

**Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»**

**НАВЧАЛЬНО - НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра технології машинобудування**

«На правах рукопису»
УДК – 621.9

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
Олександр Охріменко
(підпис) (власне ім'я, прізвище)
“ ” 2024 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

**за освітньо-науковою програмою «Технології машинобудування»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»**

на тему: Розробка дискової зуборізної фрези з непереточуваними
твердосплавними пластинами на базі гіперболоїда

Виконав:

студент б курсу, групи МТ-31мп

Руденко Олександр Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник зав. каф., д.т.н., проф. Охріменко О.А.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент доц. каф КМ, к.т.н., доц. Бесарабець Ю.Й.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально – науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра технології машинобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-науковою програмою «Технології машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр Охріменко

«___» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

_____ Руденко Олександр Олександровичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Розробка дискової зуборізної фрези з непереточуваними
твердосплавними пластинами на базі гіперболоїда

науковий керівник Охріменко О.А., д.т.н., проф.,
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «07» листопада 2024р. № 5000-с

2. Термін подання студентом дисертації «___» _____ 20__р.

3. Об'єкт дослідження дискові зубонарізні модульні фрези

4. Вихідні дані _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити _____

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу _____

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Особливості конструкцій дискових зуборізних фрез		
2	Профілювання зуборізних дискових фасонних фрез на базі гіперболоїда		
3	Проектування конструкції збірної зуборізної дискової фрези на базі гіперболоїда		
4	Технологія виготовлення корпусу збірної зуборізної дискової фасонної фрези на базі гіперболоїда		
5	Стартап проект для зуборізних дискових фасонних фрез на базі гіперболоїда		

Студент

Олександр РУДЕНКО

Науковий керівник

Олександр ОХРИМЕНКО

Анотація

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 131 – прикладна механіка – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ, 2024.

На основі аналізу проведеного дослідження, впливу параметрів вихідного інструментального контуру дискової модульної фрези, на формоутворення профілю зуба колеса, була запропонована удосконалена конструкція збірної дискової фрези із твердосплавними пластинами стандартної форми, із профілем, побудованим по твірній гіперболоїда. Був проведений розрахунок її геометричних параметрів, та був досліджений вплив на формоутворення зуба профіля на базі твірної гіперболоїда, що дало позитивний результат.

Ключові слова: зубчасті колеса, дискова фреза, твірна гіперболоїда, стандартні пластини.

Abstract

Dissertation in support of candidate for the Master's degree in the specialty 131 – applied mechanics – National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute of I. Sikorsky". - Kyiv, 2024.

Based on the analysis of the conducted research, the influence of the parameters of the initial tool contour of the disk modular milling cutter on the shaping of the wheel tooth profile, an improved design of a prefabricated disk milling cutter with regular-acting carbide plates, with a profile built on the hyperboloid generatrix, was proposed. Its geometric parameters were calculated, and the influence on the shaping of the profile tooth based on the hyperboloid generatrix was researched, which gave a positive result.

Keywords: gears, disk milling cutter, hyperboloid generatrix, regular-acting carbide plates.

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1. Особливості конструкцій дискових зуборізних фрез	8
1.1. Основні види обробки циліндричних зубчастих коліс	8
1.1.1. Метод копіювання	8
1.1.2. Метод обкатування	10
1.2. Конструкції дискових зуборізних фрез	12
1.2.1. Суцільні дискові фрези	13
1.2.2. Збірні дискові фрези	16
1.2.3. Дискові фрези SANDVIK COROMANT	18
1.2.4. Дискові фрези INGERSOLL Cutting Tools	21
1.2.5. Дискові фрези LMT FETTE Tools	24
1.2.6. Дискові фрези GLEASON CORPORATION	26
Розділ 2. Профілювання зуборізних дискових фасонних фрез на базі гіперболоїда	29
2.1. Розрахункова схема формоутворення зуборізних дискових фасонних фрез на базі гіперболоїда	29
2.2. Визначення відхилення профілю зубчастого колеса від евольвенти при його формоутворенні зуборізною дисковою фрезою на базі гіперболоїда	34
2.3. Аналіз похибок формоутворення профілю евольвентного зубчастого колеса зуборізними дисковими фасонними фрезами на базі гіперболоїда	37
Розділ 3. Проектування конструкції збірної зуборізної дискової фрези на базі гіперболоїда	43
3.1. Вихідні дані	43
3.2. Побудова моделі фрези	44
Розділ 4. Технологія виготовлення корпусу збірної зуборізної дискової фасонної фрези на базі гіперболоїда	59
4.1. Розрахунок припусків на механічну обробку	59
4.2. Вибір заготовки для виготовлення державки	63
4.3. Технологічний процес виготовлення корпусу інструменту	63
4.4. Розрахунок режимів різання	70
4.4.1 Режими різання при точінні, операція 010	71
4.4.2 Режими різання при свердлінні, операція 020	76
Розділ 5. Стартуп проект для зуборізних дискових фасонних фрез на базі гіперболоїда	79
Висновки	80
Додатки	81
Літературні джерела	99

ВСТУП

Актуальність теми. Дискові зуборізні фрези є невід'ємною частиною сучасного металообробного виробництва, забезпечуючи високу точність та ефективність обробки деталей складної форми, зокрема зубчастих передач. Актуальність обраної теми індивідуального завдання зумовлена постійно зростаючими вимогами до точності обробки металевих деталей у різних галузях промисловості, таких як автомобільна, авіаційна та машинобудівна. Незважаючи на значний прогрес у розвитку інструментів для металообробки, питання вибору оптимальних фрез та їх використання залишається актуальним і потребує подальшого дослідження.

Об'єктом дослідження є дискові зуборізні фрези, а **предметом** – їх конструктивні особливості, технологічні параметри, а також вплив змінних пластинок на ефективність обробки. Робота тісно пов'язана з численними науковими програмами та темами, що досліджують інноваційні технології в металообробці, зокрема з програмами, що спрямовані на підвищення продуктивності виробництв шляхом впровадження сучасних інструментів.

Мета роботи. Розробити дискову зуборізну фрезу із непереточуваними твердосплавними пластинами на базі гіперболоїда для формоутворення профіля зуба колеса (модуль $m = 10$ мм, кількість зубів $Z = 21$, коефіцієнт зміщення $x = 0$).

Задачі роботи

1. Дослідити формоутворення профілю зубчатого колеса із заданими параметрами за допомогою дискових зубчатих фрез.
2. Визначити вплив параметрів ріжучого інструменту на профіль западини зубчатого колеса.
3. Розробити конструкцію та побудувати у програмному середовищі модель збірної дискової фрези на базі гіперболоїда зі стандартними твердосплавними пластинами.

РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ КОНСТРУКЦІЙ ДИСКОВИХ ЗУБОРІЗНИХ ФРЕЗ

1.1. Основні види обробки циліндричних зубчастих коліс.

Зубчаті передачі використовуються для передачі руху і потужності між валами, що обертаються, що робить їх невід'ємною частиною широкого спектру машин і механізмів. Взаємне обертання коліс пари і передача крутного моменту відбувається завдяки зубчатому зачепленню. Кожне з коліс має зубчатий вінець із певною кількістю зубців зі спеціальним профілем (зазвичай, евольвентним), що відповідає параметрам роботи передачі. Відповідно, нарізування зубів є одним із фундаментальних технологічних

Нарізування зубів – один із фундаментальних технологічних процесів у виробництві зубчастих коліс. Залежно від форми і типу коліс підбирається метод формування зубчастих вінців, а також обладнання (верстати, ріжучі інструменти і т. д.). Наразі, найбільш поширеними методами обробки зубів є:

- *Копіювання* – формування западин між сусідніми зубами завдяки ріжучому інструменту, що заздалегідь має потрібну форму поперечного перерізу – тобто, “копіює” її з оброблюваної поверхні;
- *Обкатка (огинання)* – формування профіля зубів (западин між ними) завдяки імітації зачеплення. При цьому одним із елементів “пари” є сама заготовка, а іншим – ріжучий інструмент.

Розглянемо обидва методи більш детально на прикладі застосування зуборізного фрезерного інструменту.

1.1.1. Метод копіювання.

Згідно [1], суть цього методу полягає в тому, що різальним інструментом послідовно або одночасно формуються западини зубчастого колеса. Ключовим моментом є відповідність профілю інструменту поперечному перерізу цих западин.

Нарізати в такий спосіб зубчатий вінець можна на спеціальних верстатах, на деяких моделях універсальних верстатів, що мають механізм одиничного поділу, і іноді на фрезерних верстатах за допомогою ділильної головки. Нарізування зубчастих коліс в такий спосіб потребує використання двох типів ріжучих інструментів:

- Дискова модульна фреза;
- Пальчикова модульна фреза.

Дискові фрези стандартизуються для всього ряду модулів від 0,3 до 16 мм у певному діапазоні чисел зубів. Кожному модулю відповідає комплект фрез із 8, 15 або 26 штук для чисел зубів коліс, що нарізуються (від 12 і вище). При цьому кожна фреза, яка входить в конкретний набір, формує одразу кілька зубчатих вінців у певному, визначеному діапазоні чисел зубів.

Профіль різання фрези при цьому відповідає профілю западини колеса, що має найменшу кількість зубів для обраного діапазону. Саме для цього колеса вдається досягти 9-го ступеня точності, тоді як інші колеса в тому ж діапазоні уже матимуть похибки, які ростимуть пропорційно кількості зубів. Така ситуація є типовою для наборів із 8 фрез, що є найбільш уживаними. Збільшення точності виготовлення коліс таким методом, очевидно, потребує використання більших наборів фрез, наприклад, із 15 або ж 26 штук.

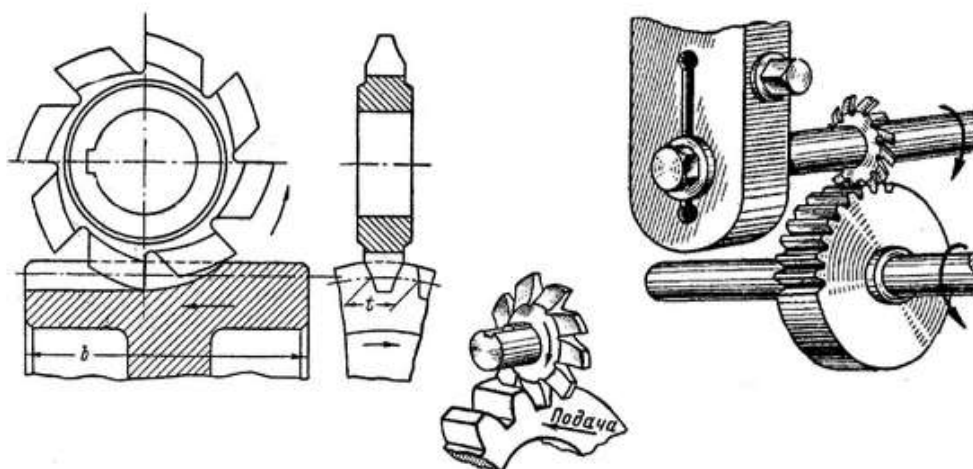


Рисунок 1.1. Схеми нарізування зубів методом копіювання дисковою модульною фрезою [2]

Як видно із рис.1.1 [2], в процесі різання дискова фреза обертається і одночасно здійснює поступальний рух вздовж осі колеса. Після проходження всієї товщини заготовки, фреза повертається у вихідне положення, а заготовка робить поворот на кут, що відповідає крокові зубів у вінці (t). Процес продовжується доти, доки заготовка не здійснить повний оберт навколо своєї осі.

Пальцеві модульні фрези застосовують для нарізування прямих, косих та шевронних зубів на заготовках зубчастих коліс великих модулів (більше 8 мм) в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва.

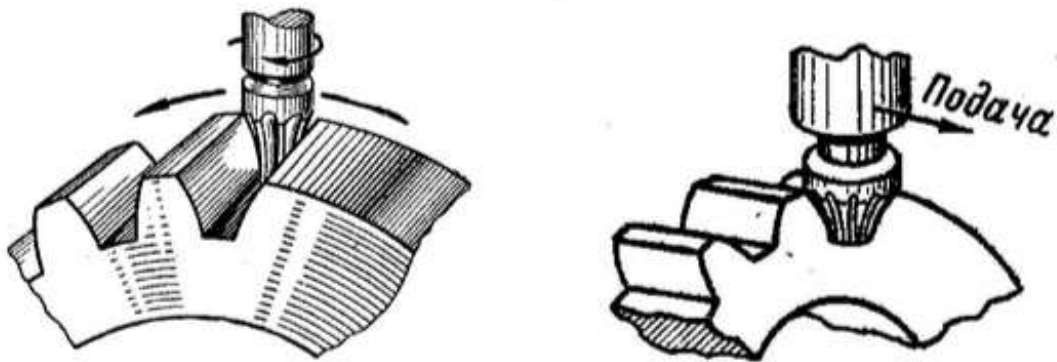


Рисунок 1.2. Схеми нарізування зубів методом копіювання пальцевою модульною фрезою [2]

Як видно із рис. 1.2 [2], пальцева фреза, як і дискова здійснює поступальний рух для формування западини між зубами на всю товщину заготовки. Основна відмінність – обертання у вертикальній, а не горизонтальній площині. Цей інструмент також стандартизується по номерам, але використовується для виготовлення коліс лише із зовнішнім зачепленням.

1.1.2. Метод обкатування.

Основною відмінністю від методу копіювання є формування западин в заготовці за рахунок імітації зубчатого зачеплення, а не повторення профілю. Як видно із рис. 1.3 [4], черв'ячна фреза і заготовка здійснюють обертальні рухи навколо своїх осей, імітуючи зубчате зачеплення. Залежно від

обладнання фреза також здійснює рух подачі, щоб поступово пройти всю товщину заготовки.

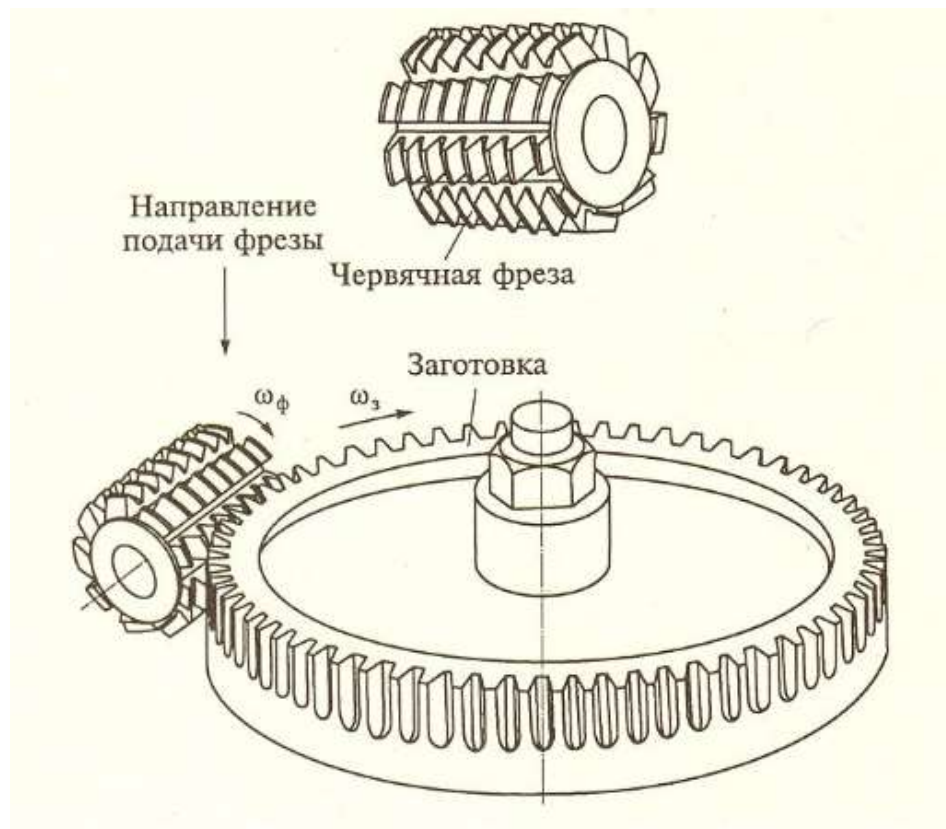


Рисунок 1.3. Схеми нарізування зубів методом обкатування черв'ячною фрезой [4]

Метод фрезерування двох- або трьохзахідними фрезами [3], як найбільш продуктивний, застосовується головним чином для чорнового нарізування, в той час як однозахідними фрезами роблять уже чистову обробку впадин. Черв'ячна фреза дозволяє значно розширити діапазон видів коліс і типів зубчатого зачеплення, які можна виготовити:

- циліндричні зубчасті колеса з прямими і косими зубами;
- черв'ячні зубчасті колеса, черв'яки;
- ланцюгові колеса.

