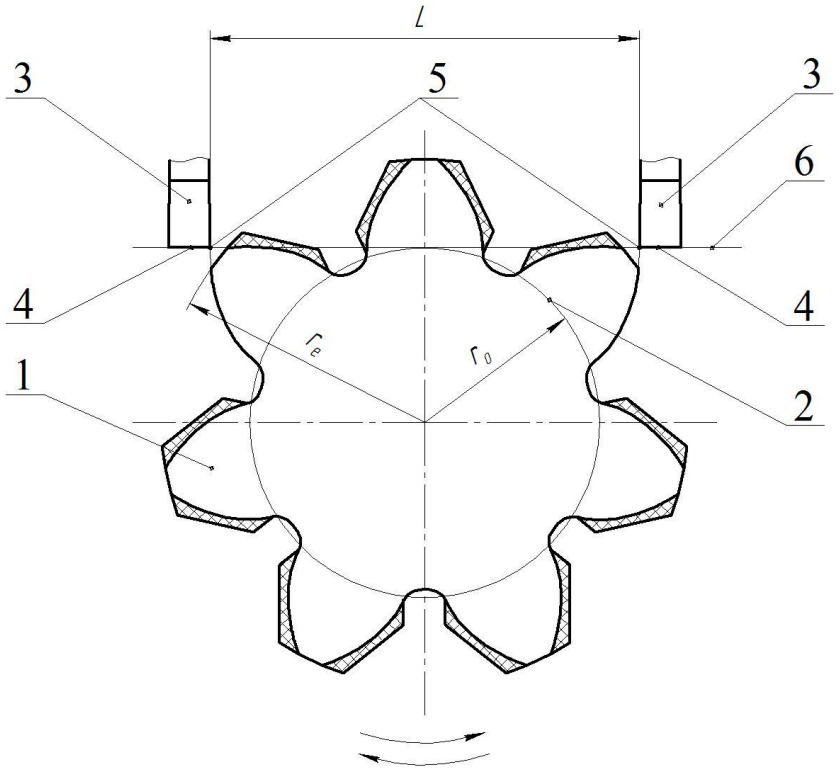


Рис. 2.13 Розміщення інструмента і деталі

1 - оброблюване циліндричне зубчасте колесо; 2 – основна окружність; 3 – інструмент; 4 - формоутворююча ріжуча кромка інструменту; 5 - початкова точка формоутворюючої ріжучої кромки інструмента; 6 - дотична до основної окружності пряма.

Опозитні евольвентні профілі зубця обробляються двома різальними інструментами 3, початкові точки 5 формоутворюючих різальних кромок 4 яких розміщені на загальній нормалі, на відстані L, визначаєму з виразу:

$$L = 2r_e \cdot \sin(\cos^{-1}\frac{r_o}{r_e});$$

де, r_e- радіус вершин зубців, мм;

r_o - радіус основного кола, мм.

Спосіб здійснюється наступним чином.

При обробці евольвентних поверхонь зубців циліндричного зубчастого колеса (рис. 2.13) два інструменти 3, формоутворююча ріжуча кромка 4 яких знаходиться на продовженні радіусів кривизни 7 евольвентного профілю 6, встановлюють на безпечній відстані від оброблюваного зубчастого колеса 1 та на загальній нормалі, на відстані L між початковими точками 5 формоутворюючих різальних кромок 4. Потім інструментам надають обертальний рух різання навколо власної вісі та переміщення повздовж оброблюваної поверхні із швидкістю повздовжньої подачі, а оброблюваному циліндричному зубчастому колесу відповідні формоутворюючі рухи обкату (рис. 2.11, рис. 2.12). Після завершення обробки опозитних профілів зубця, оброблюване циліндричне зубчасте колесо здійснює рух ділення на один кутовий крок.

Здійснення запропонованого методу обробки можливе шляхом модернізації існуючих фрезерних верстатів. Для модернізації необхідно оснастити верстати системою ЧПУ з схемою синхронізації формоутворюючих рухів обкату.

Головною перевагою обумовленого способу обробки евольвентних поверхонь зубців циліндричних зубчастих коліс є те, що інструмент має просту форму, сприятливі умови роботи з огляду на вільне різання та можливість обробки широкої номенклатури типорозмірів циліндричних зубчастих коліс інструментом одного типорозміру.

2.4.3 Метод черв’ячно-контурного зубофрезерування

Черв’ячно-контурне зубофрезерування [8] повторює традиційне черв’ячне зубофрезерування але і вміщує в своїй суті значні відмінності.

Сутність черв’ячно-контурного зубофрезерування полягає в тому, що воно застосовується лише як метод чистової обробки евольвентних профілів зубців при цьому інструмент працює єдиною ріжучою кромкою, яка є продовженням радіусів кривизни евольвенти (аналогічно методу, описаному в р. 2.4.2), та розміщена на гвинтовій лінії з кроком, який визначається по формулі:

$$\mathrm{P} = \pi \cdot m \cdot \cos\alpha$$

де: m – модуль нарізуваного колеса;

α - кут зачеплення.

Кінематично процес нарізання зубців при черв’ячно-контурному зубофрезеруванні слід розглядати як зачеплення черв’яка і черв’ячного колеса. Обертальний рух черв’ячно-контурної фрези та оброблюваного колеса зв’язані між собою та визначаються відношенням числа заходів фрези до числа зубців нарізуваного колеса. За один оберт однозахідної черв’ячної фрези оброблюване колесо повинне повернутись на один зубець, рис. 2.14.

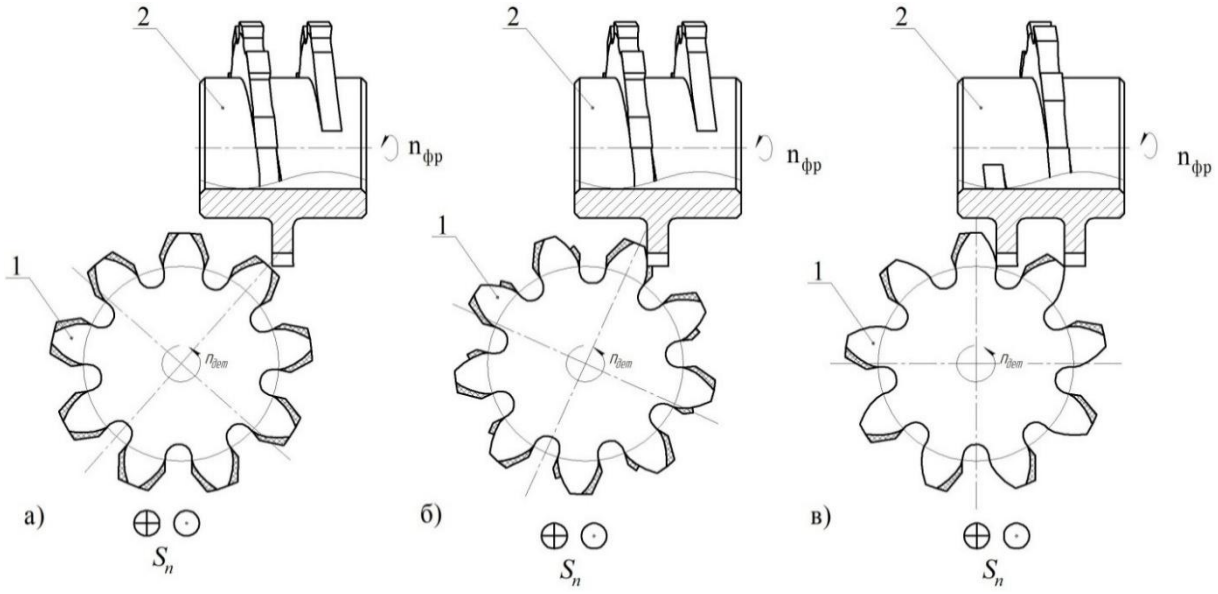


Рис. 2.14 Схема обробки черв’ячно-контурного зубофрезерування

а, б, в – послідовні положення інструмента і деталі підчас обробки
1 - оброблюване колесо; 2 - черв’ячно-контурна фреза.

Процес черв’ячно-контурного зубофрезерування відбувається наступним чином. Фреза встановлюється у відповідне положення до контуру оброблюваної поверхні, яке у кожному випадку визначається розрахунками. Після чого відбувається обробка однієї сторони профілів всіх зубців (рис. 2.14) на повну довжину зубця.

В кінці проходу фреза повторює переміщення в крайнє опозитне положення, після чого відбувається обробка опозитних евольвентних профілів.

На рис. 2.15 зображено переміщення циліндричного зубчастого колеса після обробки всіх однойменних евольвентних поверхонь для обробки опозитних необроблених евольвентних поверхонь.

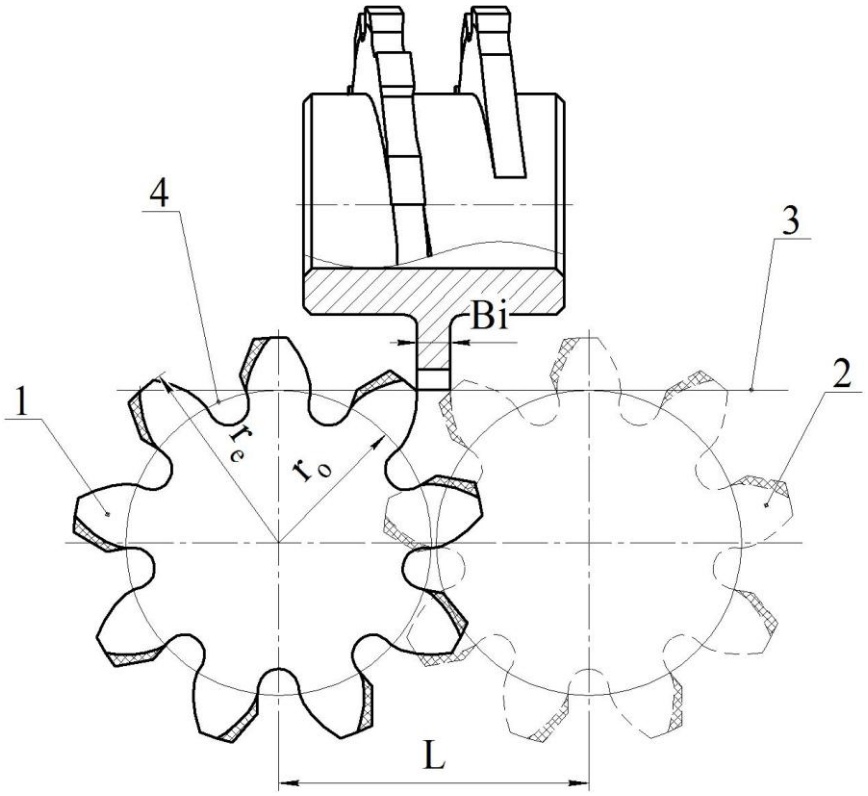


Рис. 2.15 Переміщення оброблюваного зубчастого колеса після обробки однойменних профілів

1 – зубчасте колесо до переміщення; 2 – зубчасте колесо після переміщення; 3 – дотична до основної окружності пряма; 4 – основна окружність.

Рух відбувається по дотичній 3 основній окружності 4, без обертання, на величину L, що визначається з виразу:

$$L = 2r_e \cdot \sin(\cos^{-1}\frac{r_o}{r_e}) + B_{\text{i}}, \text{мм};$$

де, Re - радіус вершин зубців, мм;

r_o - радіус основної окружності, мм;

B_{i} - ширина ріжучої кромки інструмента, мм;

Напрямок обертання деталі при обробці опозитних профілів протилежний напрямку обертання при першому переході, аналогічно для фрези.

Таким чином, повна обробка здійснюється за два проходи з переустановкою інструменту.

2.5 Порівняльний аналіз технологій зубообробки

Здійснимо порівняльний аналіз основних технологічних показників традиційної технології зубофрезерування та пропонованої гнучкої технології.

При виконанні порівняльного аналізу враховувались наступні вимоги:

1) моделювалась обробка однієї умовної одиниці поверхні западини на довжину l = 1 мм. Параметри умовної одиниці показано на рис. 2.16.

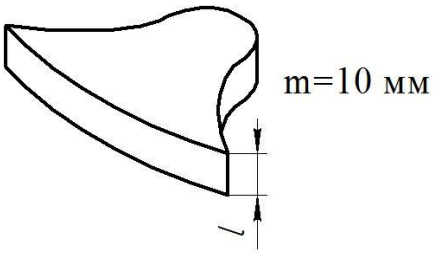


Рис. 2.16 Одна умовна одиниця поверхні западини

m – модуль, мм; l – довжина, мм.

2) Порівнювались наступні технологічні показники:

- затрати роботи, (кг·мм^3);
- основний час обробки;
- затрати на інструмент;
- кошти на обробку;
- затрати потужності.

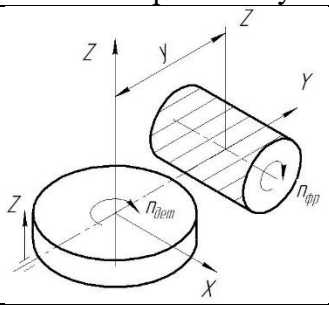
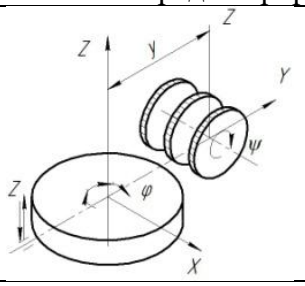
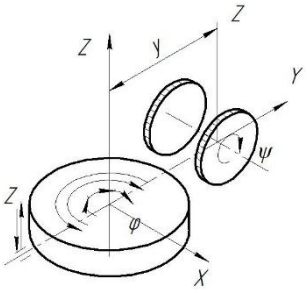
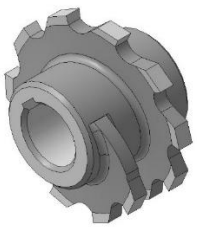
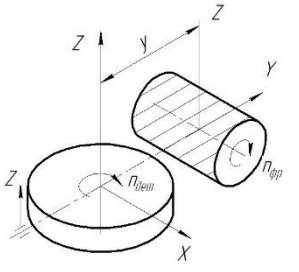
3) Показники представляються у відносному вигляді.

4) Порівнюються однорідні методи: комплекс черв’ячних і комплекс гнучких методів, для забезпечення адекватності порівняння методів.