В результаті взаємної обкатки фрези і колеса, що формується, а також поступального руху фрези вздовж заготовки, на останній утворюються прямі або косі зуби. Рух точно узгоджений із числом оборотів фрези: один оберт

ріжучого інструменту відповідає повороту заготовки на кут/число зубів, що рівне числу заходів черв'яка.

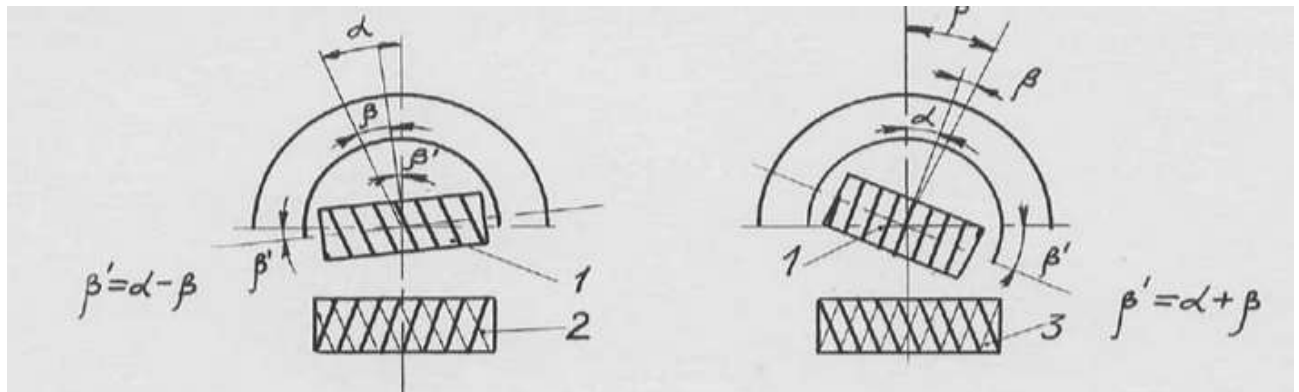


Рисунок 1.4. Схема установки червячної фрези при нарізанні зубчастих коліс [4]

Ще однією особливістю фрезерування зубів методом огинання, є необхідність правильного орієнтування осі інструменту під час його установки – див рис. 1.4. Фреза закріплюється в супорті, який повинен бути повернутий так, щоб вісь інструменту була нахилена під кутом підйому гвинтової лінії витків.

На відміну від попереднього методу, який має очевидні проблеми з точністю, обкатування поєднує [3] високу продуктивність із можливістю витримання 8-9 ступенів точності.

1.2. Конструкції дискових зуборізних фрез.

З розвитком металообробного зуборізного обладнання застосуванням верстатів з ЧПК, наприклад, GearSpect [9], TOS [10], Gleason [11], Liebherr [12], дискові зуборізні фрези отримали поширення для обробки крупномодульних зубчастих коліс модулем 10мм і більше. Всі дискові модульні фрези за способом формування ріжучої поверхні можна розділити на дві великі групи:

- Суцільні – ріжучі кромки (зуби) сформовані заодно із диском;

- Збірні – ріжуча поверхня виконана у вигляді змінних твердосплавних пластинок, які механічно кріпляться на ободі диска.

1.2.1. Суцільні дискові фрези.

Фреза конструктивно виглядає як металевий диск з евольвентним профілем зуба [6] на торці. Сам профіль регламентується стандартами [7]. Фрези для чорнової обробки мають нешліфовані зуби, на відміну від “чистових” аналогів. Крім того, чорнові фрези на робочому профілі часто мають розміщені у шаховому порядку канавки для подрібнення стружки (передній кут $\gamma = 4-10^\circ$, задній $\alpha = 10-15^\circ$). Чистові фрези не мають технологічних канавок і передній кут $\gamma = 0^\circ$.

Суцільні фрези випускаються стандартними комплектами із 8, 15 або 26 номерів [8] залежно від модуля і кількості зубів колеса. Залежність номера фрези від числа зубів відобразимо у таблиці 1.1 відповідно до [7].

Таблиця 1.1

Залежність номера фрези від числа зубів

Номер фрези		1	1½	2	2½	3	3½	4	4½	5	5½	6	6½	7	7½	8
Набір із 8 фрез	Кількість зубів колеса	12 - 13	-	14 - 16	-	17 - 20	-	21 - 25	-	26 - 34	-	35 - 54	-	55 - 134	-	135 і зубчата рейка
Набір із 15 фрез		12	13	14	15 - 16	18 - 19	19 - 20	21 - 22	23 - 25	26 - 29	30 - 34	35 - 41	42 - 54	55 - 79	80 - 134	

Обробка такими фрезами дозволяє на виході отримати колеса 9-10 ступеня точності. Розміри фрез повинні відповідати [7] – див. рис. 1.5.

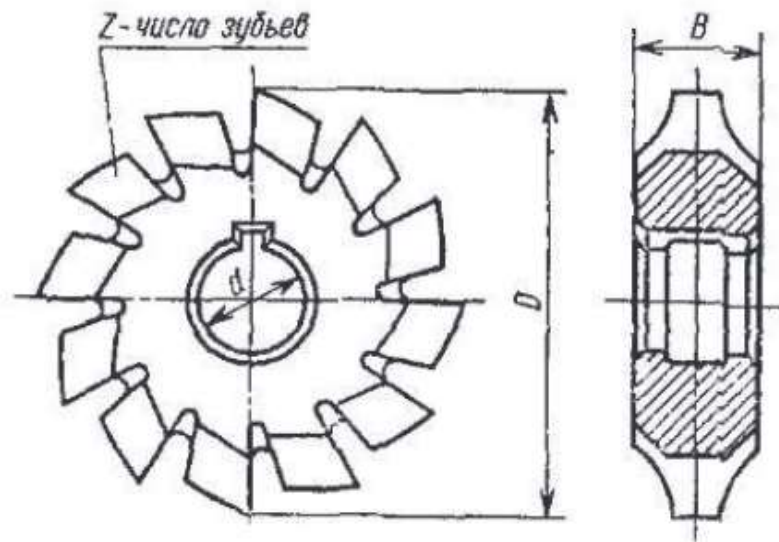


Рисунок 1.5. Основні розміри дискових модульних фрез [4]

Суцільні дискові модульні фрези зазвичай виготовляють із швидкоріжучих сталей марок P9K5, P9K10, P10K5Ф5, а в деяких випадках за погодженням допускається використання легованих сталей 9ХС, ХВГ, ХВСГ.

Серед закордонних варіантів дискових суцільних фрез можна виділити продукцію компанії Gleason:

- *Дискові суцільні твердосплавні фрези.* Цей варіант прекрасно себе зарекомендував за необхідності високошвидкісного фрезерування циліндричних зубчатих коліс. Матеріал і конструкція інструменту дозволяють ефективно виконувати задачі за відсутності або неможливості використання змащувально-оолоджувальних рідин, рейок, черв'ячних фрез.



Рисунок 1.6. Фрези Gleason суцільні твердосплавні [20]

- *Дискові суцільні фрези із швидкоріжучої сталі PM-HSS. Фрези із порошкової швидкоріжучої сталі (виготовлення методом спікання) мають високу однорідність структури, твердість і міцність, стійкість до вібраційних навантажень.*



Рисунок 1.7. Фрези Gleason суцільні із сталі PM-HSS [20]

1.2.2. Збірні дискові фрези.

Конструкція фрез із твердосплавними пластинами (збірних) суттєво не відрізняється від суцільних фрез із швидкорізальних сталей [5]. Порівняно з фрезами із швидкорізальних сталей посилюються допуски (на діаметри посадкових отворів, радіальне та торцеве биття).

Фрези також виготовляють у вигляді набору із 8 / 15 штук для певних діапазонів чисел зубів, що нарізуються. В якості матеріалу для виготовлення диска збірної фрези застосовують сталі 45, 40Х [6] та інші. Ріжуча поверхня виконується із пластинок з твердих сплавів, наприклад, ВК6М, ВК6, ВК8, Т5К10. Досвід застосування твердосплавних дискових фрез для виробництва дрібномодульних коліс показав доцільність створення аналогічного інструменту для обробки зубчастих коліс середніх та великих модулів на високих швидкостях різання [5]. У фрез, оснащених пластинками з твердих сплавів, профілі зубів виконують прямолінійними, з огляду на складність шліфування.

Згідно [5] фрези із твердосплавними ріжучими кромками можна розділити на чорнові і чистові. Конструктивно вони являють собою збірний або суцільний корпус на якому фіксуються пластинки.

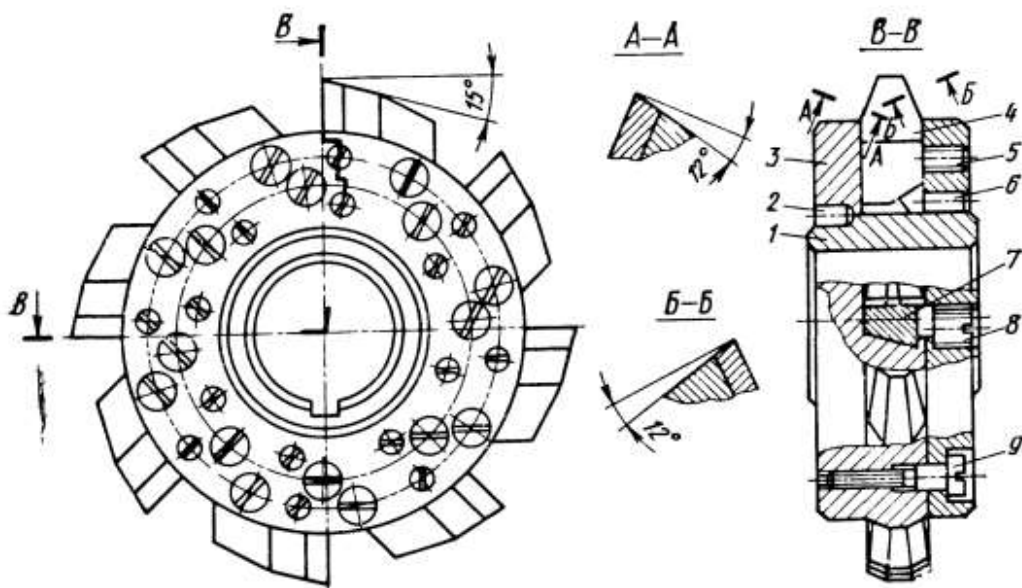


Рисунок 1.8. Дискова чорнова фреза з напаяними пластинами [5]

До прикладу, на рис. 1.7 показаний варіант збірної фрези, в якому ножі (4) встановлюються в пази базовому кільці (3) та фіксуються на корпусі (1). Схожа до неї і наступна конструкція (див. рис. 1.8) дворядної фрези.

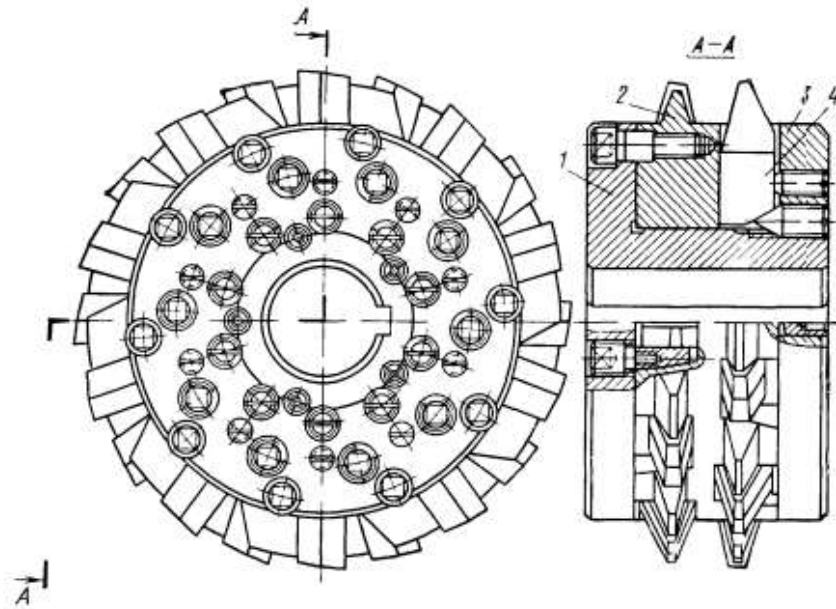


Рисунок 1.9. Диска дворядна чорнова фреза [5]

Такий інструмент можна застосовувати при виробництві коліс із числом зубів 30 і вище, що дозволяє скоротити практично вдвічі час обробки.

Варіант конструкції із більшим числом пластин показано на рис. 1.9 [5].

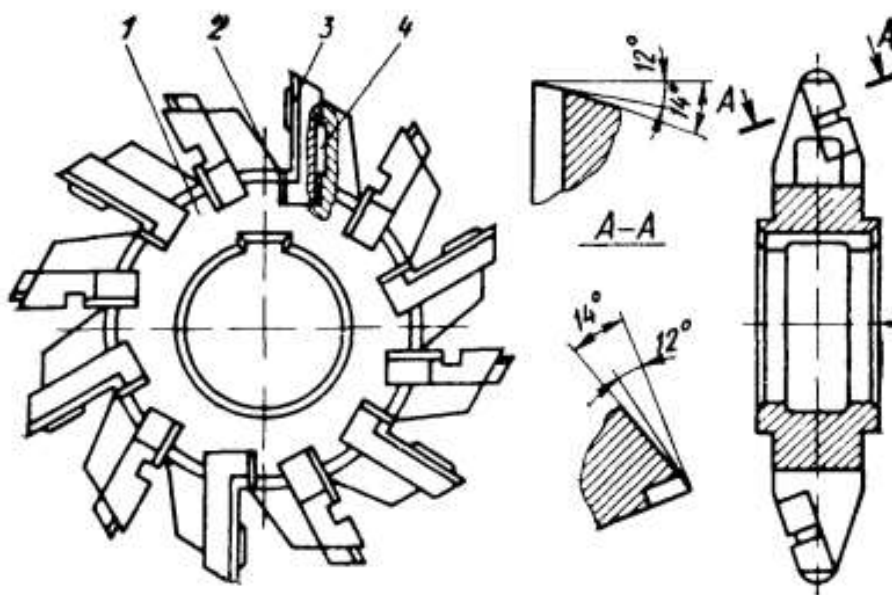


Рисунок 1.10. Диска фреза з шаховим розміщенням зубів [5]

Особливістю цієї фрези є одностороннє розміщення ножових пластин на зубі зі зміною робочої сторони у шаховому порядку. Фактично, це означає, один зуб обробляє, до прикладу, ліву поверхню западини колеса, а наступний за ним – праву і т. д.

У всіх конструкціях, які показані вище, ріжучі поверхні являються собою набір ножів із напаяними на них твердосплавними пластинами. Більшість сучасних дискових фрез використовують готові ріжучі пластинки, які фіксуються механічно на своїх посадочних місцях. Таке рішення очевидно збільшує складність, а отже, і вартість інструменту, але, разом і з тим, дає ряд конкурентних переваг:

- зношені пластини завжди можна замінити, зберігши при цьому сам корпус (диск);
- пластини мають різну форму, що в принципі дозволяє розширити діапазон використання інструменту;
- пластини стандартизовані по розміру, а отже споживач не прив'язаний до конкретного виробника.

На ринку є доволі широкий вибір сучасних виробників дискових фрез, тому є сенс розглянути їх продукцію більш детально.

1.2.3. Дискові фрези SANDVIK COROMANT

Шведська компанія, яка займається розробкою і виробництвом обладнання для обробки металу різанням і є одним із лідерів ринку в цьому сегменті [13]. Згідно галузевого каталогу компанії [14] для нарізання зубчатих вінців можна використати наступний інструмент:

- Фрези для обробки циліндричних зубчатих коліс із зовнішнім/внутрішнім зачепленням та шліців (CoroMill 161 – 177);
- Дискові модульні фрези для формування зубчатих рейок.

Для виготовлення коліс із внутрішнім зачепленням компанія пропонує чотири серії фрез, залежно від потрібного модуля: при значеннях $m < 8$ рекомендується використання фрез CoroMill 171 / 172, а при $m > 8$ – CoroMill 170/174.



Рисунок 1.11.. Фрези CoroMill 171 / 172 [14, ст. 14-15]

Легко монтуються практично в будь які обробні центри і верстати, дозволяючи виконувати повну обробку деталі за одну установку. Фрези серії CoroMill 171 дають можливість виготовити зубчаті колеса із модулем 0,8-3, а серія 172 – з модулем 3-10. Для з'єднання із шпинделем використовуються рішення Coromant Capto (швидкозмінний хвостовик) та традиційний отвір із шпоночним пазом.

Для обробки коліс із вищим значенням модуля (12-22) рекомендують фрезу серії CoroMill 170 (див. рис. 1.11). Це модульна збірна фреза зі змінними ріжучими пластинами, яка використовується для чорнової обробки профілю, близького до кінцевого. Кріплення на шпинделі здійснюється через отвір із шпоночним пазом діаметром 50-100 мм.

Фрези цієї серії також оптимізовані для чистової обробки евольвентних профілів зубчатих коліс із зовнішнім зачепленням, за рахунок шліфованих пластин, які адаптовані до профілю. Ці фрези дають можливість виготовляти зубчаті вінці із значенням модуля від 8 до 50 (див. рис. 1.12).



Рисунок 1.12.. Фреза CoroMill 170 (загальний вигляд і профіль) [14, ст. 16-17]



Рисунок 1.13. Фреза CoroMill 170 (евольвентний профіль) [14, ст. 18-19]



Рисунок 1.14.. Фреза CoroMill 174 [14, ст. 20-21]

Ще одним універсальним рішенням для виготовлення коліс із модулем 8-50 є серія фрез CoroMill 174 (див. рис. 1.13). Її перевага в тому, що одну фрезу можна використовувати для охопту цілого діапазону – достатньо лише замінити фасонні пластини. З'єднання зі шпинделем як і в попередніх серіях – через отвір під шпоночний паз 50-100 мм.

Ще одне цікаве рішення компанії стосується інструменту для обробки зубчатих рейок в діапазоні модулів 3,5-10 мм. Фактично це збірні фрези, які складаються (залежно від потреби) з двох і більше дисків на базі CoroMill 170 та CoroMill 172 (див. рис. 1.14).



Рисунок 1.15. Блок для зубчатих рейок на базі CoroMill 172 [14, ст. 22-23]

1.2.4. Дискові фрези INGERSOLL Cutting Tools

Компанія, яка займається виробництвом обладнання для металообробки і широко представлена, як в Європі, так і в Північній Америці. В переліку продукції є досить широкий вибір дискових та черв'ячних зуборізних фрез для коліс із зовнішнім та внутрішнім зачепленням, прямо-, косозубих та шевронних вінців [15]. Для ознайомлення із рішеннями компанії використаємо каталог [16] зуборізного обладнання та інструменту.

Фрези серії S-MAX BP IV для чорнової обробки зовнішніх і внутрішніх вінців із діапазоном модулів від 6 до 36. Точне розташування пластин для кожного окремого випадку забезпечує роботу фрези без вібрації. Ще однією особливістю є подвійна вставка, яка забезпечує плавний процес різання бокової частини зуба, що значно зменшує осьову силу.



Рисунок 1.16. Фреза S-MAX BP IV для чорнової обробки [16, ст. 10]

В нових моделях цих фрез реалізовано внутрішню дискову систему подачі охолоджуючої речовини (повітря або емульсія). Така конструкція запобігає перегріву диска та ріжучих пластин, подовжуючи термін їх служби.

Фрези для чистової обробки зовнішніх та внутрішніх зачеплень виробляються із використанням вінців з двох- та чотирьогранним лезом. Для фінішної обробки у всьому світі застосовуються інструменти опуклої (внутрішнє зубчасте виготовлення) або увігнутої (зовнішнє зубчасте виготовлення) форми. Інструменти, а також пластини знаходяться в межах дуже малого поля допусків для досягнення необхідної точності.



Рисунок 1.17. Фреза для чистової обробки [16, ст. 14-16]

Як і у випадку із фрезами для чорнової обробки в новітніх серіях присутня реалізація технології внутрішньодискової подачі охолоджуючої емульсії. Переваги цієї конструкції Ingersoll відображаються в більш тривалому терміні служби інструменту, покращеній обробці поверхні, меншому виділенні тепла на компоненті, а також у зниженні витрат на ріжучий матеріал.

На рис. 1.17 – 1.18 показані шестерні для чистової обробки зовнішніх і внутрішніх вінців при використанні схеми із 2-х і 4-лезовим зубчатим вінцем. Перша серія фрез дозволяє обробку вінців із діапазоном модулів від 6 до 22. Серія із 4-гранним лезом має діапазон обробки по модулю від 6 до 18.



Рисунок 1.18. Фрези для чистової обробки внутрішніх (зліва) і зовнішніх (справа) зубчатих вінців із 2-гранним лезом [16, ст. 17, 18]



Рисунок 1.19. Фрези для чистової обробки внутрішніх (зліва) і зовнішніх (справа) зубчатих вінців із 4-гранним лезом [16, ст. 20, 22]

1.2.5. Дискові фрези LMT FETTE Tools

Німецька компанія, заснована 1908 року, яка є одним із світових лідерів у виробництві фрезерувального обладнання та інструменту [17]. В категорії зуборізання асортимент доволі широко представлений різноманітними черв'ячними модульними фрезами, проте є також і дискові варіанти: візьмемо для порівняння каталог інструменту компанії [18].

Дискові фрези для чорнової обробки зубчатого вінця. Конструктивно виконані по типовій схемі із диском та змінними твердосплавними пластинами.

Залежно від типорозміру фрези, використовуються різці різної форми (прямокутні, ромбічні, квадратні) із кількістю ріжучих кромок від 4 до 8. Інструмент дозволяє виготовляти зубчаті вінці в діапазоні модулів від 6 до 36.

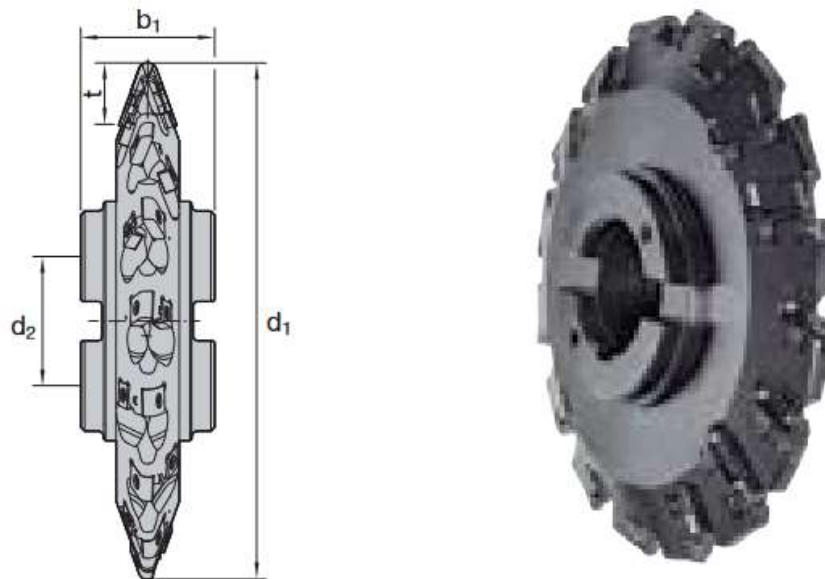


Рисунок 1.20. Фрези дискові LMT FETTE для чорнової обробки [18, ст. 96]

Зовнішній діаметр фрези, залежно від модуля, коливається в межах 220...500 мм. Схема фіксації на валу – через циліндричний отвір діаметром 60...100 мм.

Однією із особливостей цих модульних фрез є можливість використання диска із різного профілю пластинками, здійснюючи як чорнову, так і чистову обробку западин. Залежність між використанням чорнових, адаптованих чорнових, чистових пластин і якості поверхні западини можна бачити на рис. 1.20.

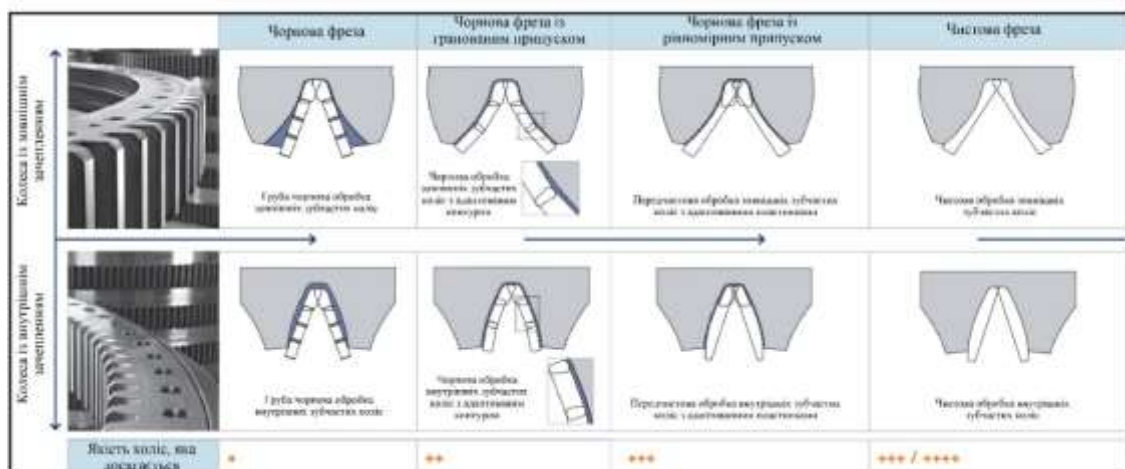


Рисунок 1.21. Якість поверхні колеса в залежності від типу використаних ріжучих пластинок LMT FETTE [18, ст. 92,93]

Профіль для чорнових фрез набирається з пластин простої форми, оскільки це дешевше. Для чистових набір йде із пластин евольвентного фасонного профілю, які дають більшу точність, але коштують дорожче ніж звичайні.

1.2.6. Дискові фрези GLEASON CORPORATION

Компанія, яка також є одним із світових лідерів у виробництві фрезерувального обладнання та інструменту. Їх продукцією та технологічними рішеннями всі галузі зубообробки, від високоточних зубчастих коліс для електроінструменту та медицини, трансмісій автомобілів та вантажівок, до найбільших зубчастих коліс для вітроенергетичних турбін та гірничого обладнання [19].

Серед асортименту дискових зуборізних фрез [20] можна виділити *модульні фрези Gleason OPTI-CUT* із ріжучою поверхнею зі змінних твердосплавних пластин. Широко застосовуються великому серійному виробництві при обробці зубчастих коліс великого розміру.



Рисунок 1.22. Фрези Gleason OPTI-CUT [20]

З огляду на всі вище приведені аргументи, є очевидні переваги використання змінних твердосплавних пластин для дискових фрез, особливо для чорнової обробки поверхонь зубів. Тим не менш, для чистових фрез профіль пластин повинен бути фасонним, що підвищує вартість інструменту. Проте відомі конструкції зуборізних пальцевих фрез на базі гіперболоїда, де криволінійний профіль фрези, що заміняє евольвентний фасонний профіль. Згідно з матеріалами наукової статті [21], профіль формується за рахунок установки різальних прямолінійних пластин вздовж твірної гіперболоїда, що додатково дозволяє підвищити точність профілю зубчастих коліс що отримуються.

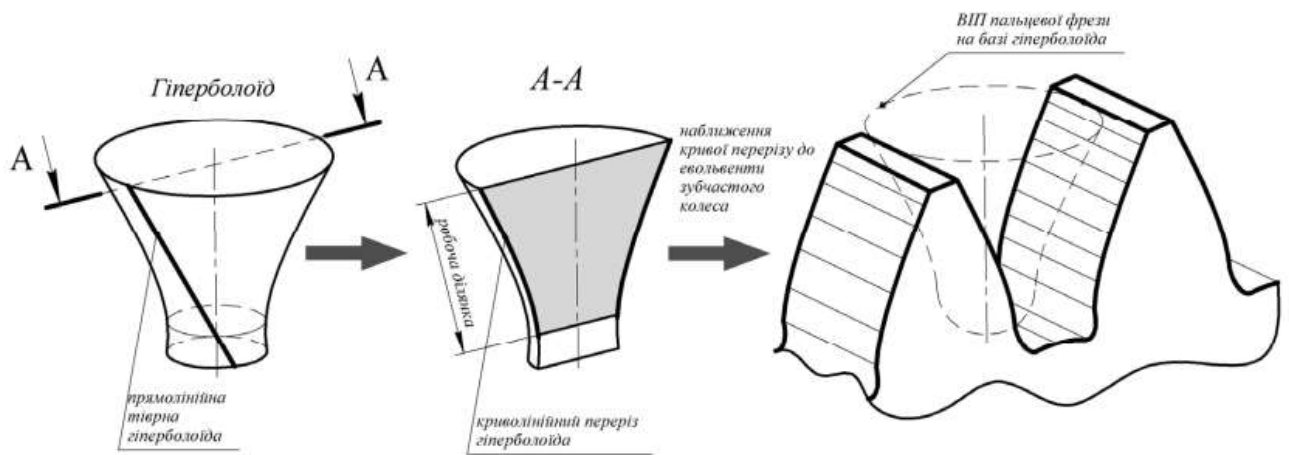


Рисунок 1.23. Утворення ВПП пальцевої фрези на базі гіперболоїда [21]

Основна задача цього підходу полягає у правильному позиціонуванні уявного гіперболоїда при якому він матиме мінімальне відхилення від реального профілю западини – евольвенти. В результаті проведених досліджень і розрахунків, автор статті пропонує розмістити різучі пластинки вздовж твірних гіперболоїда таким чином, щоб повністю перекрити профіль западини



Рисунок 1.24. Запропонована конструкція пальцевої модульної фрези [21]