5) По затратам потужності порівнювалось черв’ячно-контурне зубофрезерування та чистове черв’ячне зубофрезерування.

Основні технологічні показники (зокрема затрати роботи, затрати на інструмент і обробку, затрати потужності) порівнювались по інформації з відкритих джерел [1, 5, 9, 14]. Основний час на обробку розраховувався для кожного методу окремо, згідно вихідних параметрів методів зубообробки, які зведено до табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

<table>
<tr><th>Інструмент</th><th>Схема обробки</th><th colspan="2">Режими обробки</th></tr>
<tr><td colspan="4">Черв’ячне зубофрезерування</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td><td>Чорнові</td><td>Чистові</td></tr>
<tr><td>$n_{\text{фр}} = 100$ об/хв
$S_{o.\text{дет}} = 1{,}5$ мм/об
$L^{*}_{\text{рх}} = 1$ мм
$Z = 10$ шт
$n_{\text{дет}} = 10$ об/хв
$S_{\text{хв}} = 15$ мм/об</td><td>$n_{\text{фр}} = 100$ об/хв
$S_{o.\text{дет}} = 1{,}5$ мм/об
$L^{*}_{\text{рх}} = 1$ мм
$Z = 10$ шт
$n_{\text{дет}} = 10$ об/хв
$S_{\text{хв}} = 15$ мм/об</td></tr>
<tr><td colspan="4">Попереднє прорізання западин</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td colspan="2">$n_{\text{фр}} = 100$ об/хв
$S_o = 3$ мм/об
$S_z = 0{,}3$ мм/об
$L^{*}_{\text{рх}} = 1$ мм
$Z = 10$ шт</td></tr>
<tr><td colspan="4">Кінематичне зубофрезерування</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td colspan="2">$n_{\text{фр}} = 250$ об/хв
$S_o = 1$ мм/об
$S_{Z\text{o}} = 0{,}1$ мм/зуб
$S_{Z\text{т}} = 0{,}1$ мм/зуб
$S_{\text{т}} = 1$ мм/зуб
$L^{\text{т}*}_{\text{рх}} = 25$ мм
$L^{\text{о}*}_{\text{рх}} = 1$ мм
$Z = 10$ шт</td></tr>
<tr><td colspan="4">Черв’ячно-контурне зубофрезерування</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td colspan="2">$n_{\text{фр}} = 100$ об/хв
$S_{o.\text{дет}} = 1{,}5$ мм/об
$L^{*}_{\text{рх}} = 1$ мм
$Z = 10$ шт
$n_{\text{дет}} = 10$ об/хв
$S_{\text{хв}} = 15$ мм/об</td></tr>
</table>

де: $n_{\text{фр}}$ - частота обертання фрези;

$S_{o.\text{дет}}$ - подача на оберт деталі;

$L^{*}_{\text{рх}}$ - довжина проходу (умовно прийняте значення);

Z - число зубців (умовно прийняте значення);

$n_{\text{дет}}$ - частота обертання деталі;

$S_{\text{хв}}$ – хвилинна подача;

S_o - подача на оберт фрези;

S_z - подача на зуб фрези;

$S_{Z\text{o}}$ - подача вісева на зуб фрези;

$S_{Z\text{т}}$ – подача тангенціальна на зуб фрези;

$S_{\text{т}}$ - подача тангенціальна на оберт фрези;

$L^{\text{т}*}_{\text{рх}}$ - довжина проходу тангенціальна;

$L^{\text{о}*}_{\text{рх}}$ - довжина проходу вісева (умовно прийняте значення);

Основний час обробки при **традиційному черв'ячному зубофрезеруванні**, хв:

$$t_{o.\text{ч}} = \frac{L_{\text{рх}} \cdot z}{S_o \cdot n \cdot q} = \frac{1 \cdot 10}{1{,}5 \cdot 100 \cdot 1} = 0{,}066.$$

Основний час обробки одного зубця, хв:

$$T_{\Sigma 1} = \frac{t_{o.\text{ч}}}{z} = \frac{0{,}066}{10} = 0{,}0066.$$

Вихідні параметри традиційного черв'ячного зубофрезерування: шорсткість чорнової обробленої поверхні Ra 6,3 мкм, шорсткість чистової обробленої поверхні Ra 2,5 мкм.

Основний час обробки при **попередньому прорізанні западин**, хв:

$$t_{o.\text{п}} = \frac{L_{\text{рх}} \cdot z}{S_o \cdot n} = \frac{1 \cdot 10}{3 \cdot 100} = 0{,}033.$$

Основний час обробки одного зубця, хв:

$$T_{\Sigma 2} = \frac{t_{o.\text{п}}}{z} = \frac{0{,}033}{10} = 0{,}0033.$$

Вихідні параметри попереднього прорізання: шорсткість обробленої поверхні Ra 6,3 мкм.

Основний час обробки при **кінематичному зубофрезеруванні**, хв:

$$t_{o.к} = \frac{L^{0}_{рх} \cdot z}{S_o \cdot n} + \frac{2 \cdot L^{т}_{рх} \cdot z}{S_o \cdot n} = \frac{1 \cdot 10}{450} + \frac{2 \cdot 25 \cdot 10}{450} = 1{,}13.$$

Основний час обробки одного зубця, хв:

$$T_{\Sigma 3} = \frac{t_{o.к}}{z} = \frac{1{,}13}{10} = 0{,}113.$$

Вихідні параметри кінематичного зубофрезерування: шорсткість обробленої поверхні Ra 2,5 мкм.

Основний час обробки при **черв'ячно-контурному зубофрезеруванні**, хв:

$$t_{o.ч} = 2{,}2 \cdot \frac{L_{рх} \cdot z}{S_o \cdot n \cdot q} = 2{,}2 \cdot \frac{1 \cdot 10}{1{,}5 \cdot 100 \cdot 1} = 0{,}145.$$

Основний час обробки одного зубця, хв:

$$T_{\Sigma 1} = \frac{t_{o.ч}}{z} = \frac{0{,}145}{10} = 0{,}0145.$$

Вихідні параметри черв'ячно-контурного зубофрезерування: шорсткість обробленої поверхні Ra 2,5 мкм.

Відносні технологічні показники обробки зубчастих коліс, згідно прийнятих вимог, в умовах двохпрохідного черв'ячного зубофрезерування в порівнянні з гнучкими методами приведено на рис. 2.17…2.21.

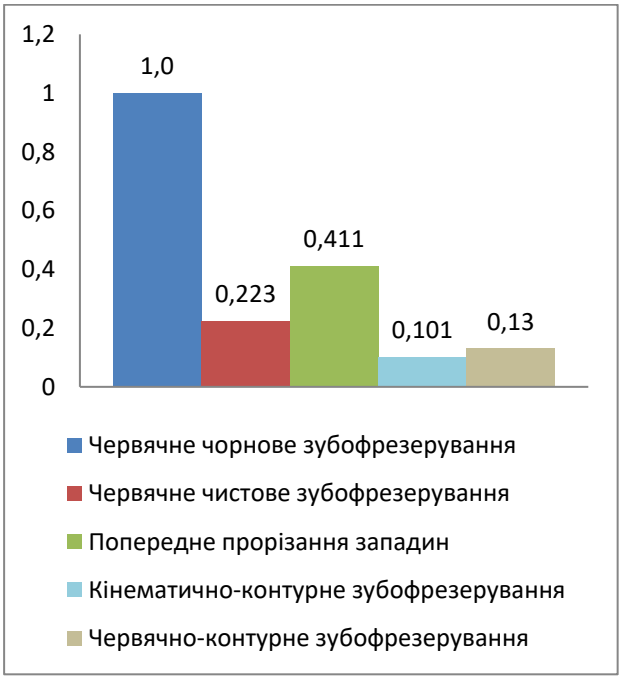


Рис. 2.17 Відносні затрати роботи (кг·мм^3) на обробку умовної одиниці поверхні западини.

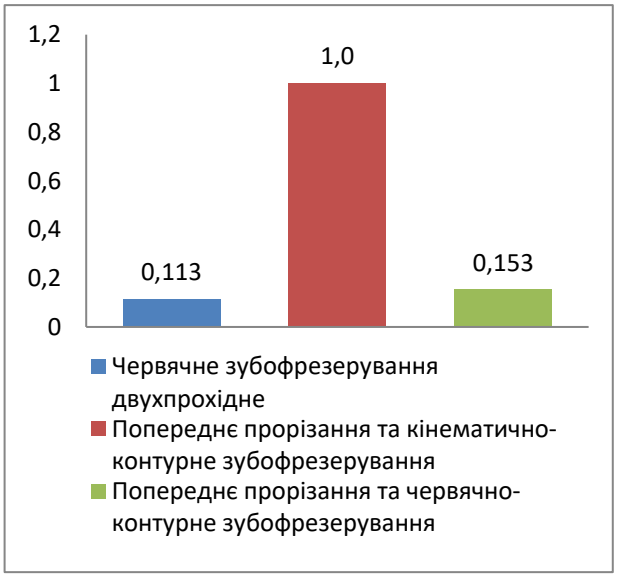


Рис. 2.18 Відносний основний час обробки умовної одиниці поверхні западини.

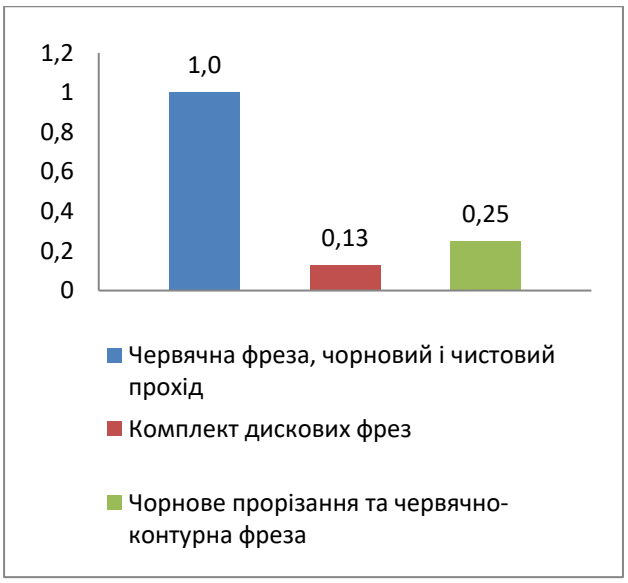


Рис. 2.19 Відносні затрати коштів на інструмент.

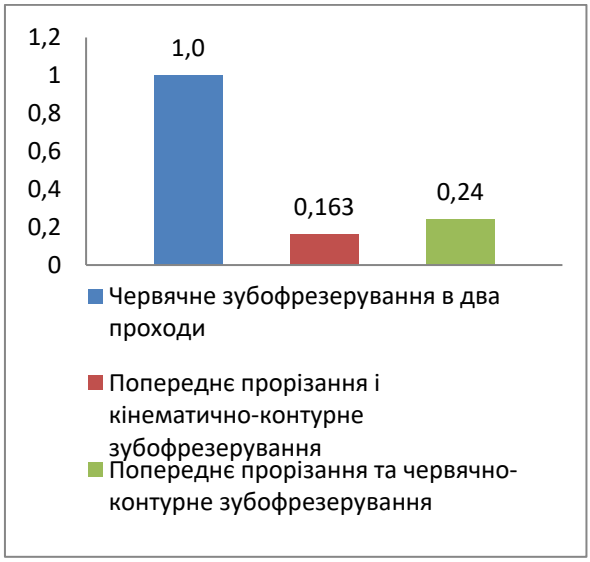


Рис. 2.20 Відносні затрати коштів на обробку умовної одиниці поверхні западини.

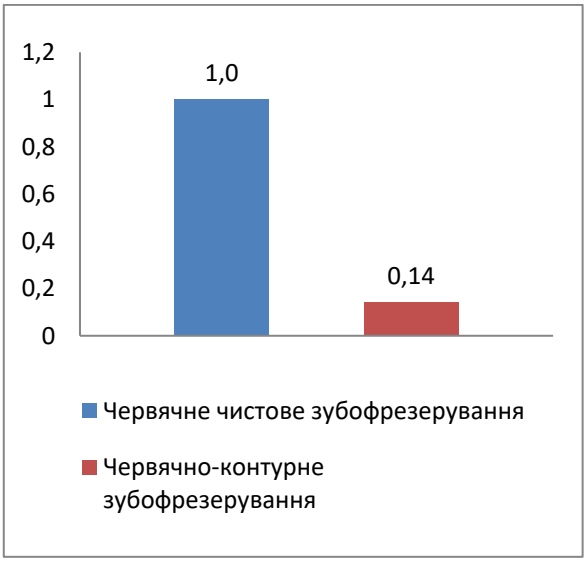


Рис. 2.21 Затрати потужності, кВт·год

2.5.1 Моделювання шорсткості обробленої поверхні методами контурного зубофрезерування

Запропоновані у р. 2.4 методи контурної зубообробки позбавлені ключових недоліків традиційного черв'ячного зубофрезерування, зокрема невільного стружкоутворення та схеми різання із нераціональним

розподіленням припуску, що може безпосередньо позитивно вплинути на якість обробленої поверхні.

Для перевірки гіпотези, проведемо дослідження шорсткості у номінальному профілі нарізаного зубчастого колеса в умовах моделювання – виміряємо відхилення профілю у площині, яка проходить крізь номінальний профіль (рис. 2.22).

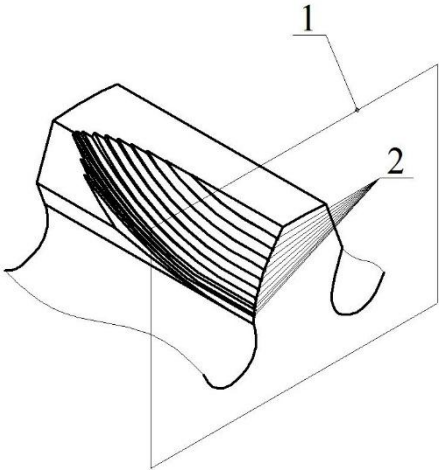


Рис. 2.22 Оброблена поверхня методами контурної обробки

1 – площина, яка проходить крізь номінальний профіль; 2 – точки профіля, в яких проводилися виміри.