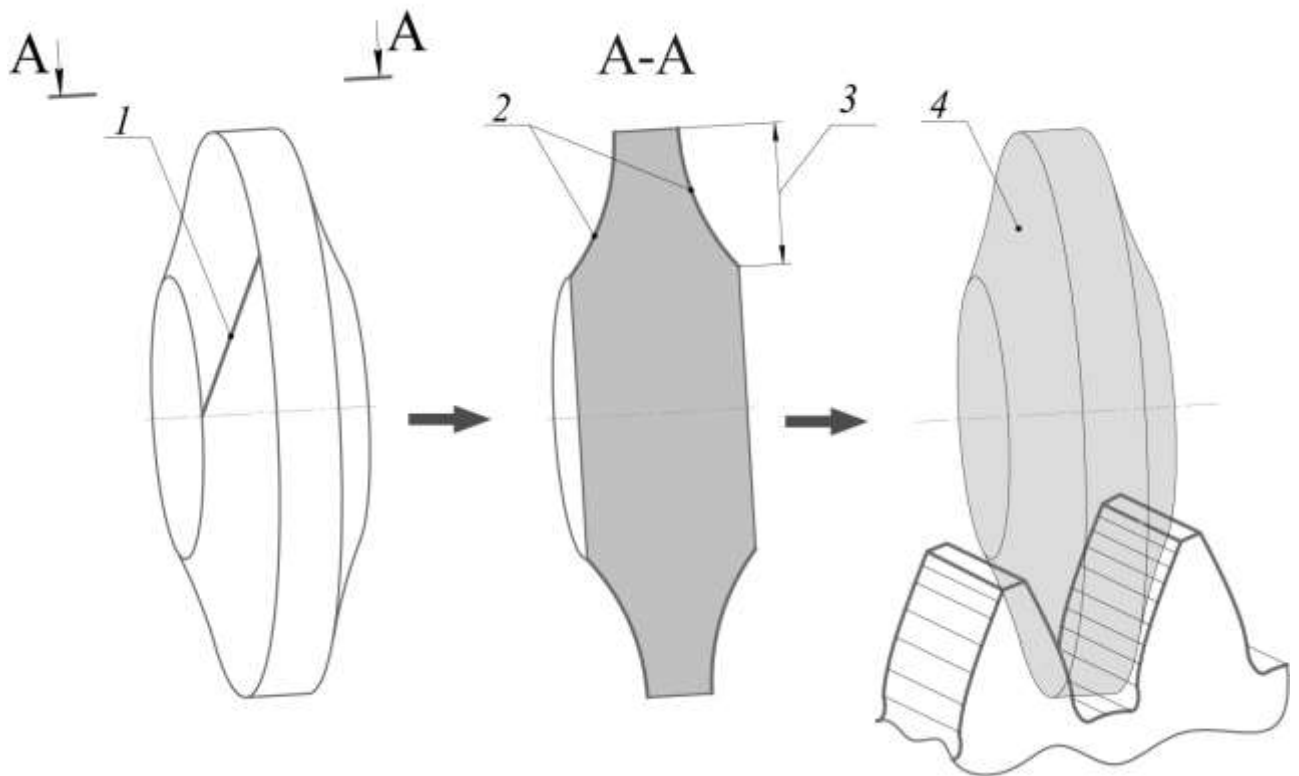
Подібна задача (профілювання) для дискових зуборізних фрез на базі гіперболоїда не вирішувалась, тому основне завдання в роботі, які потрібно вирішити це:

- розробити методику профілювання зуборізних дискових фасонних фрез на базі гіперболоїда;
- розробити конструкцію збірних зуборізних дискових фасонних фрез на базі гіперболоїда;
- розробити технологію виготовлення корпусу збірної зуборізної дискової фасонної фрези на базі гіперболоїда;
- розробити стартап проект на запропоновану конструкцію фрези.

РОЗДІЛ 2. ПРОФІЛЮВАННЯ ЗУБОРІЗНИХ ДИСКОВИХ ФАСОННИХ ФРЕЗ НА БАЗІ ГІПЕРБОЛОЇДА

2.1. Розрахункова схема формоутворення зуборізних дискових фасонних фрез на базі гіперboloїда.

Цю задачу можна вирішити спробувавши в якості вихідної інструментальної поверхні (ВІП) таких фрез будемо використовувати лінійчаті поверхні твірні, яких є прямою лінією і може бути утворена різальною кромкою НТП прямолінійної форми і в осьову перерізі такі поверхні мають криволінійну форму, яка наближається до евольвентної кривої, одним із таких є поверхня однополосного гіперboloїду (рис.2.1).



*Рисунок.2.1. Утворення ВІП дискової модульної фрези на базі гіперboloїда:
1-прямолінійна твірна гіперboloїда, 2- криволінійний осьовий переріз гіперboloїда, 3-робоча ділянка гіперboloїда, 4-утворена ВІП гіперboloїда.*

Основним завданням є розробка методики та визначення параметрів однополосного гіперboloїду осьовий переріз якого мав би мінімальні відхилення від евольвенти при його заміні ВІП дискової модульної фрези.

Для вирішення даної задачі була запропонована наступна розрахункова схема визначення параметрів ВІП пальцевої фрези зі змінними, що потрібно визначити (рис.2.2).

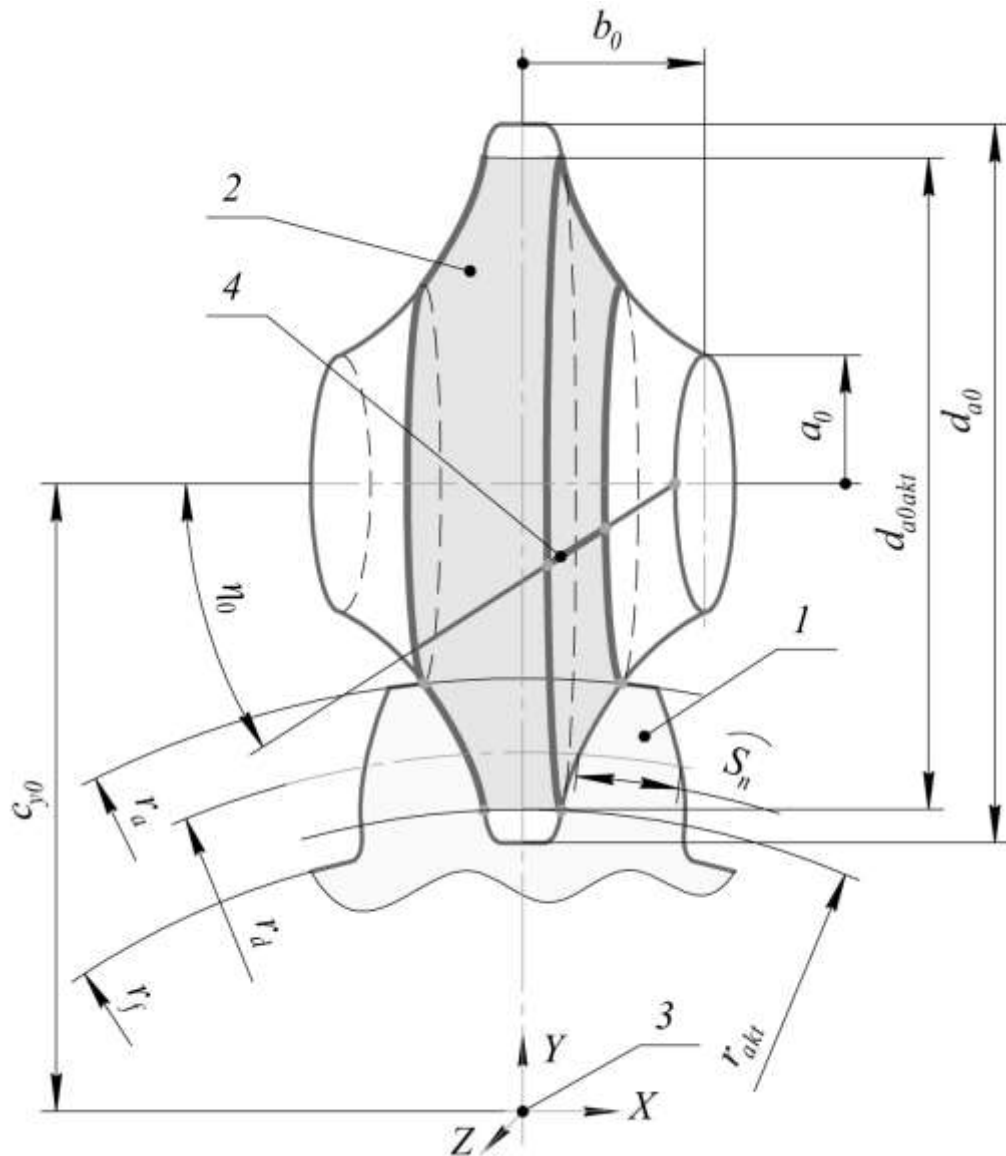


Рисунок.2.2. Розрахункова схема визначення параметрів ВІП пальцевої фрези на базі гіперболоїда: 1- зубчасте колесо, 2-поверхня гіперболоїда, 3-вісь зубчастого колеса, 4-прямолінійна твірна гіперболоїда.

На схемі наведеної на рис.2.2 в системі координат $S(X, Y, Z)$, яка віссю Z співпадає з віссю зубчастого колеса, вісь X паралельна осі фрези і вісь Y є лінією симетрії западини зубчастого, тоді основними вхідними параметрами є: параметри зубчастого колеса: m - модуль, Z_k - кількість зубів колеса, a_n - кут вихідного контуру зубчастого колеса, x - к-нт зміщення, ΔS - величина

зменшення товщини зуба колеса на ділильному діаметрі, звідки розрахунковими параметрами профілю зуба колеса є: r_a – діаметр вершин зубів колеса, r_{akt} – значення радіуса кінцевої точки евольвенти, що потім переходить в перехідну криву зуба, r_d – ділильний радіус колеса, S_n – товщина зуба на ділильному колі r_d , r_f – радіус западин колеса [5]. Розрахункові параметри ВПП пальцевої фрези є (рис.2.2): a_0 – радіус горловини гіперболоїда, b_0 – зміщення площини розташування перерізу горловини гіперболоїда відносно лінії симетрії западини зубчастого колеса, вісь Y, η_0 – кут нахилу твірної гіперболоїда до його осі, c_{y0} – величина зміщення осі фрези відносно осі зубчастого колеса (міжосьова відстань), d_{a0} – діаметр вершин зубів дискової фрези, d_{a0} – найбільший діаметр активної частини дискової фрези що формує заміняючий евольвентний профіль зубчастого колеса.

Основна задача полягає у визначенні таких оптимальних параметрів ВПП фрези: a_0 , b_0 , η_0 , для яких відхилення кривої осьового перерізу ВПП фрези в площині XY було би мінімальне на ділянці профілю зуба, що обмежена значеннями радіусів $r_{akt} \dots r_a$.

Для визначення заданих параметрів спочатку необхідно записати рівняння евольвентної кривої та рівняння перехідної кривої зуба колеса, що обмежує евольвентну криву для цього використаємо залежності описані в [23]:

- евольвентна крива;

$$\begin{aligned} w &= (0,5\pi m - 2m \operatorname{tg} \alpha_n + \Delta S) / (2r_d); \Theta = \operatorname{tg} \alpha_n - \alpha_n; w_0 = w - \Theta; \\ w_y &= w_0 + \operatorname{tg}(\arccos(r_b / r_i)) - \arccos(r_b / r_i); \\ x_e &= r_i \sin(w_y); y_e = r_i \cos(w_y); \end{aligned} \quad , \quad (2.1)$$

де: x_e , y_e – координати точок кривої евольвенти зуба колеса, r_b – радіус основного кола колеса, r_i – радіус точки, що розглядається, який змінюється в межах від r_{akt} до r_a .

- *перехідна крива* визначається, як крива лінія що утворена рейковим інструментом по схемі формоутворення кочення початкової прямої по початковому колу і визначається, як траєкторія руху вершини рейки, що формоутворює задане зубчасте колесо [23]:

$$\begin{aligned} Y_A &= -1.25m + xm; X_A = (0,5\pi m - 2mx \operatorname{tg} \alpha_n + \Delta S) / 2 - (1.25m - xm) \operatorname{tg} \alpha_n; \\ x_p &= (X_A + r_d t) \cos t - (Y_A + r_d) \sin t; y_p = (X_A + r_d t) \sin t + (Y_A + r_d) \cos t; \end{aligned} \quad (2.2)$$

де: x_p, y_p – координати перехідної кривої зуба колеса, t – кут повороту зубчастого колеса при формуванні перехідної кривої реєчним інструментом.

Сумісне вирішення рівнянь (2.1) та (2.2) дає змогу визначити точку перетину кривої евольвенти (2.1) та перехідної кривої (2.2) і значення r_{akt} радіус кінцевої точки евольвенти (рис 2.3).

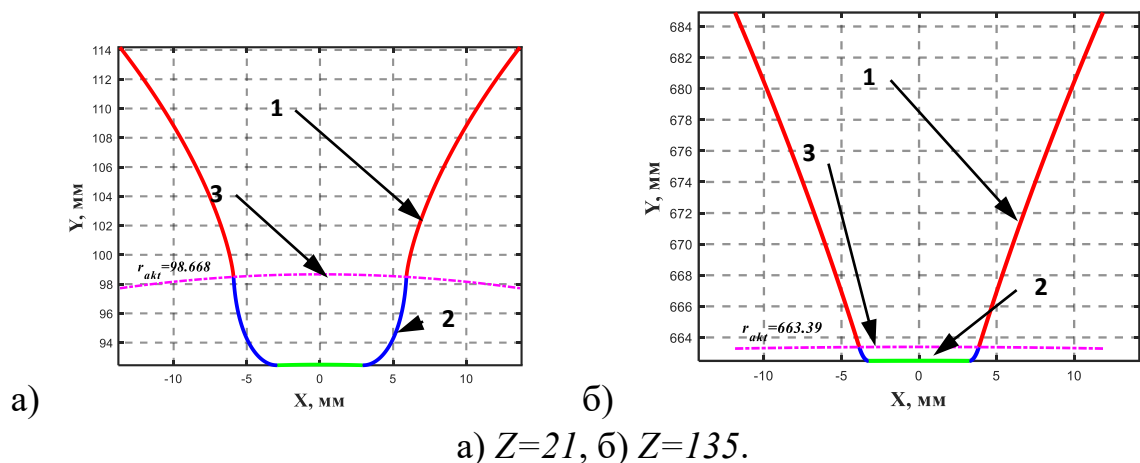


Рисунок.2.3. Профіль западини зубчастого колеса з радіусом кінцевої точки евольвенти $m=10$, $\alpha_n=20^\circ$, $x=0$, $\Delta S=0$: 1-евольвентна крива, 2-перехідна крива западини, 3- радіус граничної точки евольвентної кривої.

Так як задача симетрична, то розв'язувати будемо її відносно правої сторони зуба тоді рівняння поверхні гіперболоїда, що її обробляє запишеться наступним чином відповідно до схеми наведеної рис.2.2:

$$\begin{aligned} X_G &= -c_0 u + b_0 \\ Y_G &= a_0 \cos t_1 + a_0 u \sin t_1 + c_{y0} \\ Z_G &= -a_0 \sin t_1 + a_0 u \cos t_1 \\ \operatorname{tg} \eta &= a_0 / c_0 \end{aligned} \quad , \quad (2.3)$$

де: x_G, y_G, z_G – координати точок поверхні гіперболоїда, u – параметр, що відповідає за положення точки на твірній гіперболоїда, t_l – параметр, що відповідає за кутове положення твірної відносно осі гіперболоїда.

Розрахунок значення c_{y0} міжосьової відстані проводимо за наступною залежністю:

$$c_{y0} = r_f + 0,5d_{a0} \quad , \quad (2.4)$$

Для визначення відхилень від евольвентного профілю потрібно записати рівняння осьового перерізу гіперболоїда, що описується рівнянням (3):

$$\begin{aligned} X_{G0} &= -c_0 u + b_0; \\ Y_{G0} &= (c_{y0} + a_0 (-u^2 + \sqrt{1 + u^2})) / \sqrt{1 + 2u^2} \end{aligned} \quad , \quad (2.5)$$

де: x_{G0}, y_{G0} – координати точок кривої осьового перерізу гіперболоїда.