Виміри проведено у довільних 18 точках (рис. 2.22), та зведено отримані дані до табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Точка заміру шорсткості, №	Кут розгорнутості евольвенти, α°	Відхилення профілю у, мм
1	39	0,00085
2	36	0,00081
3	33	0,00081
4	30	0,00075
5	27	0,00076
6	25	0,00069
7	22	0,00072
8	19	0,00068
9	16	0,00062
10	13	0,00057
11	10	0,00054
12	7	0,0005
13	5	0,00055
14	2	0,00068
15	0	0,00019
16	-3	0,00029
17	-6	0,00053
18	-9	0,00054

По отриманим даним побудовано графік залежності відхилень профілю від кута розгорнутості евольвенти (рис. 2.23).

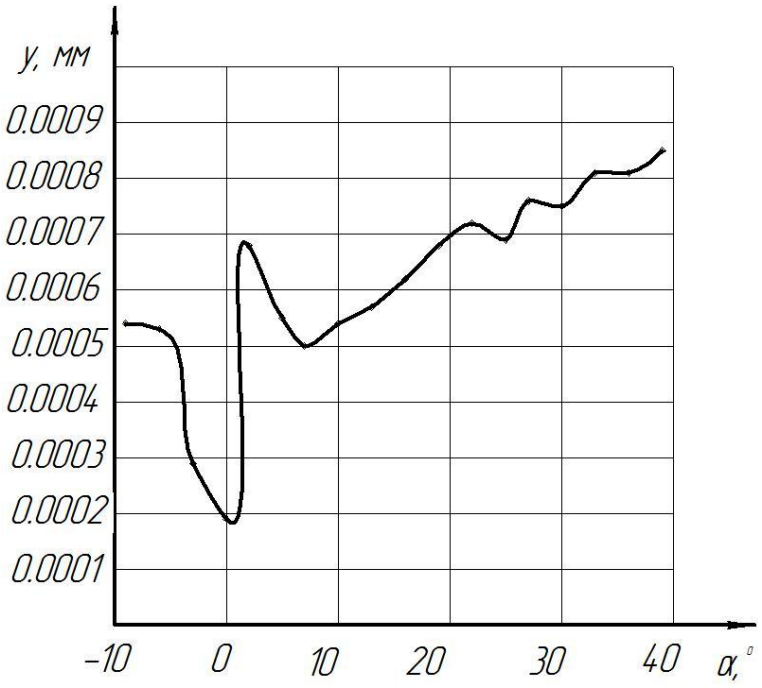


Рис. 2.23 Графік відхилень профілю від кута розгорнутості евольвенти.

По отриманим даним розраховано шорсткість обробленої поверхні по формулі [9]:

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|\text{, мм;}$$

$$R_a = \frac{1}{18}\sum_{i=1}^{18}|0{,}01108| = 0{,}000615 \text{ мм;}$$

$$R_a \approx 0{,}63 \text{ мкм;}$$

Значення відповідає якості чистової обробки.

2.6 Висновки та рекомендації

У розділі проведено дослідження процесу різання при зубофрезеруванні, на основі чого отримано наступні результати:

1) встановлено специфіку умов зачеплення між черв’ячною фрезою та заготовкою, визначено, що довжина зони врізання та характер навантаження на зубці суттєво залежать від геометрії різальної частини фрези.

2) Досліджено закономірності зносу інструменту, який розподіляється нерівномірно по вхідній, вершинній та вихідній кромках. Причиною є схема формоутворення при черв'ячному зубофрезеруванні.

3) Доведено відсутність прямої залежності між товщиною зрізу та інтенсивністю зносу. Найбільший знос спостерігається на перехідних ділянках від вершинної до бічних кромок, де умови сходу стружки є найбільш несприятливими.

З метою підвищення ефективності процесу механічної обробки зубчастих коліс та розширення технологічних можливостей, запропоновані методи лезової обробки, які позбавлені перелічених недоліків традиційного методу:

- метод попереднього прорізання западин дисковими фрезами, що забезпечує вільне стружкоутворення та раціональну форму припуску для чистових операцій;
- методи кінематично-контурного та черв'ячно-контурного зубофрезерування, які дозволяють формувати евольвентний профіль за допомогою інструментів простої форми, та в умовах вільного різання.

Сформульовано передумови створення гнучких технологій, що базуються на використанні сучасних верстатів з ЧПУ та запропонованих методів.

Шляхом моделювання підтверджено ефективність запропонованих методів, виконано порівняння технологічних показників із традиційною технологією. Розрахунки відхилень профілю показали високу точність формоутворення, що свідчить про потенціал забезпечення низької шорсткості та високої якості обробленої поверхні.

Рекомендації: Напрацювання можуть використовуватися у дослідженнях процесів різання при зубофрезеруванні, при розробці нових методів зубофрезерування, інструменту та при дослідженні шляхів покращення точності та якості обробки зубчастих коліс.

РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз і синтез можливих компоновок верстатів для здійснення зубонарізання в умовах контурного зубофрезерування

3.1.1 Аналіз компоновок

Практика верстатобудування показує, що правильний вибір і раціональна компоновка суттєво впливають на якість верстата. Це проявляється у двох аспектах: через вибір структури, що визначає універсальність або спеціалізацію, та через конструктивні рішення і розташування вузлів, які забезпечують високі техніко-економічні показники [2].

Якість компоновки - це її потенціал створювати більш досконалі верстати порівняно з іншими варіантами. Вона визначається переважно шляхом порівняння, з використанням відносних оцінок.

Для коректного порівняння необхідно, щоб компоновки відповідали одній технологічній задачі та мали близькі основні параметри: розміри столу, переміщення, інструменти, їх положення і навантаження. Також бажано використовувати однаковий тип напрямних із подібними характеристиками точності та допустимих напружень.

Основні якісні та техніко-економічні показники металорізальних верстатів загальновідомі, це - продуктивність, точність, зносостійкість, вартість верстата і собівартість обробки на ньому. До найважливіших характеристик, що побічно впливають на всі інші, повинні бути віднесені жорсткість і вібростійкість. Розглянемо ці показники з точки зору впливу на них компоновки верстата:

- продуктивність: залежить від обраної схеми, особливо при концентрації обробки (багатошпиндельні та багатопозиційні верстати);
- точність: визначається жорсткістю системи, пропорціями напрямних та деформаціями від маси вузлів, поняття «точність компоновки» є самостійним критерієм якості;

- надійність (міцність і зносостійкість): залежить від габаритів напрямних та їх розташування відносно зони різання;
- економічність: компоновка прямо впливає на вартість (через металоємність і трудомісткість) та експлуатаційні витрати (площа, енерговитрати, складність ремонту);
- жорсткість: центральна характеристика, впливає на точність, вібростійкість та металоємність;
- вібростійкість: визначає динамічну стійкість під час різання та відсутність автоколивань;
- ергономіка: зручність обслуговування та ремонту;
- універсальність: технологічність виготовлення, можливість модифікації та переобладнання верстата.

Отже, жорсткість та вібростійкість є найважливішими показниками при аналізі якості компоновки, оскільки вони прямо впливають на точність та продуктивність роботи [2].

На рис. 3.1. приведені можливі компоновки обробних центрів для здійснення зубонарізання в умовах гнучких технологій.

У зв'язку з різноманітністю компоновок є необхідність у коротких записах, які могли б служити мовою і інструментом дослідження. Для цього коротке позначення компоновок повинно розкривати її структуру, дозволяти судити про розташування частин компоновок у просторі і надавати можливість використання того чи іншого математичного апарату досліджень. Всім цим вимогам задовольняє позначення компоновок за допомогою структурних формул, які використовується авторами робіт, що пов’язані із структурним компонуванням верстатів [2].

Структурна формула компоновки - це певна послідовність символів, що позначають блоки компоновок, яка розкриває координатну приналежність і спосіб сполучення блоків.

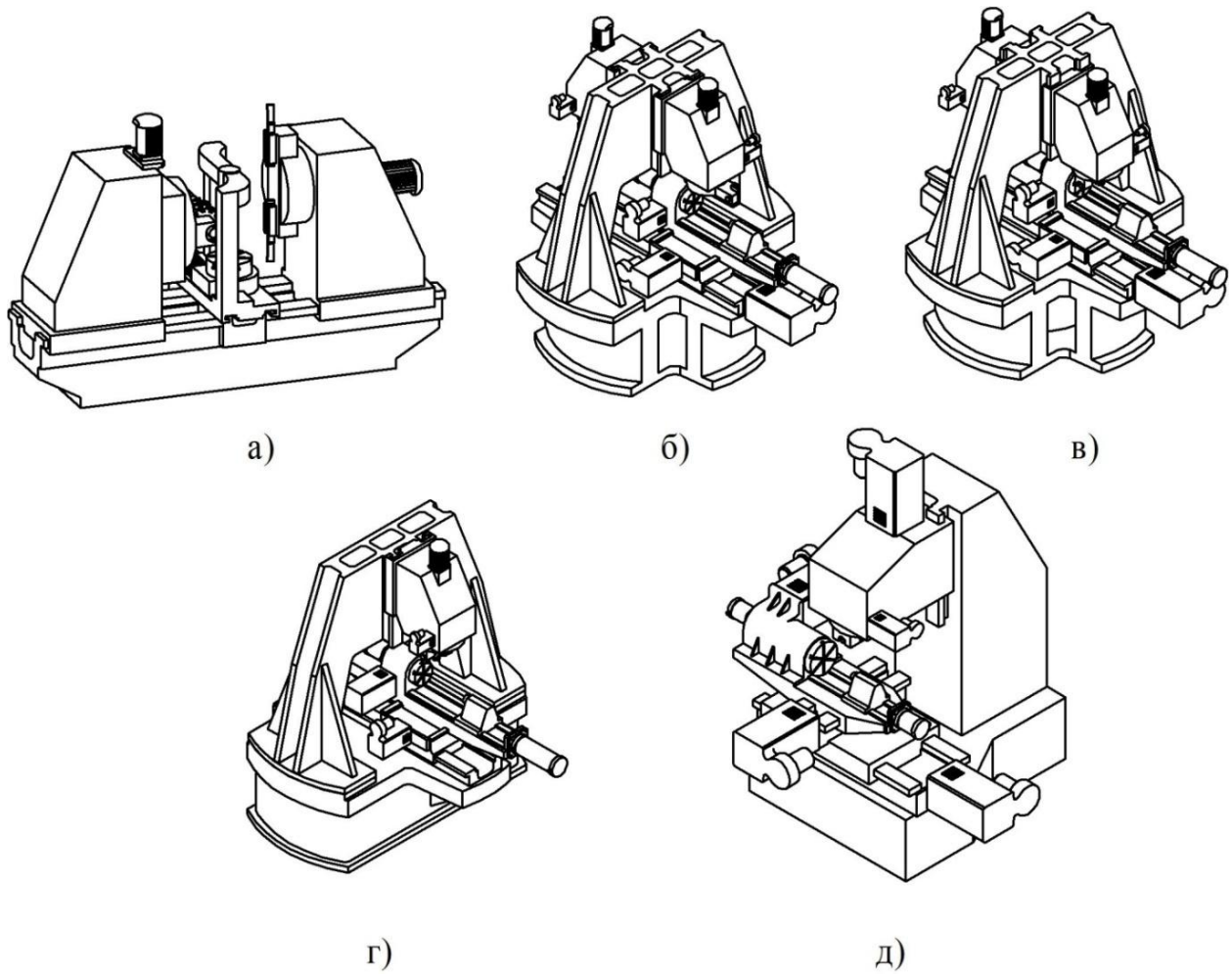


Рис. 3.1 Компоновки обробних центрів для здійснення зубонарізання в умовах гнучких технологій

а) двухсторонній прорізний-зубодовбальний; б) портальний двухсторонній прорізний-зубодовбальний; в) портальний двухсторонній прорізний - контурно-зубообробний; г) портальний односторонній прорізний - контурно-зубообробний;
д) консольний прорізний - контурно-зубообробний.

Структурні формули компоновок обробних центрів, що аналізуються:

- двухсторонній прорізний-зубодовбальний:

$$D_V YO(uZ_A cC_n+ucZ)$$

- портальний двухсторонній прорізний-зубодовбальний:

$$D_n YXO(wcC_n +wcZ)$$

- портальний двухсторонній прорізний - контурно-зубообробний:

$$D_n YXO(wcC_n+wcC_n)$$

- портальний односторонній прорізний - контурно-зубообробний:

$$D_n YXOwcC_n$$

- консольний прорізний - контурно-зубообробний:

$$D_nYXOwcC_n$$

Результати порівняльного аналізу компоновок по рис. 3.1, по описаним вище показникам, зведено до табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Компоновка верстата, за рис. 3.1	Показники													
	Продуктивність	Точність	Зносостійкість і міцність	Вартість верстата	Металоємність	Вартість експлуатації	Жорсткість	Вібростійкість	Зручність обслуговування	Технологічність компоновки	Ремонтодоступність	Можливість модифікації	Оборотність компоновки	Сумарний бал
а	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	7
б	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	5
в	+	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-	+	+	6
г	-	+	-	-	+	-	+	-	+	-	+	+	+	7
д	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	12

За результатами порівняльного аналізу найбільш доцільною компоновкою обробного центру, для здійснення зубонарізання в умовах гнучких технологій, буде компоновка рис. 3.1, д.

3.1.2 Синтез компоновок

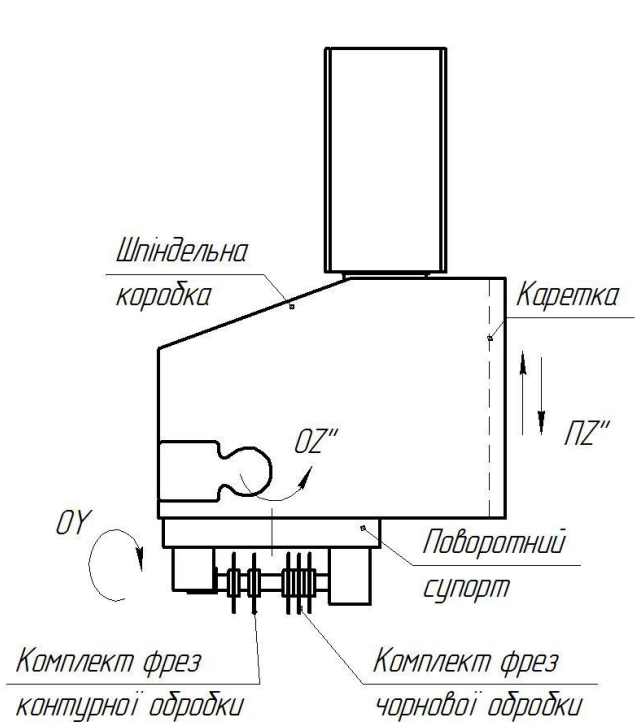
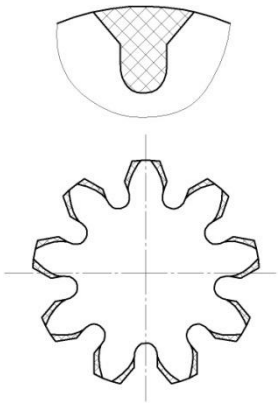
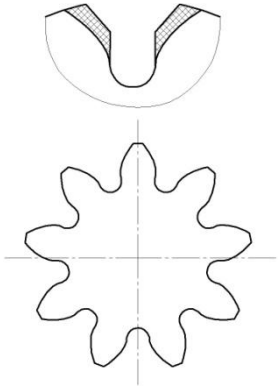
Визначальну роль у розмірній обробці відіграють траєкторії формоутворюючих рухів, від яких залежить точність верстата. Їх забезпечують виконавчі ланки та несуча система. Сукупність цих елементів, їх кількість, тип і просторове розташування утворюють компоновку верстата.

Зазвичай компоновка включає один нерухомий і кілька рухомих елементів, розділених стиками. Кожен рухомий елемент здійснює один координатний рух уздовж напрямних.

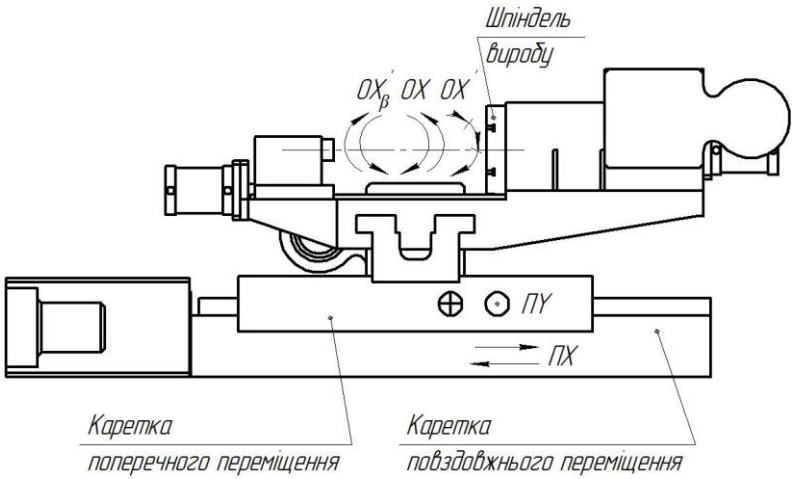
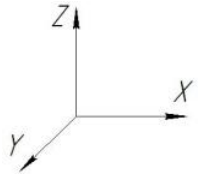
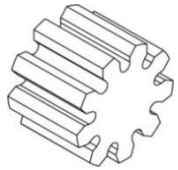
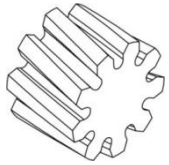
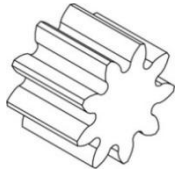
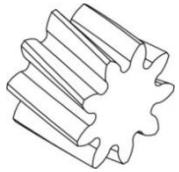
Для здійснення зубонарізання в умовах КЗФ проведено синтез компоновок верстатів. Результати наведено в табл. 3.2 та табл. 3.3.

Таблиця 3.2

Класифікація модулів для зубообробного центру

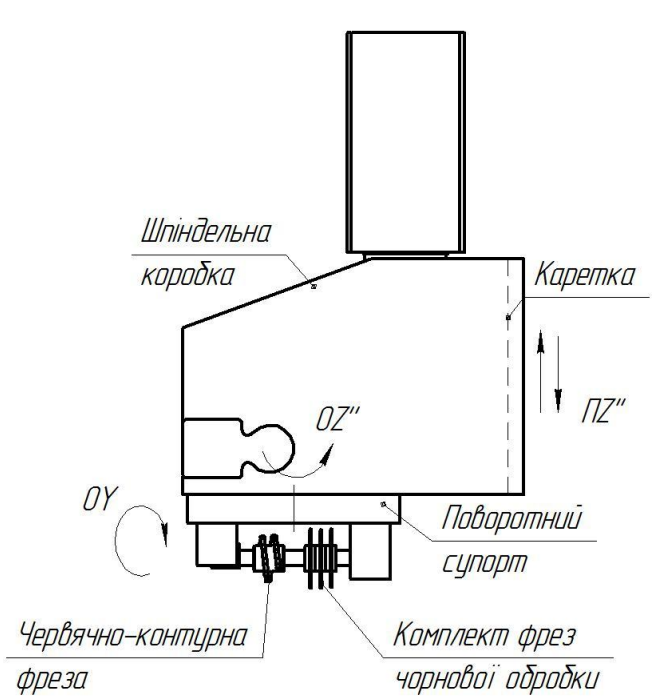
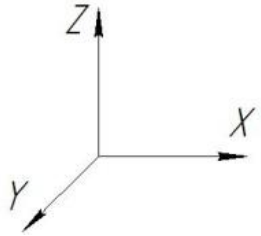
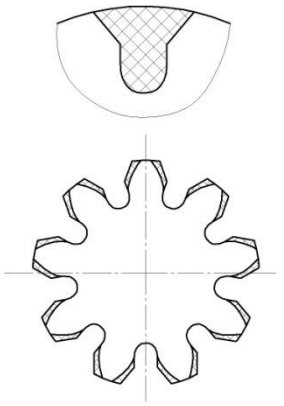
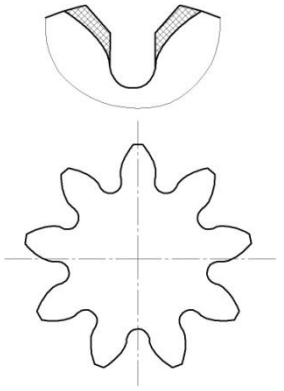
Схема модуля	Функційні параметри модуля (рівняння суми рухів ∑ P ...)	Виконавчі параметри модуля
Фрезерна шпіндельна коробка (ФШК) для попереднього прорізання западин (позиція I) та кінематично-контурного зубофрезерування (позиція II)		
 OY – рух різання; ПZ" – установчий рух каретки; OZ" – установчий рух супорта.	для β=0: $\sum$ РФШК = $ПZ" + OZ" + OY$ для β>0: $\sum$ РФШК = $ПZ" + OY$	Позиція I  Позиція II 

Продовження таблиці 3.2.

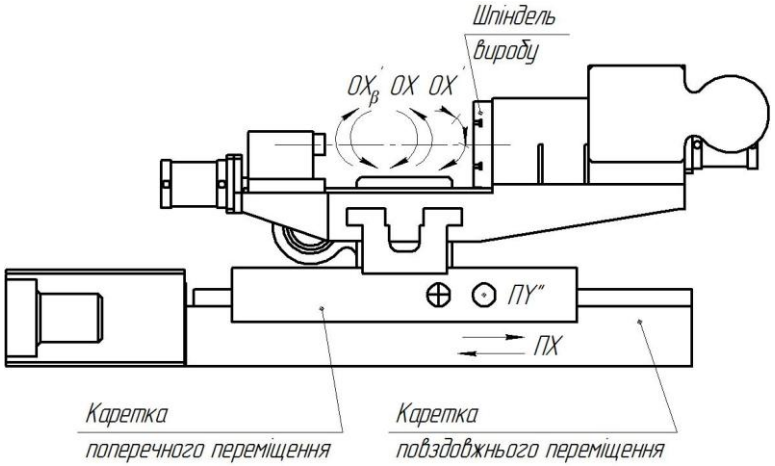
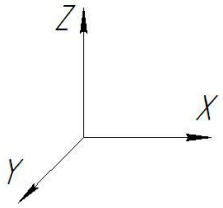
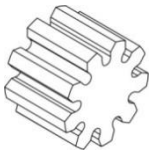
Схема модуля	Функційні параметри модуля (рівняння суми рухів ∑ Р ...)	Виконавчі параметри модуля
Хрестовий ділильний стіл		
 ОХ' – дискретний рух ділення; ОХ – рух ділення; $ОХ'_{\beta}$ – рух додаткового ділення, який враховує гвинтову поверхню; ПХ – рух формоутворення повздовж вісі; ПУ – рух формоутворення в поперечному перерізі. 	для β=0: $\sum РД = ОХ' + ПХ$	
	для β>0: $\sum РД = ОХ' + ПХ + ОХ'_{\beta}$	
	для β=0: $\sum РД = ОХ' + ОХ + ПУ + ПХ$ (ОХ + ПУ) - рух обкату	
	для β>0: $\sum РД = ОХ' + ОХ + ПУ + ПХ + ОХ'_{\beta}$ (ОХ + ПУ) - рух обкату	

Таблиця 3.3.

Класифікація модулів для зубообробного центру

Схема модуля	Функційні параметри модуля (рівняння суми рухів ∑ P ...)	Виконавчі параметри модуля
Фрезерна шпіндельна коробка (ФШК) для попереднього прорізання западин (позиція I) та черв'ячно-контурного зубофрезерування (позиція II)		
  OY – рух різання; ПZ" – установчий рух каретки; OZ" – установчий рух супорта.	для β=0: $\sum$ РФШК = $ПZ" + OZ" + OY$ для β>0: $\sum$ РФШК = $ПZ" + OY$	Позиція I  Позиція II 

Продовження таблиці 3.3.

Схема модуля	Функційні параметри модуля (рівняння суми рухів ∑Р ...)	Виконавчі параметри модуля
Хрестовий ділильний стіл		
 ОХ' – дискретний рух ділення; ОХ – рух ділення; $ОХ'_\beta$ – рух додаткового ділення, який враховує гвинтову поверхню; ПХ – рух формоутворення повздовж вісі; ПХ" – установчий рух повздовж вісі; ПУ" – установчий рух в поперечному перерізі. 	для β=0: $\sum РД = ОХ' + ПХ$	
	для β>0: $\sum РД = ПХ'' + ОХ' + ПХ + ОХ'_\beta$	
	для β=0: $\sum РД = ПУ'' + ОХ' + ОХ + ПХ$	
	для β>0: $\sum РД = ПУ+ПХ + ОХ' + ОХ + +ПХ + ОХ'_\beta$	

3.2 Кінематика верстата для здійснення обробки в умовах контурного зубофрезерування

3.2.1 Забезпечення синхронності руху електродвигунів при кінематично-контурному зубофрезеруванні

Синхронність рухів крокових електродвигунів при кінематично-контурному зубофрезеруванні забезпечується завдяки схемі синхронізації, блок-схема якої показана на рис. 3.2.

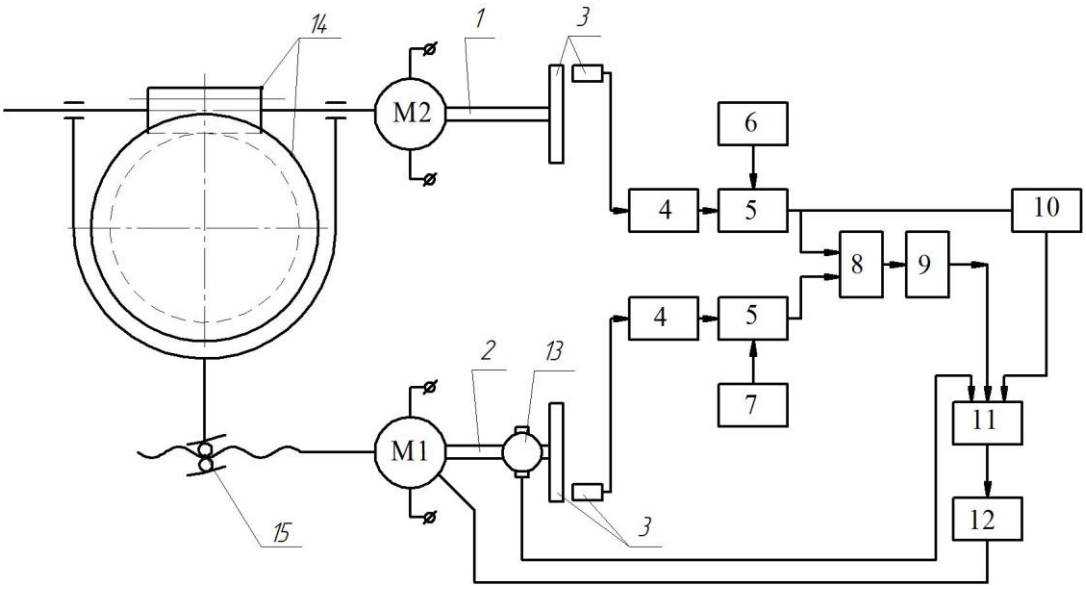


Рис. 3.2 Блок-схема електронної системи синхронізації руху крокових двигунів при кінематично-контурному зубофрезеруванні

1 - ведучий вал черв’ячної передачі; 2 - ведучий вал кулько-гвинтової передачі; 3 - оптичний вимірювальний перетворювач; 4 - блок електронного перетворювача; 5 - лічильник імпульсів; 6 - блок задання коефіцієнта *A*; 7 - блок задання коефіцієнта *B*; 8 - фазовий дискримінатор; 9 - цифро-аналоговий перетворювач; 10 - блок задання подачі; 11 - підсумовуючий блок; 12 - підсилювач потужності; 13 - тахогенератор; 14 - черв'ячна передача; 15 - кулько-гвинтова передача.

Блок-схема електронної системи синхронізації руху призначена для синхронізації обертання двигунів М1 і М2. Роздільна здатність вимірювальної системи рівна 0,1 мкм, забезпечується при діленні вимірювального інтервалу 10 мкм на 100 частин. Частота синусоїдальних сигналів на виході електронних блоків 4 пропорційна вузловий швидкості вала. Ці сигнали подаються на входи лічильників 5. Необхідне передавальне відношення встановлюється блоками завдання коефіцієнтів 6, 7. Цифровий сигнал помилки на виході фазового

дискримінатора 8 перетвориться в аналоговий за допомогою цифро-аналогового перетворювача 9, який використовується для керування двигуном кулько-гвинтової передачі.