Задача зводиться до порівняння відхилень між точками x_e, y_e координати точок кривої евольвенти зуба колеса та x_{G0}, y_{G0} координатами точок кривої осьового перерізу гіперболоїда в межах робочої ділянки зуба колеса, яка описується радіусами від r_{akt} до r_a і знаходження таких параметрів поверхні гіперболоїду a_0, b_0, c_0 – при яких відхилення двох кривих будуть мінімальні. При порівнянні двох профілів необхідно координати точок, що порівнюються приводити до положення коли вони мають одне значення координати Y точки осьового перерізу гіперболоїду (рис.2.4), що описуються рівнянням (2.4) і залежать від параметру u приводяться до цього значення за наступною залежністю:

$$u = \sqrt{(c_{y0} - Y_{E1} + a_0)(c_{y0} - Y_{E1} - a_0)} / a_0 \quad , \quad (2.6)$$

2.2. Визначення відхилення профілю зубчастого колеса від евольвенти при його формоутворенні зуборізною дисковою фрезою на базі гіперболоїда.

Для знаходження відхилення профілю ВПІ утвореної гіперболоїдом від евольвентного профілю пропонується наступний алгоритм розв'язку цієї задачі

- задаємося основними параметрами зубчастого колеса: m - модуль, Z_k - кількість зубів колеса, a_n - кут вихідного контуру зубчастого колеса, x - к-нт зміщення, ΔS - величина зменшення товщини зуба колеса на ділильному діаметрі;
- задаємося основним параметрами дискової фрези: d_{a0} - діаметр вершин зубів дискової фрези;
- розраховуємо значення параметрів профілю зуба колеса: r_a - діаметр вершин зубів колеса, r_d - ділильний радіус колеса, S_n - товщина зуба на ділильному колі r_d , r_f - радіус западин колеса;
- знаходимо граничний радіус точки евольвенти r_{fl} , яка з'єднується з перехідною кривою западини зуба колеса вирішуючи сумісно рівняння (2.1) та (2.2);
- задаємось кількістю розрахункових точок на евольвенті мінімальна кількість рекомендується 50 для кожної точки і розраховуємо значення радіусів точок евольвенти, що рівномірно розташовуються в межах від r_{akt} до r_a і за виразом (2.1) розраховуємо координати точок евольвенти колеса x_e , y_e ;
- задаємося значеннями параметрів гіперболоїда a_0 , b_0 , c_0 і розраховуємо значення c_{y0} міжосьової відстані за залежністю (2.4);
- для кожного значення точок евольвенти радіусом від r_{akt} до r_a за залежністю (2.6) знаходимо значення параметру u , що буде йому відповідати;
- після цього для кожного значення u знаходимо координати точок осьового перелізу ВПІ гіперболоїда за залежністю (2.5) і отримуємо набір точок x_{G0} та y_{G0} ;

- відхилення від евольвенти буде найбільше за абсолютним значенням різниці між координатами y_{G0} та y_e .

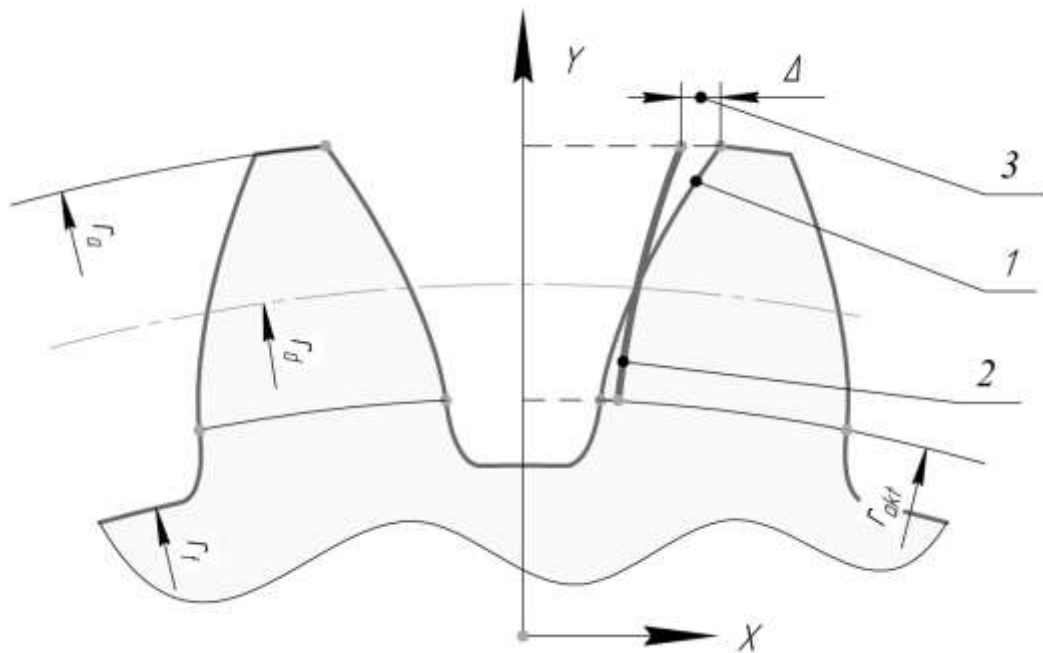


Рисунок.2.4. Схема порівняння профілів евольвенти колеса з осьовим перерізом ВІП гіперboloїда і визначення розрахункового відхилення цих профілів: 1- крива евольвенти, 2 –крива осьового перерізу ВІП гіперboloїда, 3-відхилення від евольвенти Δ .

З використання пакету автоматизації математичних розрахунків *MATLAB* та пакету прикладних програм *Optimization Toolbox* була вирішена задача знаходження таких параметрів поверхні гіперboloїду для яких максимальні значення відхилення точок кривої осьового перерізу гіперboloїду від евольвентної ділянки в межах робочої частини були б мінімальні. Для цього використовувалась функція *fminsearch*, що однією з найважливіших функцій, яка використовується в *Matlab* для пошуку мінімального значення функції, і вона повертає скалярне значення, де надані вхідні дані можуть бути у формі матриці, або вектору. Цей алгоритм ґрунтується на підході симплексного алгоритму Нелдера-Міда і є методом прямого пошуку і не використовує жодного складного аналітичного градієнта [<https://uk.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html>] він відноситься до так званих безградієнтних методів оптимізації.

На рис 2.5. наведено геометричну побудову для задачі визначення ВІП дискової фрези для зубчастого колеса $m=10$, $Zk=21$, $d_{a0}=100$.

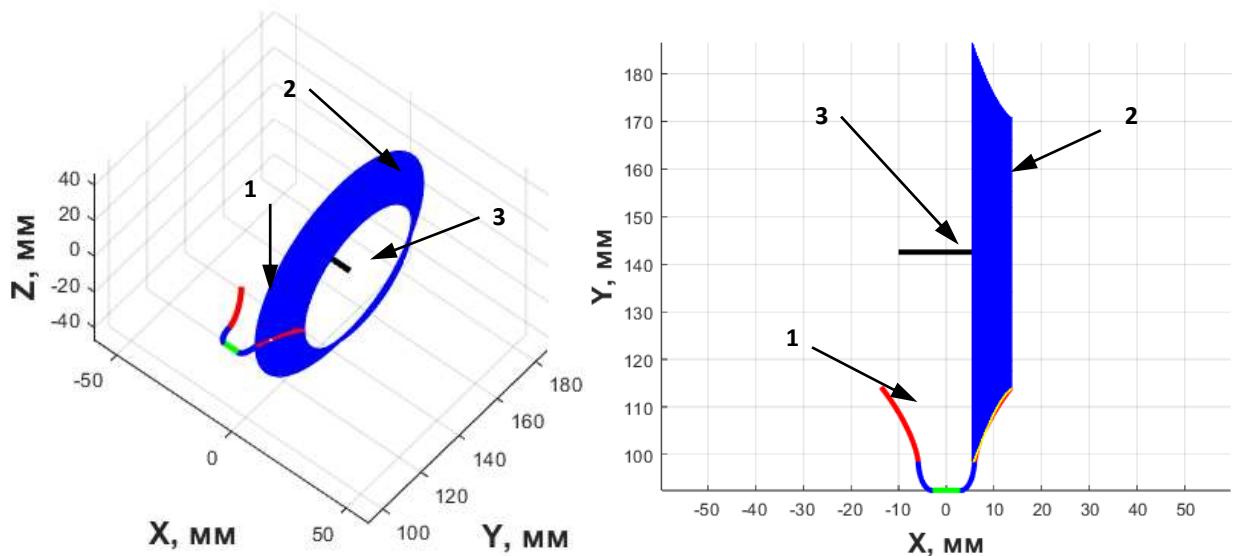


Рисунок.2.5. Геометрична модель розрахунків для визначення ВІП дискової фрези для зубчастого колеса $m=10$, $Z=21$, $d_{a0}=100$. 1- крива профілю зубчастого колеса, 2-ВІП фрези, 3-вісь фрези.

На рис. 2.6.а показано графік відхилення від евольвенти профілю дискової фрези $d_{a0}=100$ для зубчастого колеса $m=10$, $a_n=20^\circ$, $x=0$, $Z=21$, на рис. 2.6.б $Z=100$. Відповідно отримані значення оптимальних параметрів гіперболоїду для такої заміни будуть для $Z=21$: $a_0=27.8847$, $b_0=15.0632$, $c_0=7.9091$, найбільше відхилення від евольвенти становить $f_f=0.5\text{мм}$ для $Z=100$: $a_0=22.8936$, $b_0=16.5041$, $c_0=6.6796$, найбільше відхилення від евольвенти становить $f_f=0.1064\text{мм}$

При вирішенні задачі оптимізації параметрів гіперболоїду, що забезпечує мінімальні відхилення профілю гіперболоїда від евольвенти стикаємося з проблемою локальних мінімумів цієї задачі при досягненні яких алгоритм зупиняється при цьому відхилення від евольвенти не є мінімальним, для цього необхідно правильно задавати початкові наближення для оптимізації, а саме a_0 , b_0 , c_0 , які бажано визначати за наступною залежністю.

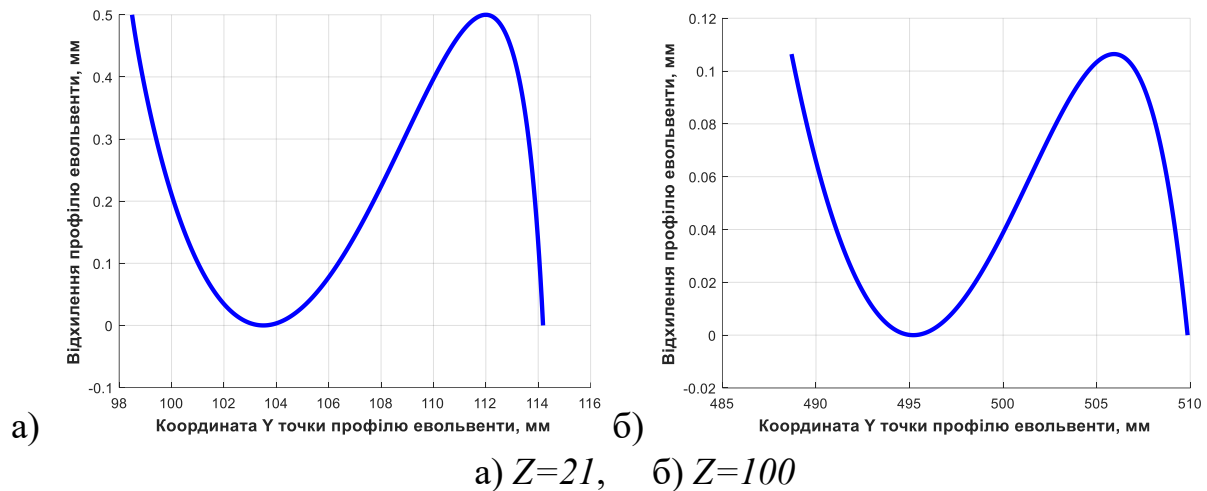


Рисунок.2.6. Графік відхилення від евольвенти профілю дискової фрези від евольвенти зубчастого колеса з параметрами евольвенти $m=20$, $a_n=20^0$, $x=0$, $\Delta S=0$.

$$\begin{aligned} a_0 &= 0,5d_{a0} - 2m; & b_0 &= (0,68 \dots 0,72)a_0 \\ c_0 &= a_0/\operatorname{tg}(0,5\pi - \arccos r_b/r_a) \end{aligned} \quad , \quad (2.7)$$

Геометрична інтерпретація цього результату показано на рис.2.6 де відхилення має хвилястий профіль і значення на кінцях профілю відповідають локальним екстремумам на кривій відхилень і їх різниця є максимальним відхиленням від евольвенти, форма такого відхилення формує бочкоподібність на профілю зуба за величиною що дорівнює відхиленню від евольвенти, це є важливим для крупномодульних зубчастих коліс, які працюють під значним навантаженням, що спричинює значні деформації системи зубчасте колесо-вал і для їх компенсації та збільшення строку служби таких коліс використовують саме модифікацію профілю колеса у вигляді бочкоподібності.

2.3. Аналіз похибок формоутворення профілю евольвентного зубчастого колеса зуборізними дисковими фасонними фрезами на базі гіперболоїда.

На рис. 2.7 – 2.9 показані результати розрахунків відхилень від евольвенти для дискових фрез модулем 10 мм, 16 мм при різних значення діаметру від номінального для суцільних фрез, що вказані в ГОСТ 10996-64

Фрези дискові зуборізні модульні до значень, що вказані в каталогах фірм [14, 16, 18, 20] і порівняння їх з відхиленнями проявлю зубчастих коліс від евольвенти згідно ГОСТ 1643-81 Передачі зубчасті допуски по 8 ступеню точності так, як відхилення профілю від евольвенти нормується тільки до цього ступеня то з ним будемо і порівнювати, про те ГОСТ 10996-64 такі фрези призначені для зубчастих коліс 10-го ступеню точності.

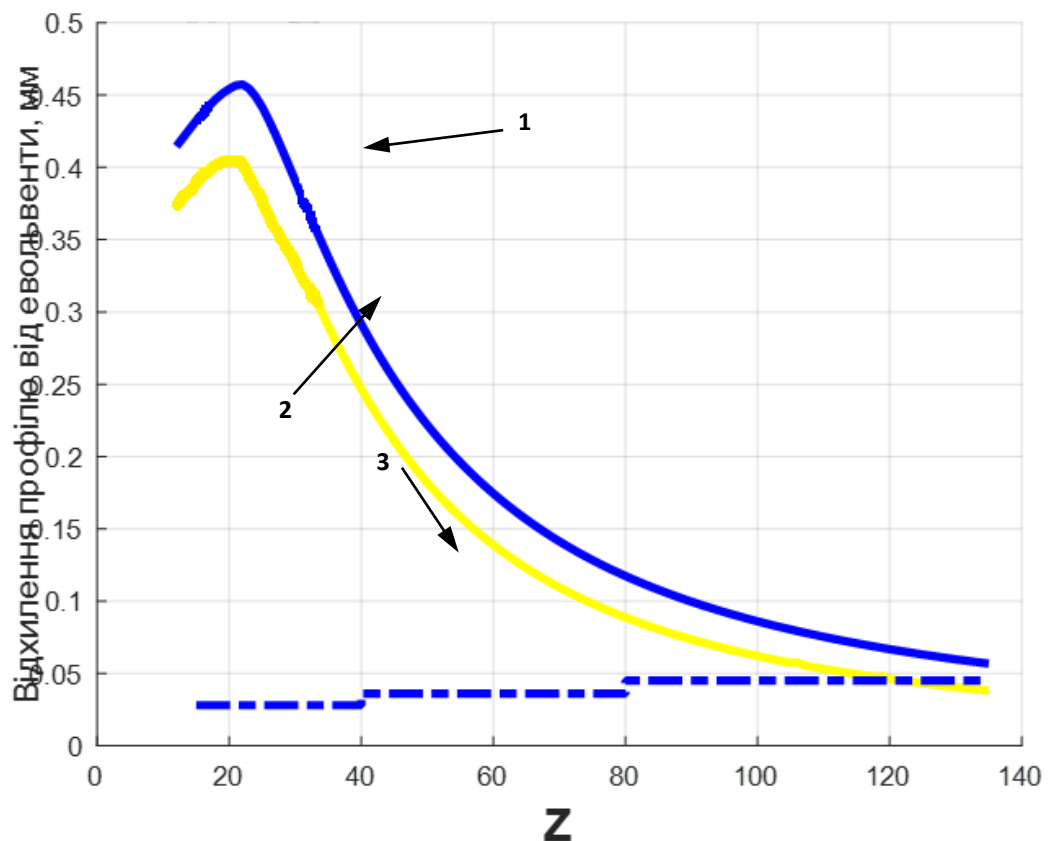


Рисунок.2.7. Вплив діаметру дискової фрези на відхилення від евольвенти для модуля 10мм: 1 - $d_{a0}=140$, 2- $d_{a0}=350$, 3- допуск відхилення від евольвенти 8 ступеня точності.