Основні умови дотримання параметрів обробки виражаються двома рівняннями:

$$S_z \cdot Z_{\text{фр}} \cdot n_{\text{фр}} = S_k \cdot n_1 \cdot i_1 => n_1 = \frac{S_z \cdot n_{\text{фр}}}{S_k \cdot i_1};$$

$$S_z \cdot Z_{\text{фр}} \cdot n_{\text{фр}} = S_\tau \cdot n_2 \cdot i_2 => n_2 = \frac{S_z \cdot n_{\text{фр}}}{S_\tau \cdot i_2},$$

де S_z – подача на зубець фрези, мм/зуб;

S_k – колова подача, мм/об;

S_τ – тангенціальна подача, мм/об;

$Z_{\text{фр}}$ – кількість зубців фрези, шт;

$n_{\text{фр}}$ – частота обертів фрези, об/хв;

n_1 – частота обертів двигуна М1;

n_2 – частота обертів двигуна М2;

i_1 – передавальне відношення кулько-гвинтової передачі;

i_2 – передавальне відношення черв’ячної передачі.

Визначимо передавальні відношення між двигунами:

$$i_{\text{дв}} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{S_z \cdot Z_{\text{фр}} \cdot n_{\text{фр}} \cdot S_\tau \cdot i_2}{S_k \cdot i_1 \cdot S_z \cdot Z_{\text{фр}} \cdot n_{\text{фр}}} = \frac{S_\tau \cdot i_2}{S_k \cdot i_1}.$$

3.2.2 Забезпечення синхронності руху електродвигунів при черв’ячно-контурному зубофрезеруванні

Синхронність рухів крокових електродвигунів при черв’ячно-контурному зубофрезеруванні забезпечується завдяки схемі синхронізації, блок-схема якої показана на рис. 3.3.

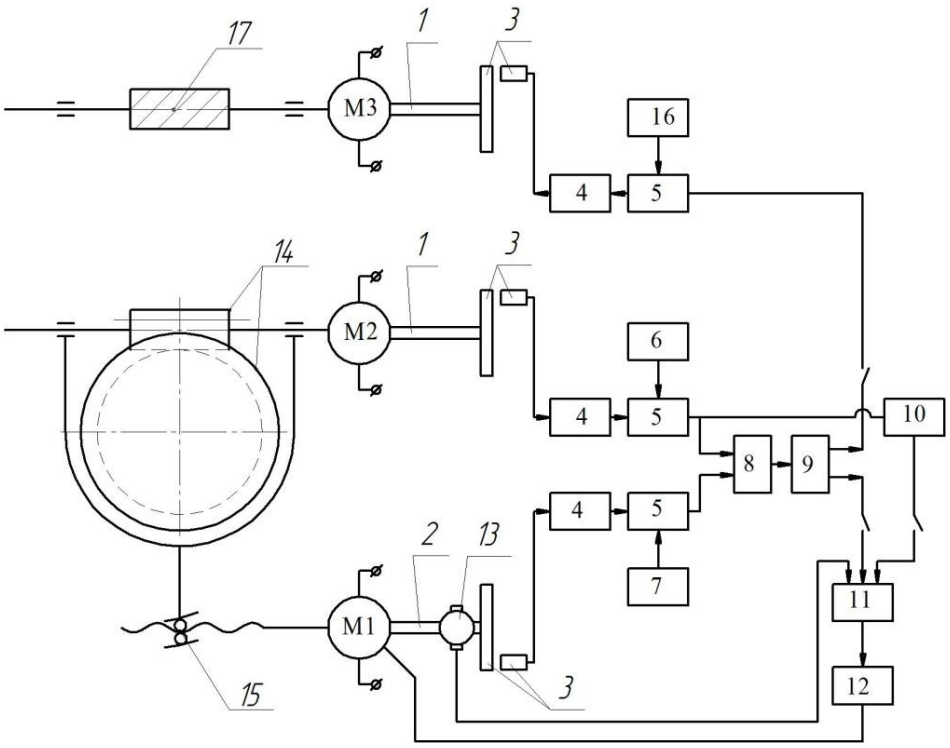


Рис. 3.3 Блок-схема електронної системи синхронізації руху крокових двигунів при черв’ячно-контурному зубофрезеруванні

1 - ведучий вал черв’ячної передачі; 2 - ведучий вал кулько-гвинтової передачі; 3 - оптичний вимірювальний перетворювач; 4 - блок електронного перетворювача; 5 - лічильник імпульсів; 6 - блок задання коефіцієнта *A*; 7 - блок задання коефіцієнта *B*; 8 - фазовий дискримінатор; 9 - цифро-аналоговий перетворювач; 10 - блок задання подачі; 11 - підсумовуючий блок; 12 - підсилювач потужності; 13 - тахогенератор; 14 - черв'ячна передача; 15 - кулько-гвинтова передача; 16 - блок задання коефіцієнта *C*; 17 - черв’ячна фреза.

Під час обробки зубчастого колеса методом черв’ячно-контурного зубофрезерування поперечна подача, за яку відповідає двигун М1 через кульково-гвинтову передачу 15, не підлягає синхронізації, тому відключається вимикачем і не приймає участі в формоутворюючих рухах.

Блок-схема електронної системи синхронізації руху призначена для синхронізації обертання двигунів М2 і М3. Роздільна здатність вимірювальної системи рівна 0,1 мкм, забезпечується при діленні вимірювального інтервалу 10 мкм на 100 частин. Частота синусоїдальних сигналів на виході електронних блоків 4 пропорційна вузловий швидкості вала. Ці сигнали подаються на входи лічильників 5. Необхідне передавальне відношення встановлюється блоками завдання коефіцієнтів 6, 16. Цифровий сигнал помилки на виході фазового

дискримінатора 8 перетвориться в аналоговий за допомогою цифро-аналогового перетворювача 9, який використовується для керування двигуном черв'ячної ділильної передачі 14.

Основні умови дотримання параметрів обробки виражаються рівнянням:

$$n_3 \cdot i_3 = n_2 \cdot i_2 \cdot \frac{1}{z},$$

де z – кількість зубців нарізаємого колеса, шт;

n_2 – частота обертів двигуна М2;

n_3 – частота обертів двигуна М3;

i_2 – передавальне відношення черв'ячної передачі;

i_3 – передавальне відношення коробки швидкостей.

Визначимо передавальні відношення між двигунами:

$$i_{\text{дв}} = \frac{n_3 \cdot i_3 \cdot z}{n_2 \cdot i_2}.$$

3.2.3 Кінематична схема верстата для здійснення обробки в умовах контурного зубофрезерування (КЗФ)

Кінематику верстата слід розглянути помодульно, тобто окремо кінематику фрезерної шпиндельної коробки та хрестового ділильного стола.

Кінематична схема фрезерної шпиндельної коробки представлена на рис. 3.4. Фрезерна шпіндельна коробка складається з двигуна головного руху М3, двигуна повороту інструментального супорту М5, конічної передачі 1, циліндричної передачі 2, черв'ячної передачі 3 і поворотного інструментального супорту 4.

Головний рух передається від двигуна М3 через конічну передачу і циліндричну передачу на інструментальний шпіндель. Використання конічної передачі обумовлено тим, що вісі двигуна і циліндричної передачі перехрещуються. Поворот інструментального супорту на кут, необхідний для обробки косозубих коліс, виконується двигуном М5 через черв'ячну передачу.

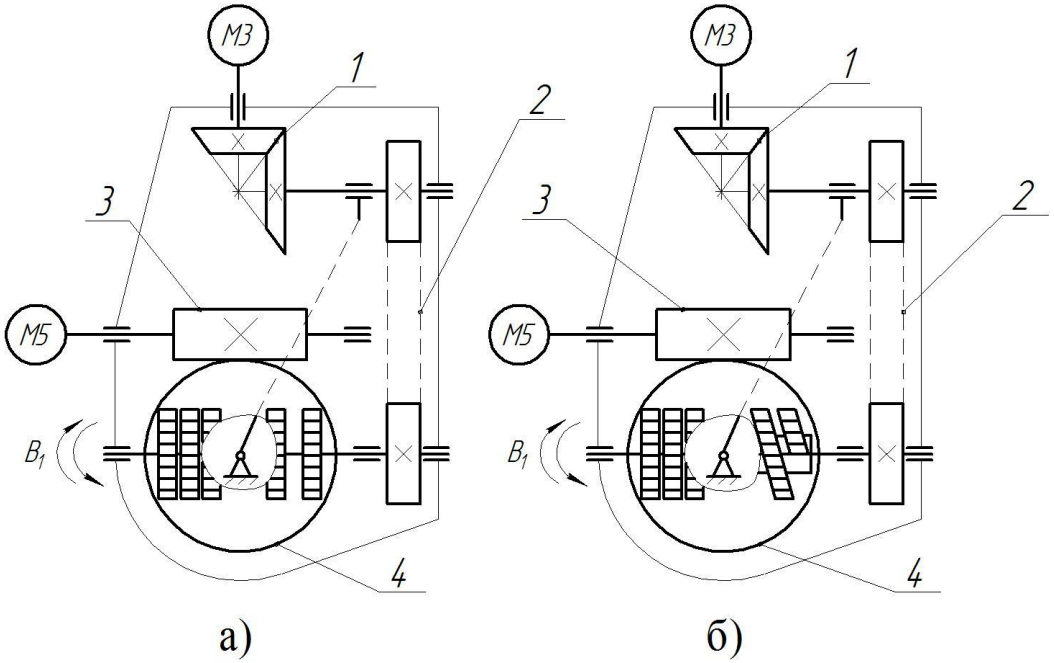


Рис. 3.4 Кінематична схема фрезерної шпиндельної коробки верстата для здійснення обробки в умовах КЗФ

а) фрезерно-прорізної та кінематично-контурної обробки; б) фрезерно-прорізної та черв'ячно-контурної обробки.
1 – конічна передача; 2 – циліндрична передача; 3 – черв'ячна передача; 4 - поворотний інструментальний супорт; М3 – двигун головного руху; М5 – двигун повороту інструментального супорту.

Кінематична схема хрестового стола представлена на рис. 3.5.

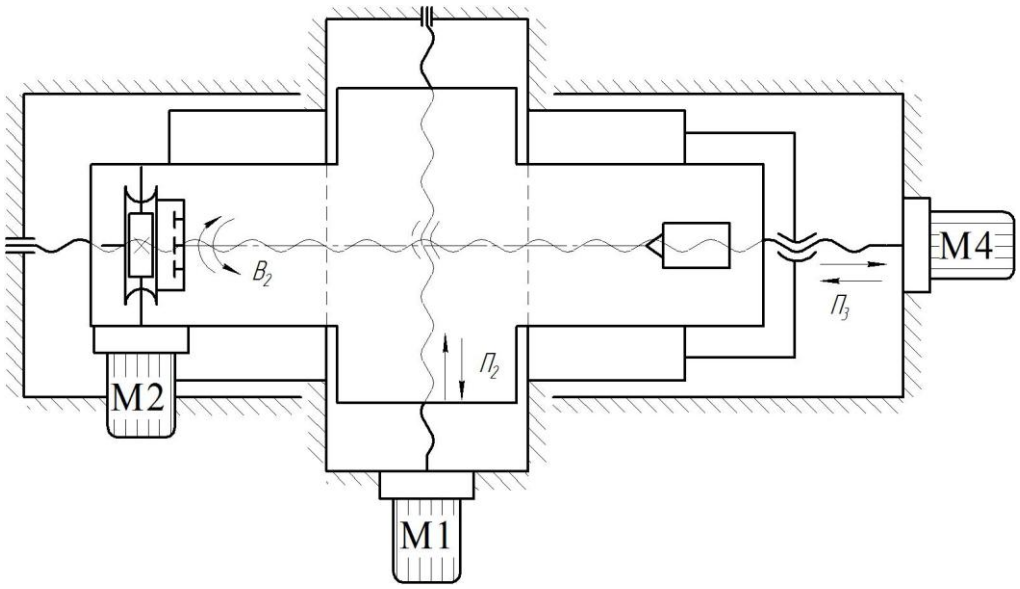


Рис. 3.5 Кінематична схема хрестового стола верстата для здійснення обробки в умовах КЗФ

М1 – двигун поперечного переміщення; М2 – двигун руху ділення; М4 – двигун повздовжнього переміщення.

Хрестовий ділильний стіл складається з двигуна поперечного переміщення М1, двигуна руху ділення М2, двигун повздовжнього переміщення М4.

Двигун руху ділення через черв’ячну передачу, приєднану через шпіндель до планшайби з оброблюваною деталлю, здійснює дискретний рух ділення та рух обкату при обробці. Двигун М1 відповідає за установочні переміщення та формоутворюючий рух обкату, двигун М4 – за осьову подачу.

3.3 Конструкція окремих уніфікованих модулів верстата

3.3.1 Опис уніфікованих модулів хрестового ділильного столу

Хрестовий ділильний стіл верстата для обробки в умовах КЗФ складеться з ділильного столу та хрестових кареток.

У горизонтальних зубофрезерних верстатах функції підтримування оброблюваних деталей виконують ділильні столи [2]. Тому експлуатаційні якості цих верстатів в значній мірі визначаються конструкцією останніх, точністю обертання і жорсткістю їх шпинделів [17], що сприймають частину маси оброблюваного колеса і повідомляють йому обертання. Найбільш істотним з точки зору забезпечення точності є вибір місця розташування ділильного черв'ячного колеса на шпинделі.

У більшості горизонтальних зубофрезерних верстатів ділильне колесо розташовують консольно за підшипником шпинделя (рис. 3.6). У цьому випадку його діаметр конструктивно не обмежений і може бути більше діаметра оброблюваного колеса; зручний монтаж і вивірка черв'яка; легко забезпечується можливість спостереження за ділильної парою і її регулювання. Жорсткість шпинделя забезпечується внаслідок великого його діаметра, що досягає половини діаметра оброблюваного колеса.

Конструкція ділильно-поворотного столу виробництва фірми HAAS [22] представлена на рис. 3.6.

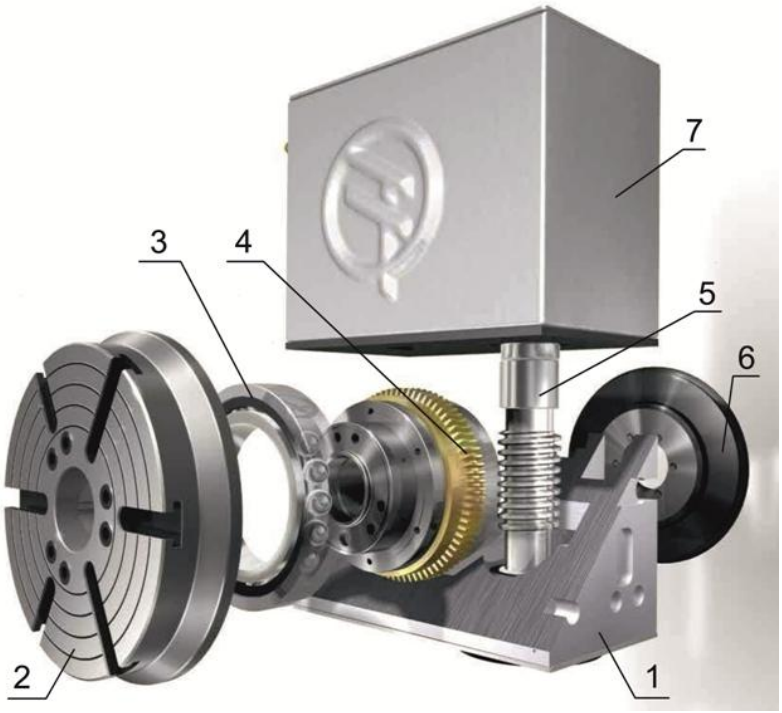


Рис. 3.6 Ділильно-поворотний стіл виробництва фірми HAAS, модель HRT

1 - основний корпус; 2 - поворотна планшайба; 3 – підшипники;
4 - черв'ячна передача; 5 - вал з черв'ячним приводом; 6 - гальмівні диски;
7 - корпус двигуна.

Компанія HAAS оснащує кожну вісь всіх вертикальних обробних центрів напрямними (рис. 3.7) з рециркулюючими кульками. Напрямні з рециркулюючими кульками (рис. 3.8, а) попередньо навантажуються для забезпечення нульового зазору між рухомими поверхнями і мають повну несучу здатність у всіх напрямках. Це підвищує жорсткість конструкції, в той же час забезпечуючи більш високу точність і надійність. Ці напрямні мають дуже малий коефіцієнт тертя, що дозволяє підвищити швидкість переміщень верстата, не погіршуючи повторюваність і точність. Змащування кожної направляючої відбувається автоматично. Вони споживають менше енергії, не вимагають регулювання і перевершують по точності й швидкості коробчасті напрямні ковзання. Для коробчастих напрямних (рис. 3.8, б) необхідний нульовий зазор між рухомими поверхнями. Для них також характерний високий коефіцієнт тертя, який створює стрибкоподібний рух, що може призвести до похибок верстата.

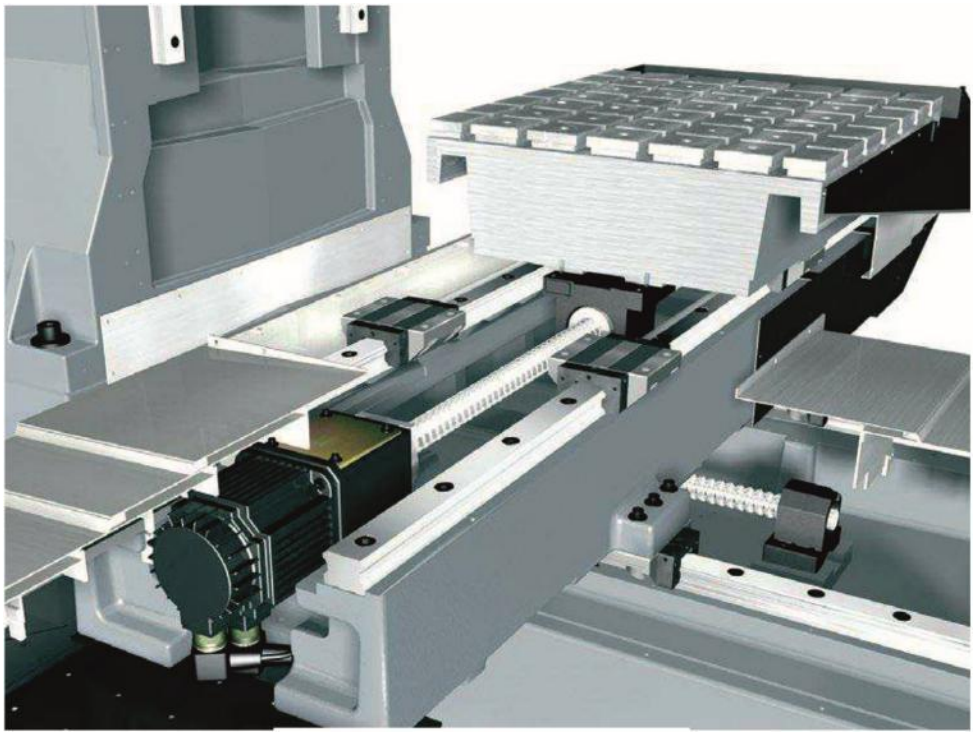
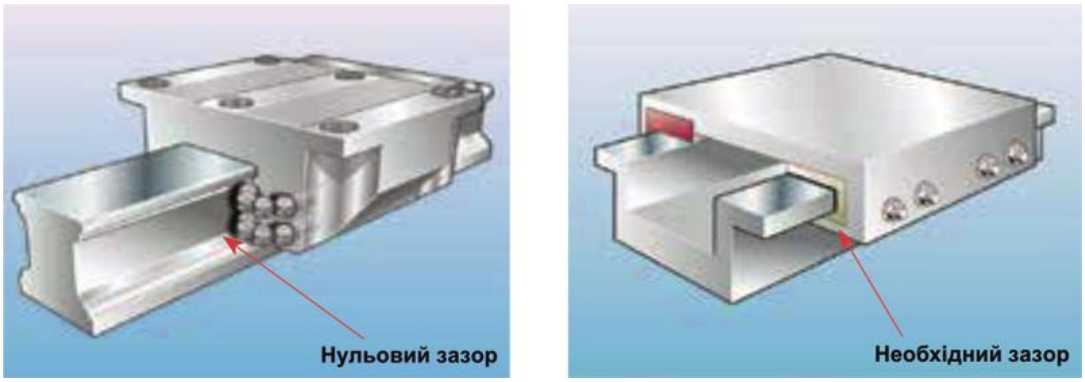


Рис. 3.7 Напрямні виробництва фірми HAAS



а) б)

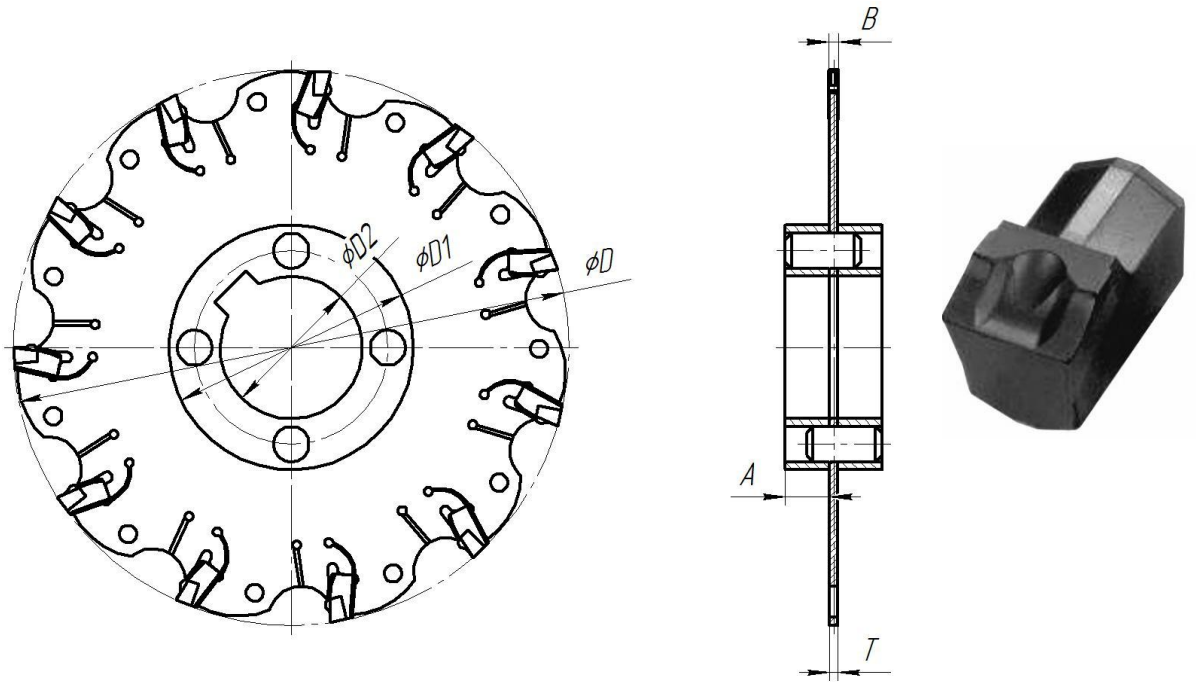
Рис. 3.8 Види напрямних

а) напрямна з рециркулюючими кульками; б) коробчаста напрямна.

3.4 Конструктивне виконання інструментів для здійснення контурного зубофрезерування

3.4.1 Конструктивне виконання інструментів для попереднього прорізання западин

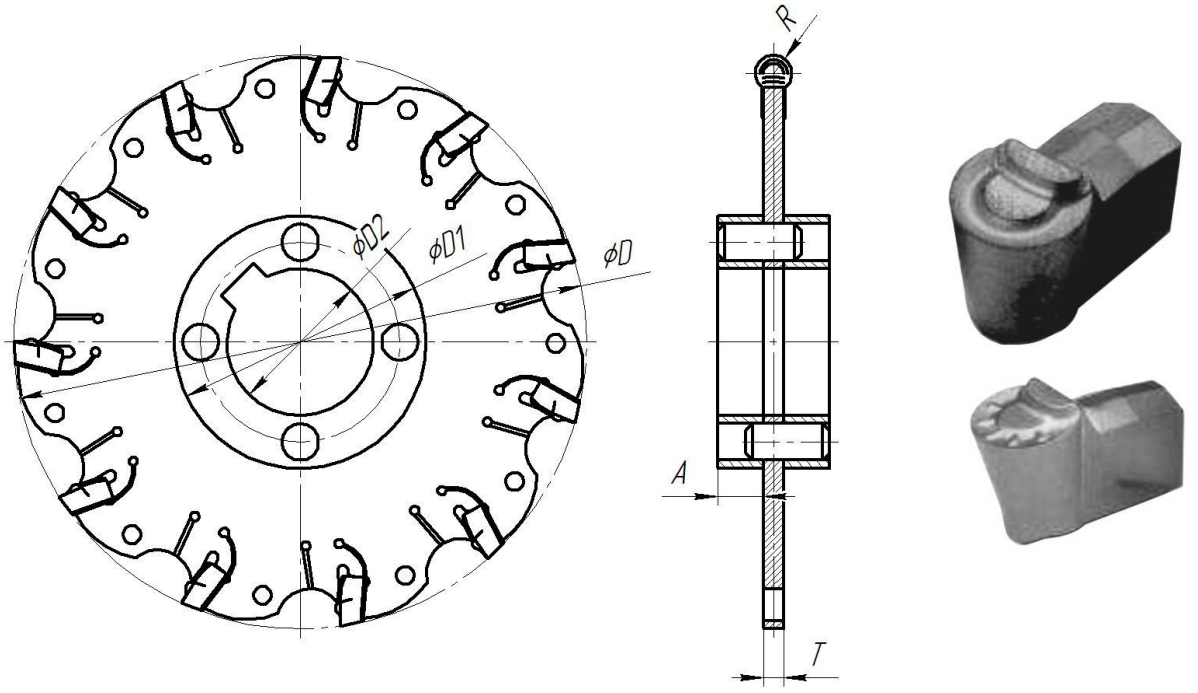
Для виконання попереднього прорізання впадин використовується комплект з трьох дискових фрез, зі змінними твердосплавними пластинами: двох крайніх підрізних (рис. 3.9) та центральної, що оброблює міжзубову западину (рис. 3.10).



а) б)

Рис. 3.9 Конструкція підрізної фрези

а) підрізна фреза; б) змінна пластина.
D – зовнішній діаметр; D1 – зовнішній діаметр ступиці; D2 – діаметр під оправку;
B – ширина різальної кромки; A – ширина піджимної шайби; T – товщина корпусу фрези.



а) б)

Рис. 3.10 Конструкція фрези для прорізання міжзубової западини

а) прорізна фреза; б) змінна пластина.
D – зовнішній діаметр; D1 – зовнішній діаметр ступиці; D2 – діаметр під оправку; R – радіус заокруглення різальної кромки; A – ширина піджимної шайби; T – товщина корпусу фрези.

3.4.2 Конструктивне виконання інструментів для кінематично-контурного зубофрезерування

Для виконання кінематично-контурного зубофрезерування використовується комплект з двох дискових фрез (рис. 3.11), зі змінними твердосплавними пластинами. Змінні пластини аналогічні рис. 3.9, б.

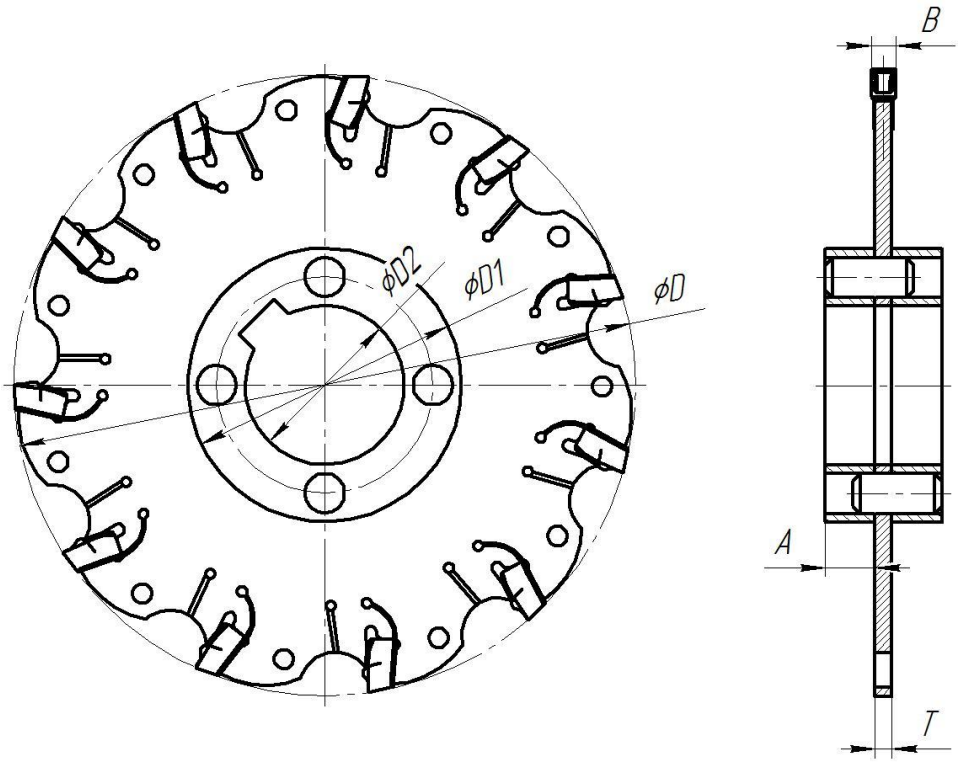


Рис. 3.11 Конструкція фрези для виконання кінематично-контурного зубофрезерування.