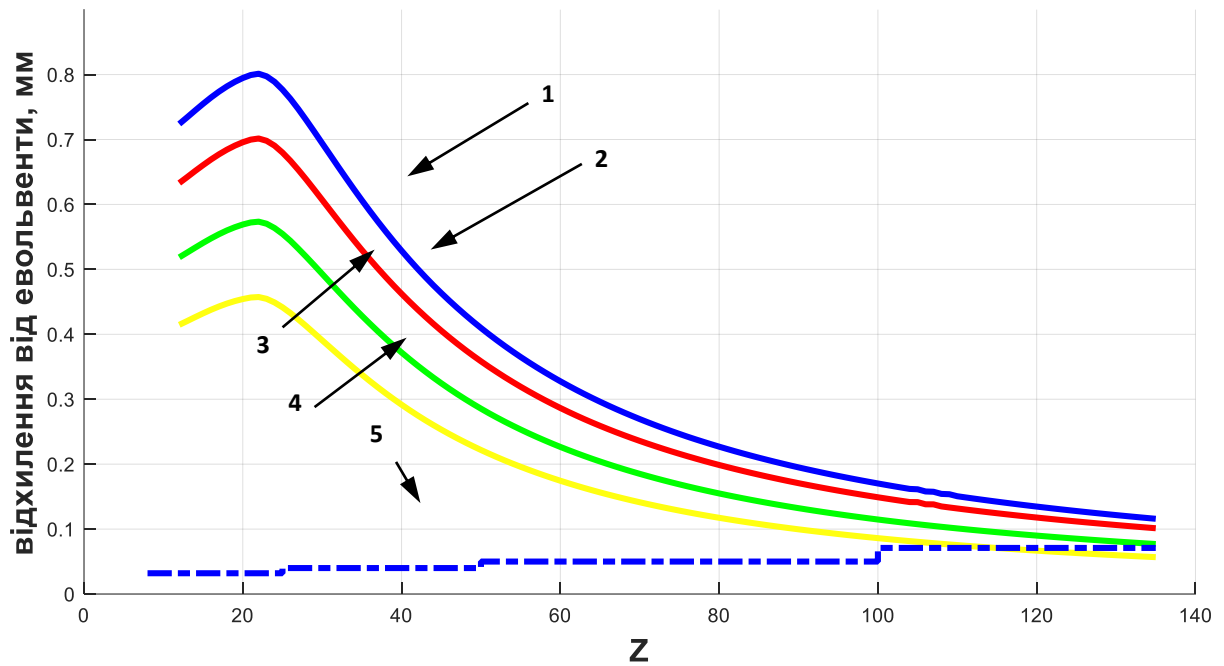


Рисунок.2.8. Вплив діаметру дискової фрези на відхилення від евольвенти для модуля 16мм: 1 - $d_{a0}=180$, 2- $d_{a0}=270$, 3- $d_{a0}=350$, 4- $d_{a0}=450$, 5- допуск відхилення від евольвенти 8 ступеня точності.

За результатами чисельних розрахунків можна зробити висновок, що збільшення діаметру фрези зменшує значення відхилення від евольвенти (рис.2.7, 2.8) про те цього не досить, щоб забезпечити теоретичну точність 8-го ступеня по всьому діапазону чисел зубчастих коліс, а тільки для великих чисел зубів більше 100 і на великих діаметрах фрези рис.2.7 – крива 2, рис.2.8 – крива 4, тому такі фрези можуть бути придатні для використання при попереднього чорнового зубофрезерування. Вплив кількості зубів на відхилення профілю показує, що спочатку відхилення зростає і досягає свого екстремуму на кількості зубів 23 а далі падає, це пов'язано з тим що величина активної висоти евольвентної частини зуба зростає від малих чисел зубів до величини 23 так як це пов'язано з формоутворенням рейкою де висота зуба становить $2.25m$, а зі збільшенням кількості зубів кривизна профілю падає і відхилення від евольвенти зменшується. Підвищенням точності таких фрез може бути реалізація ВІП такої фрези з послідовно сполучених гіперболоїдів з різними параметрами які наближають ділянку евольвенти не на всьому

профілі, а тільки на певних ділянках. Що можна реалізувати в збірній конструкції фрези з НТП при чому кожна пластина відповідає за свою ділянку наближення рис.2.9

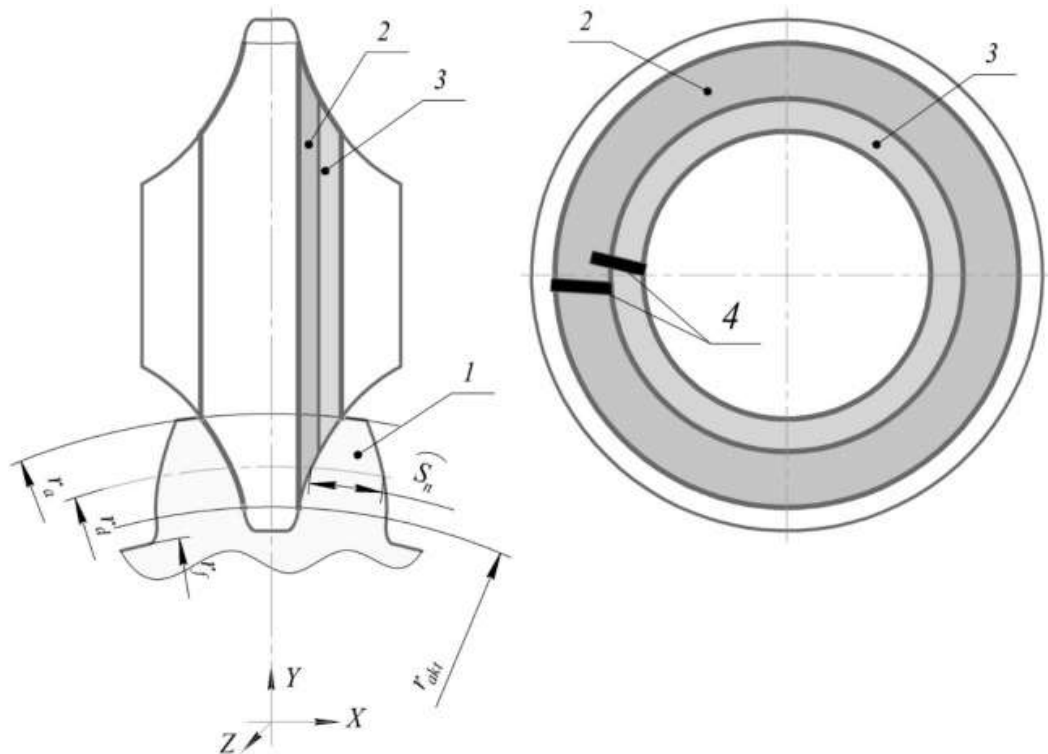


Рисунок 2.9. Наближення евольвентного профілю зубчастого колеса декількома ділянками гіперболоїду: 1- зубчасте колесо, 2- початкова ділянка гіперболоїду, 3- довільна ділянка гіперболоїду, 4- твердосплавні пластини, кромка яких є твірними гіперболоїдів.

Для знаходження параметрів декількох гіперболоїдів, що замінюють евольвентний профіль колеса, за наведеними раніше формулами в розділі 2 проводимо розрахунок параметрів гіперболоїда тільки розбиваємо ділянки зубчастого колеса в межах радіусів від r_{akt} до r_a на декілька ділянок і для кожного проводимо розрахунок необхідних параметрів. При чому бажано різницю радіусів так обирати, що пластина на одну суміжну ділянку гіперболоїда заходила з перекриттям.

Для прикладу на рис.2.10 Показано розрахунок відхилень фрези яка складається з трьох ділянок гіперболоїда та в таблиці 2.1 наведено параметри цих гіперболоїдів.

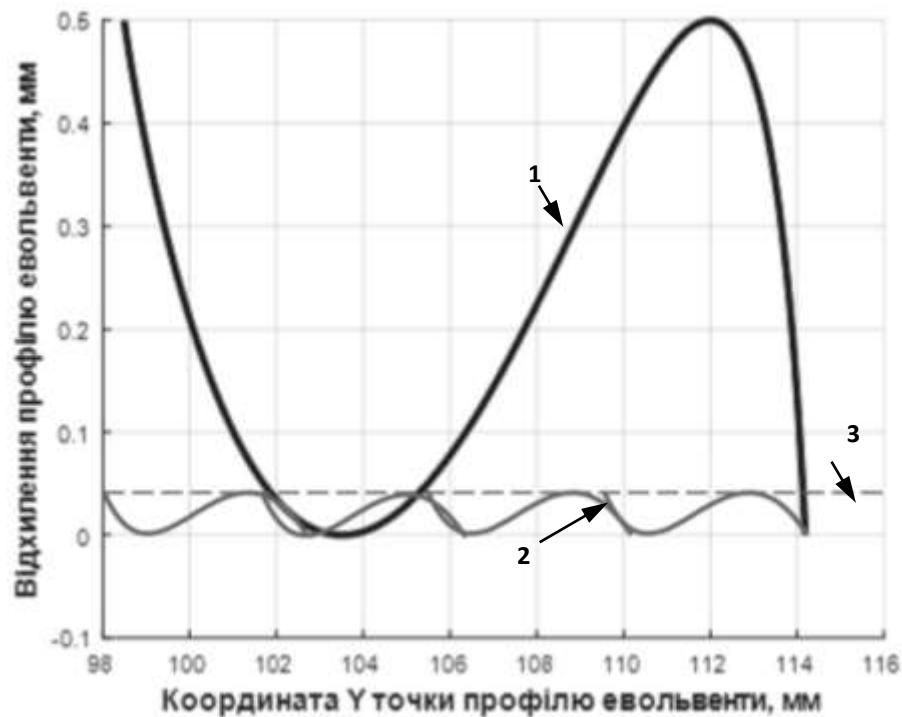


Рисунок.2.10. Графік відхилення від евольвенти профілю дискової фрези від евольвенти зубчастого колеса з параметрами евольвенти $m=10$, $Zk=21$, $\alpha_n=20^\circ$, $x=0$, $\Delta S=0$, $d_{a0}=350\text{мм}$: 1- відхилення при заміні 1 гіперболоїдом, 2- відхилення при заміні чотирма гіперболоїдами, 3- граничне відхилення кривої евольвенти профілю за 8 ступенем точності.

Таблиця 2.1

Параметри гіперболоїдів при заміні евольвентного профілю на 4 частини для $m=10$, $Zk=21$, $\alpha_n=20^\circ$, $x=0$, $\Delta S=0$, $d_{a0}=350\text{мм}$

Номер ділянки / Параметри гіперболоїда і порівняння з значеннями при заміні 1 ділянкою	$a_0=$ 27.8847	$b_0=15.0632$	$c_0=7.9091$
1	25.8847	15,053	7,8901
2	26.8723	14,023	7,023
3	27.9932	14.001	6,56
4	29,5621	13,023	6,02

Таким чином відповідно до розрахунків рис.2.10 шляхом заміни на 4 ділянки гіперболоїдів з різними параметрами можна суттєво зменшити відхилення профілю від евольвенти і таким чином суттєво зменшити відхилення до показників 8-ого ступеня точності за проведеними розрахунками.

Висновки

В даній роботі розроблено методику визначення параметрів однополосного гіперболоїду осьовий переріз якого мав би мінімальні відхилення від евольвенти, що дає змогу його використовувати в якості ВПП дискових фрез для крупномодульних зубчастих коліс. Досліджено вплив модуля зубчастого колеса та числа зубів на мінімальні відхилення які можна досягти при такому способі заміни ВПП.

Наступним етапом є розробка конструкції таких дискових фрез.

РОЗДІЛ 3. ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЗЫРНОЇ ЗУБОРІЗНОЇ ДИСКОВОЇ ФРЕЗИ НА БАЗІ ГІПЕРБОЛОЇДА

3.1. Вихідні дані.

Розрахунки параметрів зубчатого колеса і профіля гіперболоїда, які необхідні для побудови моделі фрези, представимо у таблиці 3.1. В якості прототипу використано дискову фрезу LMT FETTE (див. рис.1.19) із модулем $m = 10$ мм, зовнішнім діаметром $D = 350$ мм [18, ст. 96].

Таблиця 3.1

Вихідні дані для побудови моделі фрези

Назва параметра	Позначення	Значення
Модуль зубчатого колеса, мм	m	10
Кількість зубів колеса, шт	Z_k	21
Кут профілю зуба вихідного контура, град	α	20
Коефіцієнт зміщення вихідного контура	x	0
Радіус вершин зубів колеса, мм	r_a	115
Радіус западин зубів колеса, мм	r_f	82.5
Міжосьова відстань заготовки і фрези, мм	c_{y0}	267.5
Зовнішній діаметр фрези, мм	d_{a0}	350
Радіус горловини гіперболоїда, мм	a_0	152.2729
Кут нахилу твірної гіперболоїда до його осі, град	η_0	81.61
Величина зміщення кола горловини гіперболоїда від осі зубчатого колеса, мм	b_0	16.7043
Кількість зубів фрези, мм	Z_ϕ	12

Для проектування фрези використаємо два типи стандартних змінних твердосплавних пластин згідно [24]:

1. Квадратна (бокова) – SCMT-09T304 (див. [24], табл.4) зі стороною (довжиною ріжучої кромки) $l = 9,525$ мм. Характерні розміри: $m = 1,808$ мм, $r = 0,4$ мм, $d1 = 4,4$ мм, $s = 3,97$ мм;
2. Кругла (вершинна) – RCMT-10T3M0 (див. [24], табл.9) із діаметром (довжиною ріжучої кромки) $d = 10$ мм. Характерні розміри: $d1 = 4,4$ мм, $s = 3,97$ мм.

Розміри пластин згідно [24] представлено на рис. 3.1.

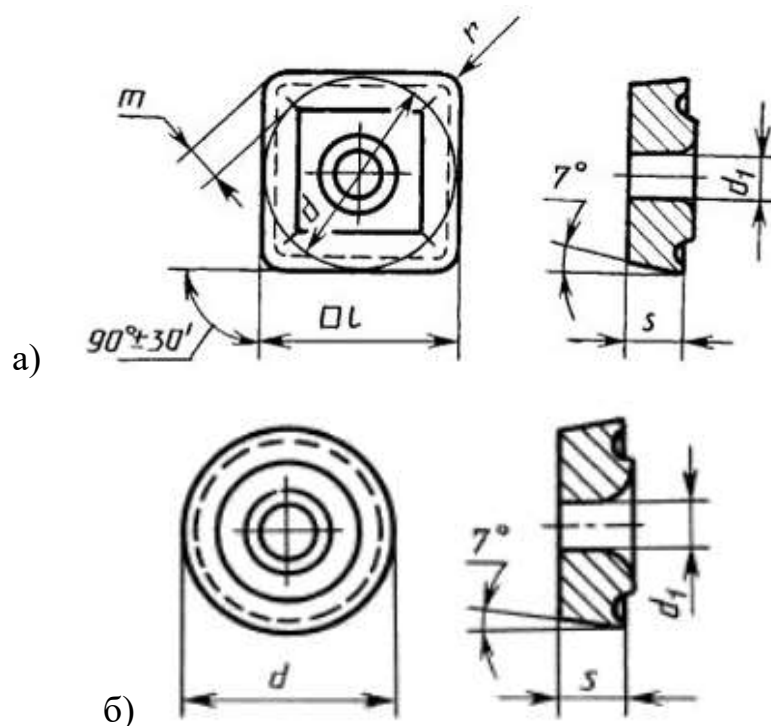


Рисунок.3.1. Ескізні розміри використаних для проектування твердосплавних пластин згідно [24]

3.2. Побудова моделі фрези.

В якості робочого середовища для побудови моделі фрези і розробки креслень використаємо САПР SOLIDWORKS 2022 компанії Dassault Systemes. Розпочнемо з побудови 3D-ескізу твірної гіперболоїда з урахуванням даних розрахунків:

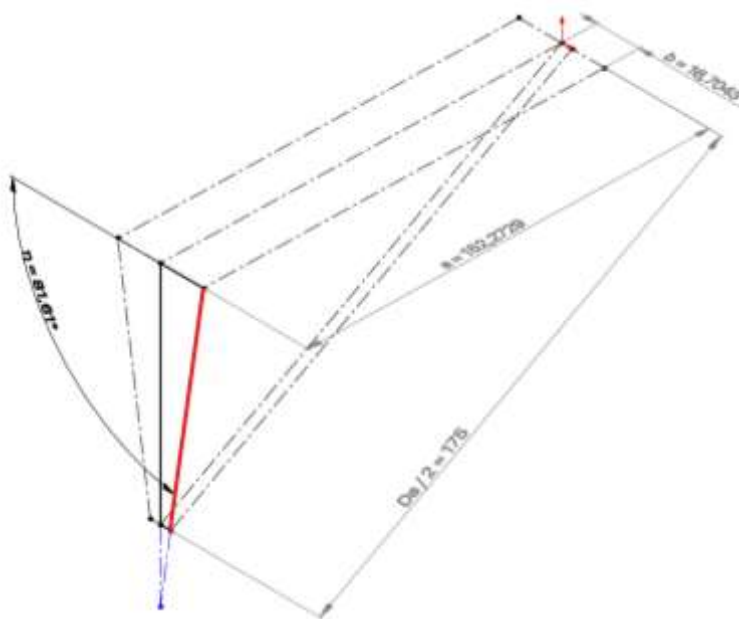


Рисунок.3.2. 3D-ескіз твірної гіперболоїда

Далі на площині YZ створюємо ескіз ступиці майбутньої фрези – коло діаметром 135 мм і за допомогою інструменту «Бобишка-Витянути» створюємо тверде тіло (циліндр) товщиною 70 мм симетрично до площини ескізу. Розміри взяті з із каталогу LMT Tool [24], ст.96: фреза дискова для модуля $m=10$ з кількістю зубів $z=12$ і зовнішнім діаметром $D=350$.

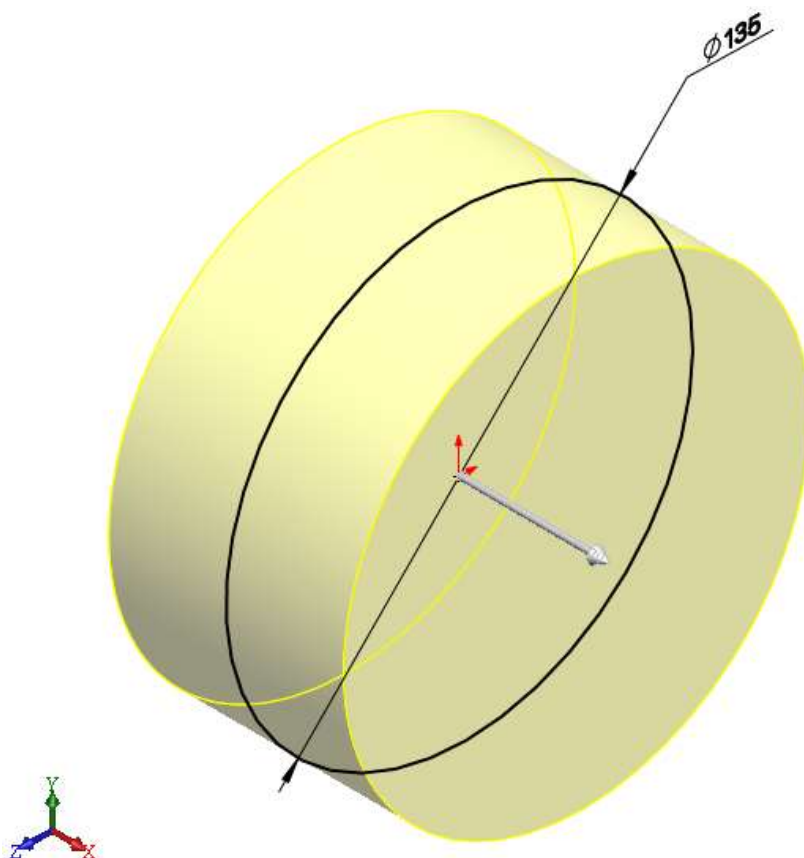


Рисунок. 3.3 Формування ступиці фрези

Наступним кроком є створення ескізу поперечного профілю диска фрези на площині XZ, з урахуванням розмірів і профілю зубчатого колеса, отриманих при розрахунках.

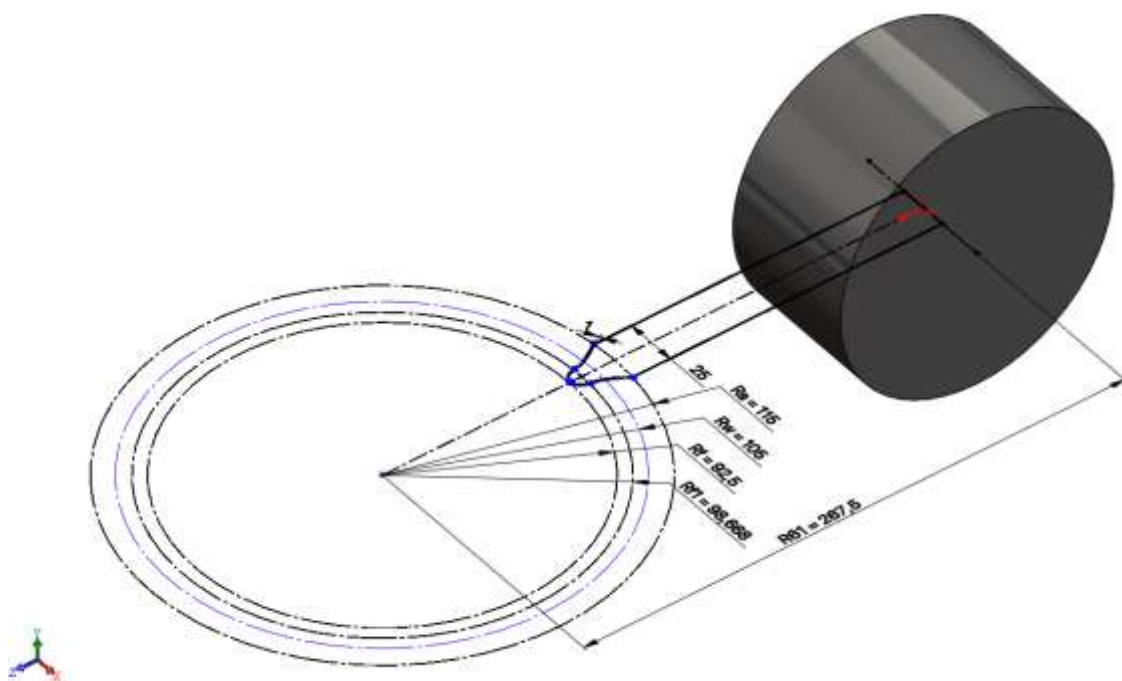


Рисунок. 3.4. Створення ескізу профіля диска

Далі, використовуючи команду «Повернути» створюємо тверде тіло.

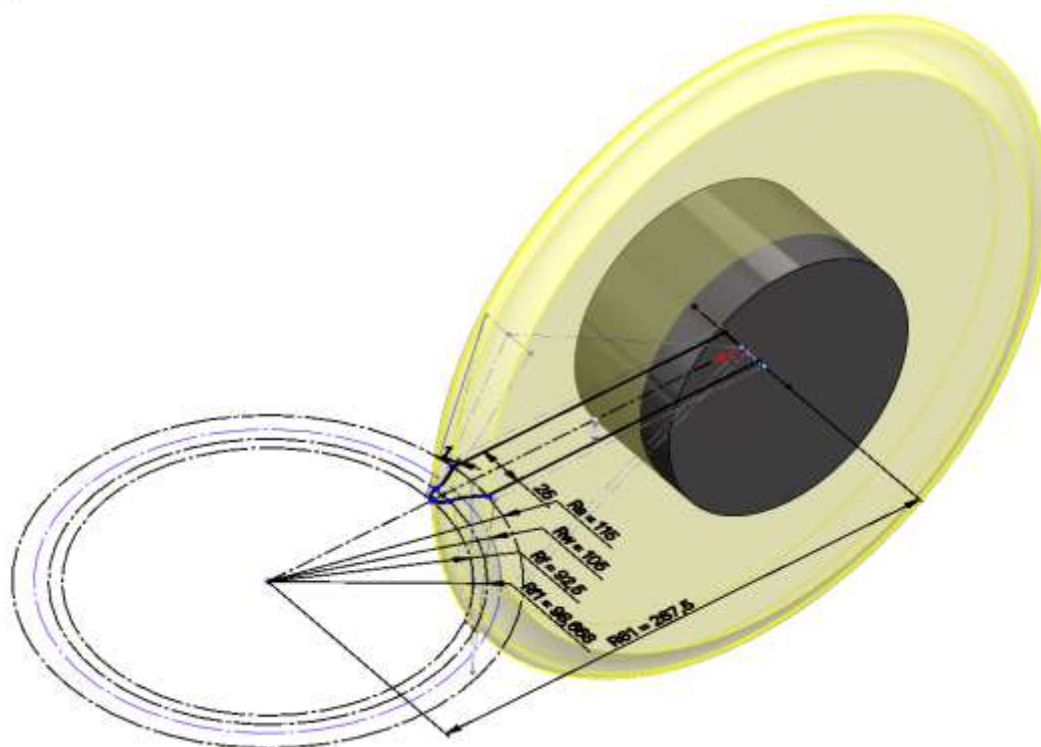


Рисунок.3.5. Створення диска обертанням профіля

Далі на площині YZ створюємо ескіз зубів фрези та за допомогою інструменту «Виріз-Витянути» відсікаємо лишній матеріал диска.

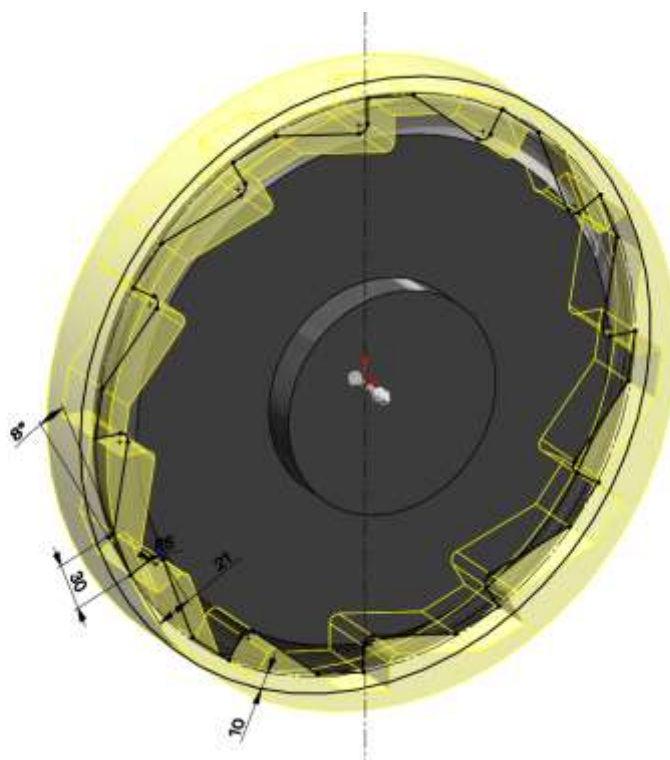


Рисунок.3.6. Створення зубів на диску

Наступним кроком на торцевій поверхні ступиці створюємо ескіз посадочного отвору під шпindel із шпоночним пазом та за допомогою інструменту «Виріз-Витянути» робимо отвір.

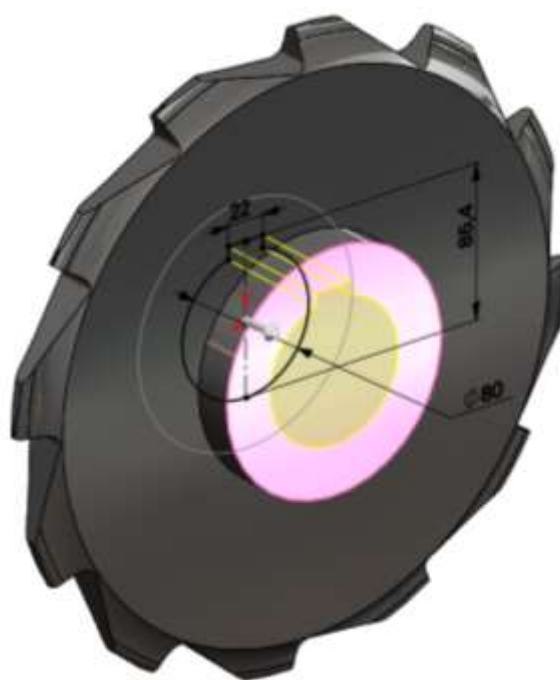


Рисунок.3.7. Створення зубів на диску

Далі на торцевій поверхні зуба фрези створюємо ескіз під посадочне місце циліндричної твердосплавної пластинки. Позиціонуємо її таким чином, щоб вона максимально співпадала із закругленням на дні впадини.

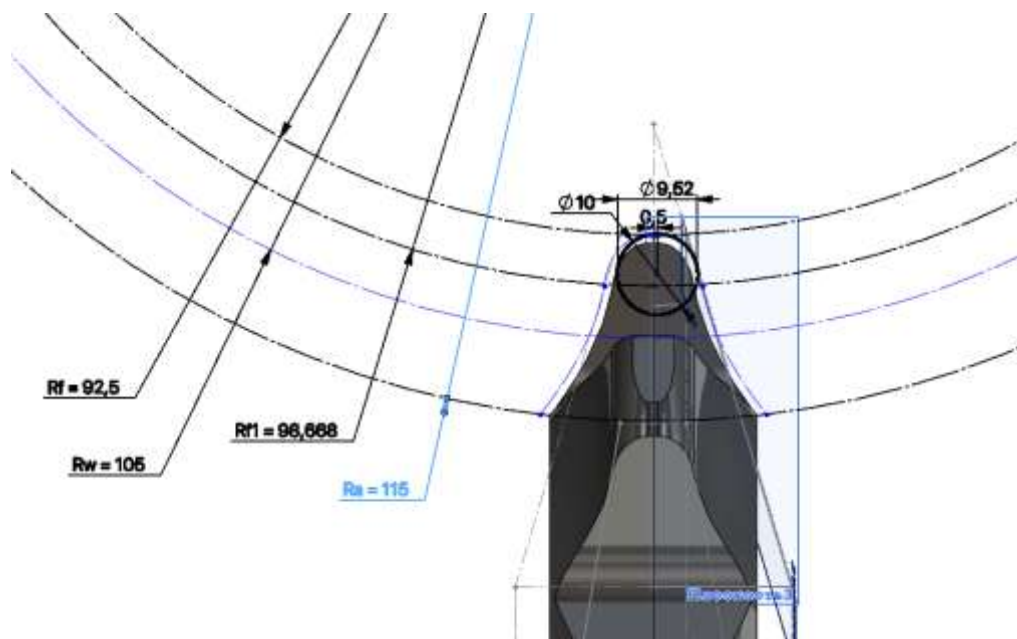


Рисунок.3.8. Створення ескізу посадочного місця пластинки

Опісля, використовуючи команду «Виріз-Витянути» робимо посадочне місце глибиною 2 мм.