3.4.3 Конструктивне виконання інструментів для черв'ячно-контурного зубофрезерування

Для виконання черв'ячно-контурного зубофрезерування використовується інструмент, різальна кромка якого розміщена на гвинтовій лінії з кроком, який визначається по формулі:

$$\mathrm{P} = \pi \cdot m \cdot \cos\alpha.$$

Довжина різальної кромки визначається із можливості розміщення її в крайній точці западини зубця і в загальному випадку визначається відношенням:

$$B \approx 0{,}85m.$$

Зовнішній діаметр фрези приблизно рівний діаметру черв'ячної фрези для аналогічного модуля: $D = D_{\text{черв}}$.

Число зубців фрези приймається виходячи із можливості їх розміщення на гвинтовій лінії та зручності заточки.

Геометрія різальної частини:

- допоміжний кут в плані $\varphi_1 = 2 \dots 5°$;

- головний передній кут $\gamma = 5°$;

- головний задній кут $\alpha = 10°$.

Довжина гвинтової лінії: ≈1,5 оберта.

Заточка, переточка: по передній та задній поверхням.

Матеріал: швидкорізальна сталь HSS M2.

Конструкція черв'ячно-контурної фрези показана на рис. 3.12. Тривимірну модель фрези приведено на рис. 3.13.

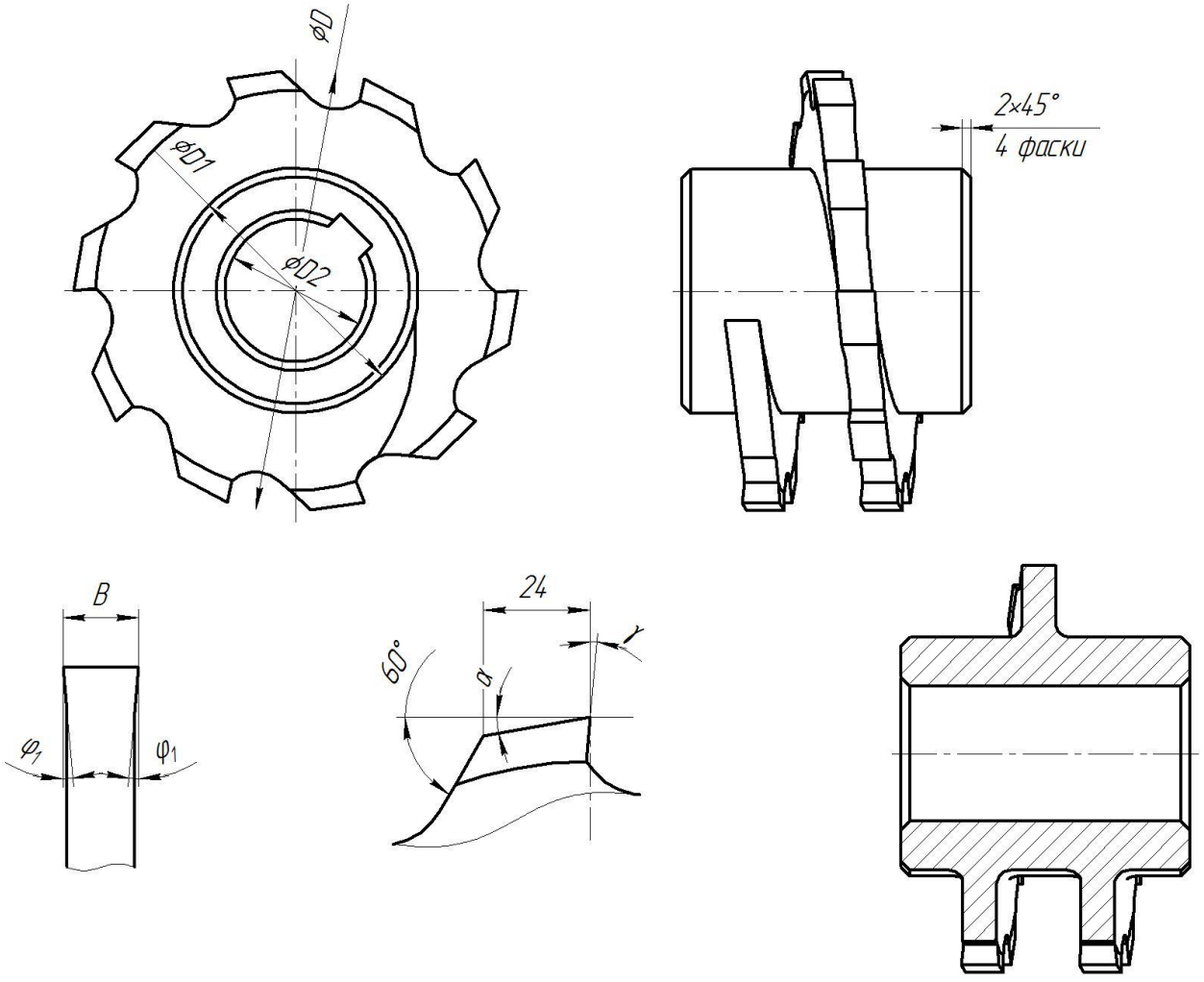


Рис. 3.12 Конструкція черв'ячно-контурної фрези.

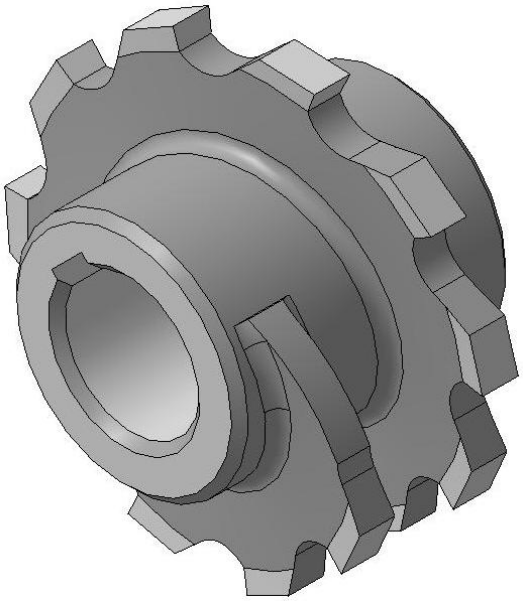


Рис. 3.13 Тривимірна модель черв’ячно-контурної фрези.

3.5 Висновки та рекомендації

У розділі, на основі порівняльного аналізу за 12 показниками компоновок зубообробних центрів, було визначено найдоцільнішу для здійснення обробки в умовах гнучких технологій: консольну прорізну - контурно-зубообробну. Запропонована компоновочна схема DnYXOwcCn реалізується, наприклад, на станині верстата BCM-206BM-13CNC. Зубообробний центр оснащується уніфікованими модулями від ведучих виробників металорізальних верстатів, зокрема: хрестові напрямні фірми HAAS, ділильний стіл фірми HAAS. Верстат оснащається двома незалежними електронними схемами синхронізації рухів обкату:

- для кінематично-контурної обробки;
- для черв’ячно-контурної обробки.

Рекомендації:

При проектуванні нових методів механічної обробки евольвентних поверхонь зубчастих коліс та зуборізного інструменту враховувати переваги запропонованих інструментів та компоновки.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ ЧЕРВ‘ЯЧНО-КОНТУРНОЇ ФРЕЗИ

4.1 Загальні вихідні дані

Для вирішення питання про економічну ефективність нової конструкції фрези [6] в якості бази для порівняння приймаємо спосіб обробки черв’ячного колеса на зубофрезерному верстаті моделі 53А80Н стандартною черв’ячною фрезою.

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	700	700
2.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1
3.	Потреба в інструменті	шт./рік	12	7
4.	Штучний час обробки деталі	хв.	21,75	32,95
5.	Площа, яку займає обладнання	$м^2$	5,04	5,04
6.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	12,5	12,5
7.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частин верстата	УРО	15/12	15/12
8.	Розряд роботи верстатника	розряд	4	4
9.	Оптова ціна: - обладнання - інструменту	 грн. грн.	 484000 67320	 484000 -

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.

4.2 Визначення витрат на підготовку виробництва

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

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot З^{к}_{сг} \cdot \left(1 + \frac{к_{д}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_{с}}{100}\right) + H_{в}, \qquad (4.1)$$

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

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

$З^{к}_{сг}$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

$к_{д}$ – додаткова заробітна плата конструктора, %;

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

$H_{в}$ – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$В_{пк} = 1 \cdot 18,9 \cdot 102,56 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 18,9 \cdot 102,56 \cdot \frac{45}{100} = 3492,31 \text{ грн.}$$

4.2.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{mex} \cdot З_{сг}^m \cdot \left(1 + \frac{к_д}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_в, \quad (4.2)$$

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

$З_{сг}^m$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$В_т = 1 \cdot 21,2 \cdot 101,41 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 21,2 \cdot 101,41 \cdot \frac{55}{100} = 3984,79 \text{ грн.}$$

4.3 Визначення собівартості та оптової ціни інструменту

4.3.1 Після визначення трудомісткості виготовлення проектної фрези розраховуємо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$З_{ор} = \sum_{i=1}^{n} C_{г_i} \cdot T_i, \quad (4.3)$$

де n – кількість i-тих видів робіт;

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

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$З_{ор} = 8,7 \cdot 92,015 = 800,53 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$Р_о = \sum_{i=1}^{n} З_{ор_i} \cdot \frac{П_{рр_i}}{100}, \quad (4.4)$$

де $П_{рр_i}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному i-му виду робіт за заводською калькуляцією.

в) цехові витрати:

$$K_{\text{цех}} = \sum_{i=1}^{n} З_{\text{ор}_i} \cdot \frac{П_{\text{цр}_i}}{100}, \quad (4.5)$$

де $П_{\text{цр}}$ – процент цехових витрат по кожному *і*-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$P_{\text{о}} = 800,53 \cdot \frac{280}{100} = 2241,49 \text{ грн.};$$

$$K_{\text{цех}} = 800,53 \cdot \frac{232}{100} = 1857,23 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат на виготовлення фрези

Види робіт	Трудомісткість робіт, н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $З_{\text{ор}}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, $В_{\text{о}}$, грн.		Загально-цехові витрати $К_{\text{цех}}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	1,1	3	92,015	101,22	245	247,98	132	133,61
Механічні	8,7	4	92,015	800,53	280	2241,49	232	1857,23
Термічні	1,5	3	102,716	154,07	285	439,11	250	385,19
Всього	11,3	-	-	1055,82	-	2928,58	-	2376,02

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

$$C_{\text{пов}} = M_{\text{о}} + M_{\text{д}} + E_{\text{тех}} + T_{р} + П_{\text{тех}} + З_{\text{ор}} + З_{\text{др}} + B_{\text{с}} + З_{\text{цп}} + P_{о} + K_{\text{цех}} + K_{\text{зав}} + B_{\text{ін}} + K_{пв}, \quad (4.8)$$

де $M_{\text{о}}$ – витрати на основні матеріали, грн. Розраховуємо за формулою:

$$B_{мо} = B_{чор} \cdot Ц_{м} - B_{відх} \cdot Ц_{відх}, \quad (4.6)$$

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

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

$$B_{мо} = 1,2 \cdot 450,0 - (1,2 - 0,95) \cdot 88 = 518,00 \ грн.$$

$М_д$ – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

$Т_р$ – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$Е_{тех}$, $П_{тех}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

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

$В_с$ – єдиний соціальний внесок (ЄСВ), грн.;

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

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

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

$К_{пв}$ – 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 за відрахуванням зворотних відходів	$М_о$		518,00
2.	Матеріали допоміжні	$М_д$	4,0% від $М_о$	20,72
3.	Транспортно-заготівельні витрати	$Т_в$	5% від ($М_о$ + $М_д$)	21,55
3.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}$, $Е_{тех}$	70,8% від $З_{ор}$	747,52
5.	Всього матеріальні витрати			1307,79
6.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.2	1055,82
7.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	105,58
8.	Відрахування на соціальні потреби (ЄСВ)	$В_с$	22% від ($З_{ор}$ + $З_{др}$)	255,51
9.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	12,2% від $З_{ор}$	128,81
10.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	$В_о$	табл. 4.2	2928,58
11.	Цехові витрати	$К_{цех}$	табл. 4.2	2376,02
12.	Загальнозаводські витрати	$К_{зав}$	221% від $З_{ор}$	2333,36
13.	Інші виробничі витрати	$В_{ін}$	3,4% від $З_{ор}$	35,90
14.	Виробнича собівартість	$С_{вир}$	Σ(7 ÷ 15)	10527,37
15.	Позавиробничі витрати	$К_{пв}$	1% від $С_{вир}$	105,27
16.	Повна собівартість	$С_{пов}$	$С_{вир}$+$К_{пв}$	10632,65
17.	Прибуток	$П_н$	20% від $С_{пов}$	2126,53
18.	Оптова ціна підприємства	$Ц$	$С_{пов}$+$П_н$	12760,00

4.3.2 Оптову ціну інструменту розраховуємо за формулою:

$$Ц_{опт}=С_{пов}+П_н, \quad (4.7)$$

де $П_н$ – нормативний прибуток, грн.

$$П_н = \frac{Р_с \cdot С_{пов}}{100}, \quad (4.8)$$

$Р_с$ – встановлений рівень рентабельності виробу, %.

$$П_н = \frac{20 \cdot 10632,65}{100} = 2126,53 \text{ грн.}$$

$$Ц_{опт} = 10632,65 + 2126,53 = 12760,0 \text{ грн.}$$

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:

$$B_е = \sum_{i=1}^{m} B_і, \quad (4.9)$$

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

$В_з$ – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальні потреби основних робітників, грн.;

$В_е$ – витрати на силову електроенергію, грн.;

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

$В_р$ – витрати на ремонт обладнання, грн.;

$В_п$ – витрати на утримання приміщення, грн.;

$В_{ір}$ – витрати на ріжучий інструмент, грн.;

$В_а$ – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальні потреби:

$$B_з = C_г \frac{T_{нор}}{60} \cdot (1 + K_д) \cdot (1 + K_с), \quad (4.10)$$

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

$K_д$, $K_с$ – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальне страхування відповідно.

$$B_{зп} = 92,015 \cdot \frac{11,207}{60} \cdot (1+0,1) \cdot (1+0,22) = 23,065 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$P_е = \frac{N_в \cdot K_о \cdot K_N \cdot K_д}{\eta_м \cdot \eta_с} \cdot \frac{T_{нор}}{60} \cdot Ц_{ел}, \quad (4.11)$$

де $N_в$ – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

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

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

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

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

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

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

$$B_{ел}^{пр} = \frac{12,5 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{11,207}{60} \cdot 18,1 = 10,6160 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{мв} = \frac{M_{гв} \cdot R_м \cdot T_{нор}}{60 \cdot 100} \cdot K_п, \quad (4.12)$$

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

$R_м$ – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$K_п$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $K_п$ = 1,0).

$$B_{дм}^{пр} = \frac{79,5 \cdot 15,0 \cdot 11,207}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 2,2271 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_{\text{р}} = \frac{R_{\text{м}} \cdot Г_{\text{вм}} + R_{\text{е}} \cdot Г_{\text{ве}}}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.13)$$

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

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

$$B_{\text{р}}^{\text{пр}} = \frac{15 \cdot 980 + 12 \cdot 790}{3680} \cdot \frac{11,207}{60} = 1,2273 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту:

$$B_{ір} = \frac{(S_u + p \cdot S_{пер}) \cdot \gamma \cdot T_{нор}}{t_e (p+1)} K_{вт}, \quad (4.14)$$

де S_u – первісна вартість різального інструменту, грн.;

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

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

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

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

$K_{вт}$ – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{ір}^{б} = \frac{(67320,0 + 24 \cdot 28,86) \cdot 0,45 \cdot 21,75}{30 \cdot (1+24)} \cdot 1,08 = 958,5701 \text{ грн.;}$$

$$B_{ір}^{пр} = \frac{(12760,0 + 30 \cdot 22,7) \cdot 0,45 \cdot 32,967}{60 \cdot (1+30)} \cdot 1,0 = 107,2039 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \quad (4.15)$$

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м^2;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [4];

C – річні витрати, пов'язані з утриманням 1 м^2 виробничого приміщення, грн./м^2.

$$B_{\text{уп}}^{\text{пр}} = \frac{5,04 \cdot 3,0 \cdot 11,208}{3680 \cdot 60} \cdot 788 = 0,5989 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_{\text{а}} = \frac{Ф_{\text{бал}} \cdot H_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \qquad (4.16)$$

де $H_{\text{а}}$ – норма амортизації, %;

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

Балансову вартість верстатів знайдемо за формулою:

$$Ф_{\text{бал}} = Ц_{\text{опт}} \cdot \left(1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\Ф}\right), \qquad (4.17)$$

де $Ц_{\text{опт}}$ – 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).

$$Ф_{\text{бал}} = 484000 \cdot \left(1 + 0,08 + 0,06 + 0,05\right) = 575960 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{пр} = \frac{575960 \cdot 20 \cdot 11,207}{3680 \cdot 60 \cdot 100} = 5,8487 \text{ грн.}$$

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	$B_з$	-	23,0650
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	-	10,6160
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	-	2,2271
4.	Ремонт обладнання	$B_р$	-	1,2273
5.	Універсальний ріжучий інструмент	$B_{ір}$	958,570	107,2039
6.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	-	0,5989
7.	Амортизація обладнання	$B_а$	-	5,8487
Загальна сума		$B_е$	958,570	150,787

4.5 Розрахунок показників економічної ефективності

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

$$E_{рв} = \left(Ц_{опт.пр} - C_{пов.пр}\right) \cdot П_в - E_н \cdot K_в, \quad (4.18)$$

де $Ц_{опт.пр}$, $C_{пов.пр}$ – відповідно оптова ціна та повна собівартість проектного інструменту, грн.;

$П_в$ – програма виробництва інструменту, шт./рік;

$E_н$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

$K_в$ – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_в = B_{пк} + B_т = 3492,31 + 3984,79 = 7477,10 \text{ грн.}, \quad (4.19)$$

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

$$\text{Е}_{\text{рв}} = \left(12760,0 - 10632,65\right) \cdot 7 - 0,16 \cdot 7477,10 = 13700 \text{ грн.}$$

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

$$E_{р.сп} = \left(B_е^б - B_е^{пр}\right) \cdot N_д - E_н \cdot K_{сп},$$

де $K_{сп}$ – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$K_{сп} = Ф_{бал}^{пр} \cdot Q_{пр} - Ф_{бал}^{б} \cdot Q_б + Ц_i^{пр} \cdot K_i^{пр} - Ц_i^{б} \cdot K_i^{б},$$

де $Ф_{бал}^{пр}$, $Ф_{бал}^{б}$ – відповідно балансова вартість проектних та базових верстатів, грн.;

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

Потребу в обладнанні визначаємо за формулою:

$$Q_р = \frac{N_д \cdot T_{нор}}{F_{дрм} \cdot 60 \cdot к_в}, \quad (4.20)$$

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

$к_в$ – коефіцієнт виконання норм (за даними підприємства).

Розрахункова кількість обладнання в проектному варіанті:

$$Q_{р.пр} = \frac{780 \cdot 32,95}{3680 \cdot 60 \cdot 1,01} = 0,12$$

,

приймаємо один верстат.

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

$Ц_i^{пр}$, $Ц_i^{б}$ – вартість інструменту відповідно в проектному та базовому варіантах;

$K_i^{пр}$, $K_i^{б}$ – потреба в інструменті відповідно в проектному та базовому варіантах.

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою:

$$K_i = \frac{N_д \cdot T_{нор} \cdot \gamma \cdot \kappa_{вт}}{t_e \cdot (1+p)}, \qquad (4.21)$$

Потреба у базовому інструменті:

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

Потреба у фрезах в проектному варіанті:

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

$$К_{сп} = 12760 \cdot 7 - 67320 \cdot 11 = -651200 \text{ грн.}$$

$$Е_{р.сп} = (958,570 - 150,787) \cdot 700 - 0,16 \cdot (-651200) = 670000 \text{ грн.}$$

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

$$Т_{ок.в} = \frac{К_в}{(Ц_{опт.пр} - С_{пов.пр}) \cdot П_в} = \frac{7477,10}{(12760,0 - 10632,65) \cdot 7} = 0,50 \text{ року}$$

(4.22)

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	Проект	Зміна, % (+,-)
1.	Потреба в інструменті:	шт./рік	11	7	-36,4
2.	Програма виробництва деталей	шт./рік	700	700	–
3.	Штучний час обробки деталі	хв.	21,75	32,95	+51,5
4.	Потреба в обладнанні	шт./рік	1	1	–
5.	Оптова ціна обладнання	грн.	484000	484000	–
6.	Повна собівартість фрези	грн.	–	10632,65	–
7.	Оптова ціна фрези	грн.	67320	12760	-81,0
8.	Собівартість одиниці обробки	грн.	958,57	150,79	-84,3
9.	Капітальні витрати на підготовку виробництва	грн.	–	7477,1	–
10.	Річний економічний ефект:				
	- у виробника	грн.	–	13700	–
	- у споживача	грн.	–	670000	–
11.	Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника	років	–	0,5	–

4.6 Висновки

Згідно проведених розрахунків, річний економічний ефект від використання черв'ячно-контурних фрез буде становити $E_{р.сп} = 670000$ грн., із строком окупності додаткових капітальних вкладень у виробника інструменту у $T_{ок.в} = 6$ міс.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі запропоновано вирішення актуальної науково-технічної задачі з розширення технологічних можливостей зубообробного центру з ЧПУ шляхом розробки оптимальної компоновки верстата та гнучкої зубообробної технології на принципово нових засадах формоутворення.

За результатами проведених досліджень зроблено наступні висновки:

1) Встановлено, що традиційна технологія черв'ячного зубофрезерування, попри свою універсальність, має суттєві обмеження через складну кінематику та важкі умови різання, що негативно впливає на точність обробки та ресурс інструменту. Технологічне відставання методу частково нівелюється впровадженням ЧПУ, проте потребує докорінної зміни схеми формоутворення.

2) Визначено специфіку умов зачеплення між фрезою та заготовкою. Доведено, що форма і інтенсивність зносу інструменту нерівномірна, що зумовлено схемою формоутворення в умовах неперервного обкату.

3) Запропоновано до реалізації нову гнучку технологію зубообробки на основі методів кінематично-контурного та черв'ячно-контурного зубофрезерування, які забезпечують умови вільного стружкоутворення та дозволяють використовувати інструменти простої форми. Моделювання підтвердило високу точність формоутворення евольвентного профілю та потенціал для забезпечення низької шорсткості поверхні.

4) На основі порівняльного аналізу 12 варіантів визначено найбільш доцільну компоновочну схему – консольно прорізну - контурно-зубообробну ($D_nYXOwcC_n$). Проект реалізується на базі станини верстата ВСМ-206ВМ-13CNC із використанням уніфікованих модулів HAAS.

5) Економічні розрахунки показали річний економічний ефект від впровадження черв'ячно-контурних фрез у споживача 670000 грн., у виробника 13700 грн., із терміном окупності капітальних вкладень у 6 місяців.

Результати роботи можуть бути використані при проектуванні нових зуборізних верстатів та інструментів, а також для впровадження гнучких технологій виготовлення зубчастих коліс на підприємствах машинобудування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Апаракін А.Р. Підвищення ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс за рахунок зміни схеми різання : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.03.01 "Процеси механічної обробки, верстати та інструменти" / Апаракін А. Р. – Кропивницький, 2021. – 262 с.

2. Бочков В.М. Сілін Р.І, Гаврильченко О.В. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів : Підручник / За ред. Сіліна Р.І. – Львів : Видавництво «Бескид Біт», 2008. – 448 с.

3. Громнюк, С.І. (2014). Розширення технологічних можливостей універсальних зубофрезерних верстатів введенням керованого приводу головного руху. Technology Audit and Production Reserves, 5(3(19), 23–27.

4. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. – Кропивницький: ЦНТУ, 2017. – 40 с.

5. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий світ-2000, 2011. – 422 с.

6. Організація виробництва на промислових підприємствах: Навч. посібник / за ред. Ю.А. Єгупова. - Одеса: Автограф, 2004. - 436 с.

7. Пат. 84471 Україна, МПК B23F 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.

8. Пат. 110741 Україна, МПК B23F 21/14, B23F 21/16, B23F 5/22. Спосіб фрезерування зубців циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № u 2014 07893; заявл. 14.07.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. №3.

9. Технологія механічної обробки на металообробних верстатах / Г.М. Стискін, М.П. Ревнівцев, В.В. Томашенко. М.М. Берізко. – К.: Техніка, 2005. – 512 с.

10. An innovative way of designing gear hobbing processes / F.Klocke, C. Gorgels, R. Schalaster, A. Stuckenberg. // Gear Technology. – 2012. – May. – P. 48–53.

11. Analysis of tool wear in face hobbing plunging manufacturing processes / Charalampos Alexopoulos, Jens Brimmers, Thomas Bergs. // 55th CIRP Conference on Manufacturing Systems. – 2022. – №107. – P. 1174–1179.

12. Big Gears, Better and Faster / William R. Stott // Gear Technology. – 2011. – January/February. – P. 37–44.

13. Claudin C. Effects of the edge quality on the tool life: application on gear hobbing / C. Claudin, J. Rech. // Proceedings of the 2nd International Conference «Innovative Cutting Processes & Smart Machining ». – Intercut. – 2008. – p. 18.

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

15. Deb S. Forces in gear cutting / S. Deb, A. Bhattacharyya. // Journal of the Institution of Engineers (India): Mechanical Engineering Division. – 1971. – №51. – P. 102–107.

16. Dimitriou V. Advanced Computer Aided Design Simulation of Gear Hobbing by Means of Three-Dimensional Kinematics Modeling / V. Dimitriou, N. Vidakis, A. Antoniadis. // Journal of manufacturing science and engineering. – 2007. – Vol. 129. – p. 911–918.

17. Dunaj P. Design and development of a lathe spindle with adjustable stiffness / P. Dunaj, B. Powalka, A. Archenti // Conference: euspen’s 25th International Conference & Exhibition. – 2025. – June. – p. 444-447.

18. 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.

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

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

21. Gleason – Hobbing & Milling tools [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.gleason.com/en/products/tools/cylindrical/hobbing-and-milling/hobbing-and-milling-tools.

22. HAAS – Rotary tables [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.haascnc.com/machines/rotaries-indexers/rotary-tables.html.

23. HAAS – Spindles for CNC Milling maschines [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.haascnc.com/productivity/spindles.html.

24. 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.

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

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

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

28. Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods / K. D. Bouzakis, E. Lili, N. Michailidis, O. Friderikos. // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2008. – №57. – P. 676–696.

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

30. Oerlikon - Oerlikon Balzers Coating Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.oerlikon.com/balzers/at/en/coating-guide/?selector%5Bnode%5D=8.

31. 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.

32. PVD Coating Explained: Benefits and Applications in Modern Industries [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://at-machining.com/pvd-coating-explained.

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

34. Schaeffler Industrial Drives - direct-drive rotary tables [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.

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

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

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

38. 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).

39. UCAM – Rotary tables [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://ucamind.com/products/direct-drive-rotary-table.

40. Yama Seiki - High Performance Spindle System [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.yamaseiki.com/yama_en/milling/vertical/af/spindle.htm.