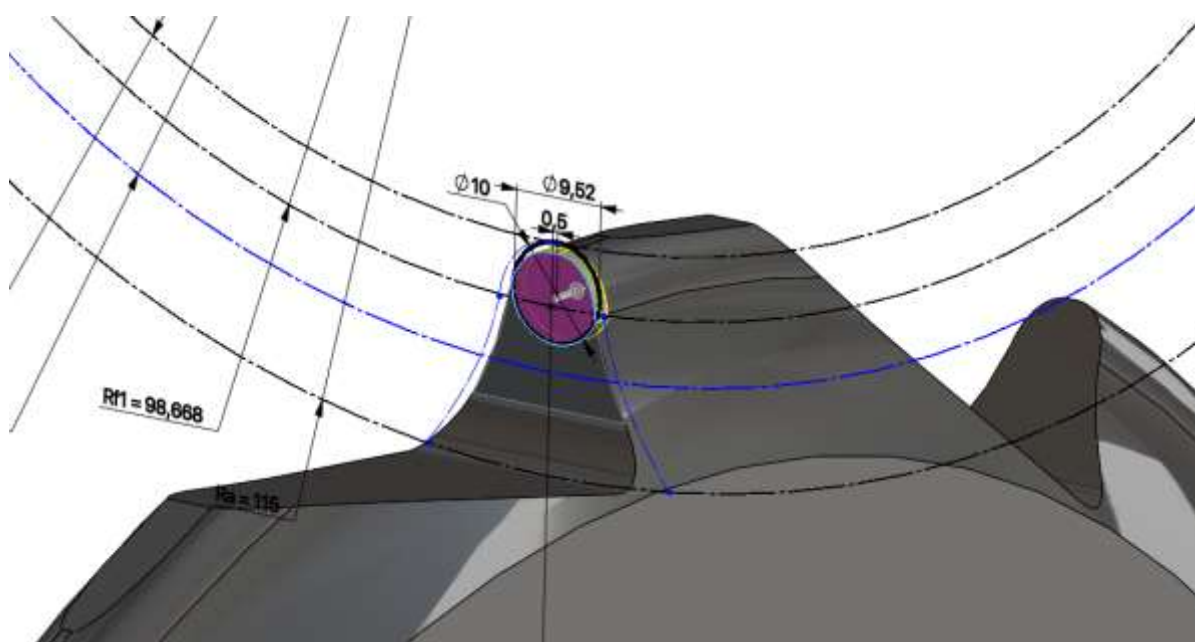


Рисунок.3.9. Створення посадочного місця пластинки

Далі, за допомогою команди «Отвір під кріплення» робимо у посадочному місці різьбовий отвір М4.

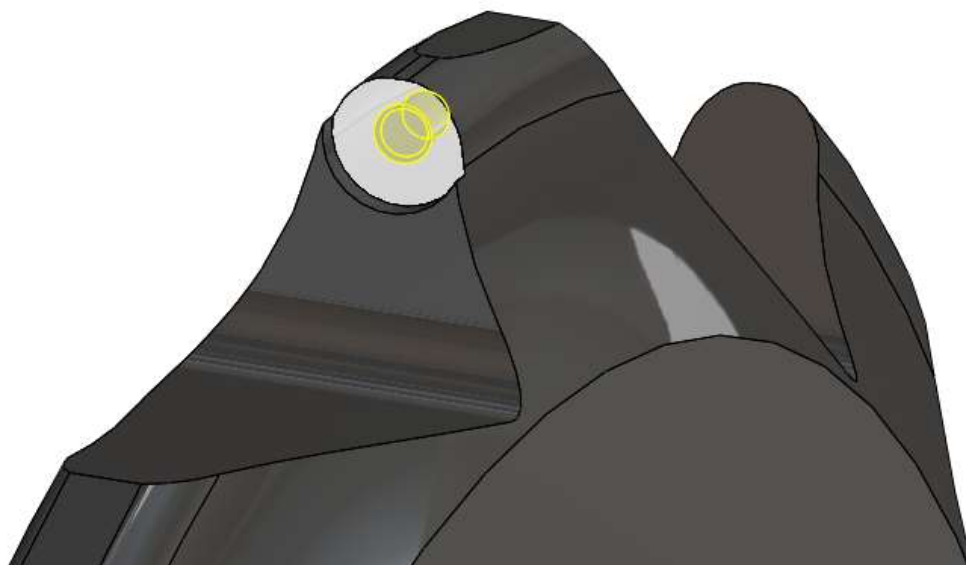


Рисунок.3.10. Створення різьбового отвору М4

Наступним кроком робимо посадочний отвір під бокові квадратні пластинки. Для цього, попередньо створюємо базову площину, яка проходитиме через твірну гіперболоїда (див. рис.3.1).

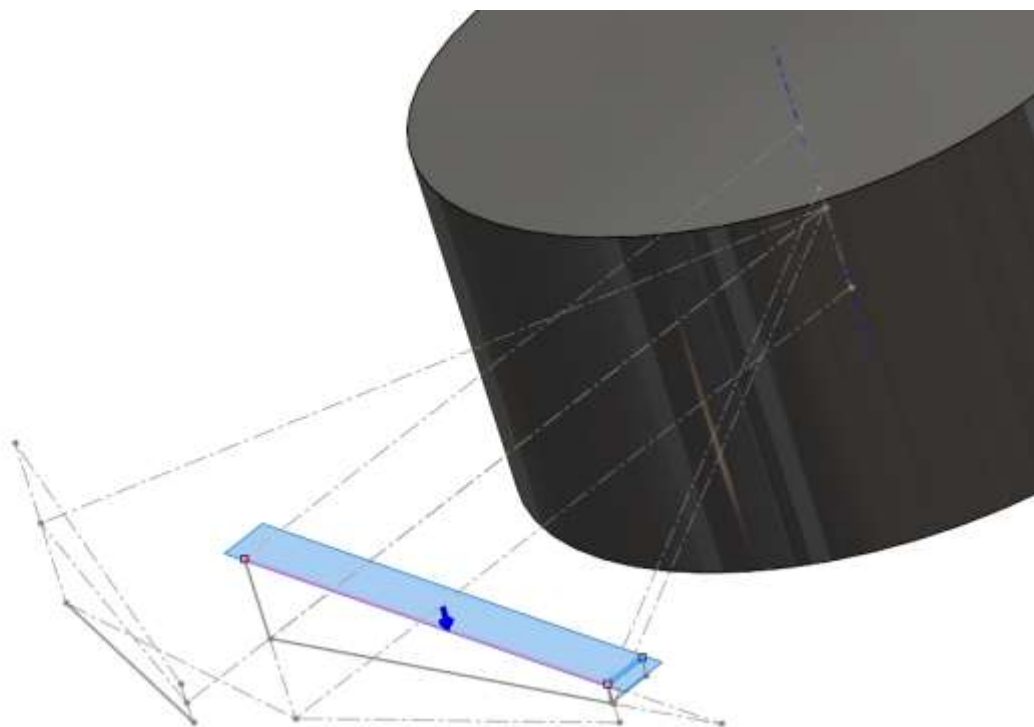


Рисунок.3.11. Створення допоміжної площини під посадочні отвори

Ескізом під посадочний отвір буде квадрат зі стороною 10 мм, одна із сторін якого співпадатиме із твірною гіперболоїда, а вершина буде розташовуватись на відстані 75 мм від вершини твірної.

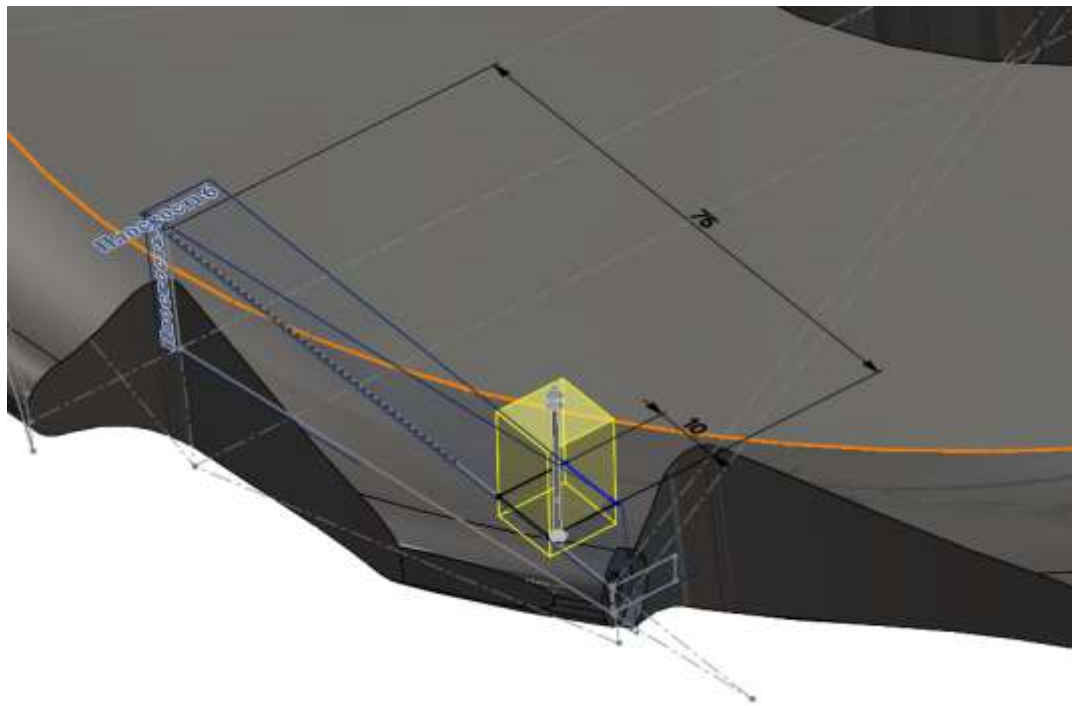


Рисунок.3.12. Створення посадочного отвору під квадратну пластинку

Далі, використовуючи команду «Отвір під кріплення» робимо у посадочному місці різьбовий отвір М4.

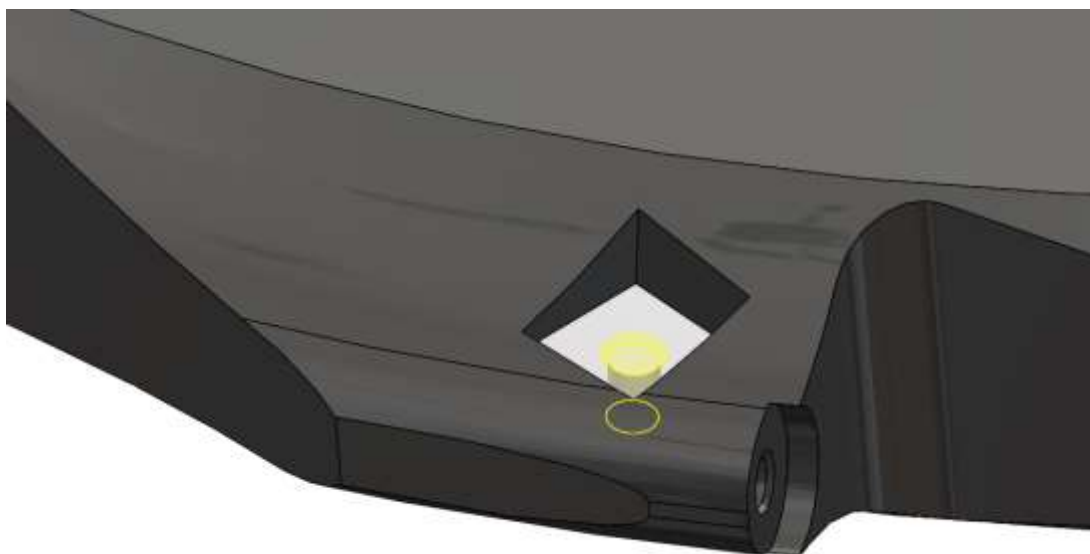


Рисунок.3.13. Створення різьбового отвору

Використовуючи команду «Лінійний масив» створюємо додатково два посадочних місця з різьбою із кроком 20 мм.

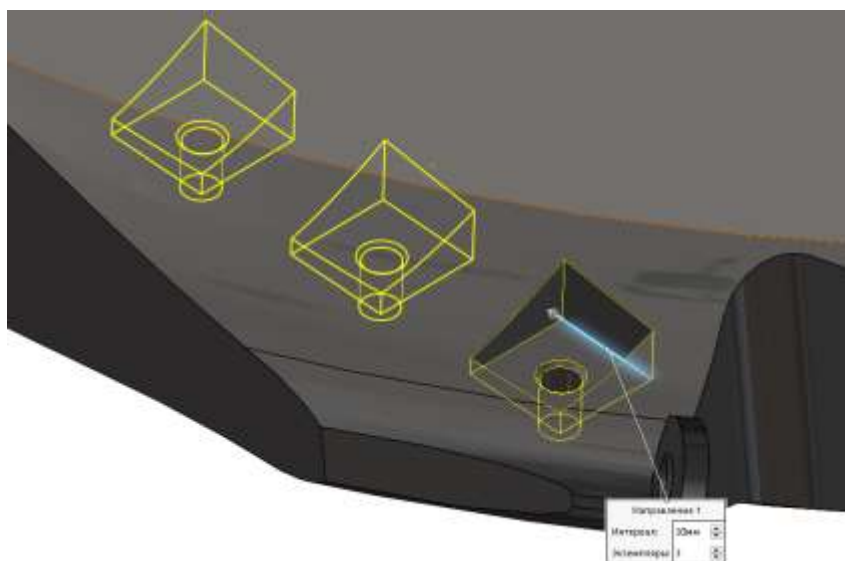


Рисунок.3.14. Створення масиву посадочних місць

Створивши допоміжну площину симетрично відносно площини YZ (алгоритм побудови описано вище), створюємо ескіз і формуємо 2 посадочних отвори на протилежній грані зуба. Розміщуємо їх так, щоб у процесі обертання перекрити зазори між уже сформованими посадочними отворами на протилежній грані.

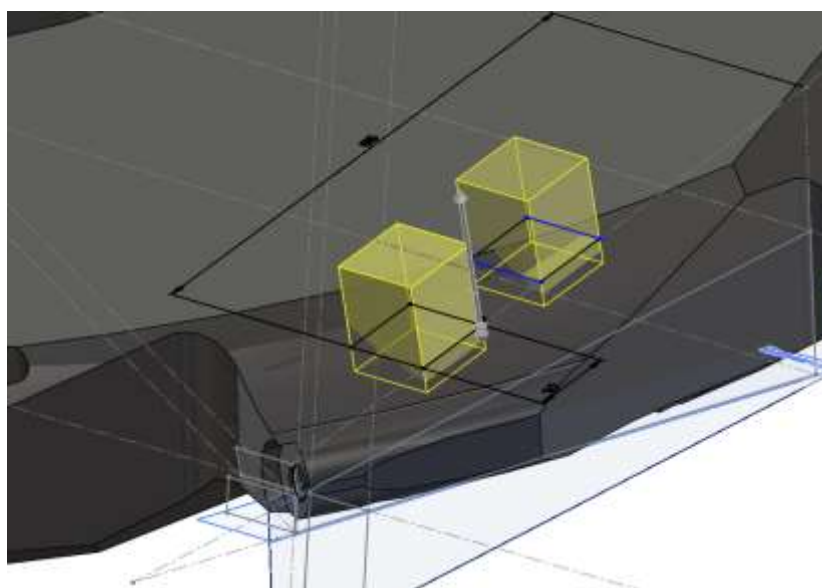


Рисунок.3.15. Створення додаткових посадочних місць

Далі формуємо технологічний виріз, щоб створити площину, паралельну площині посадочних отворів під пластинки на відстані 2 мм (половина товщини ріжучої пластинки).

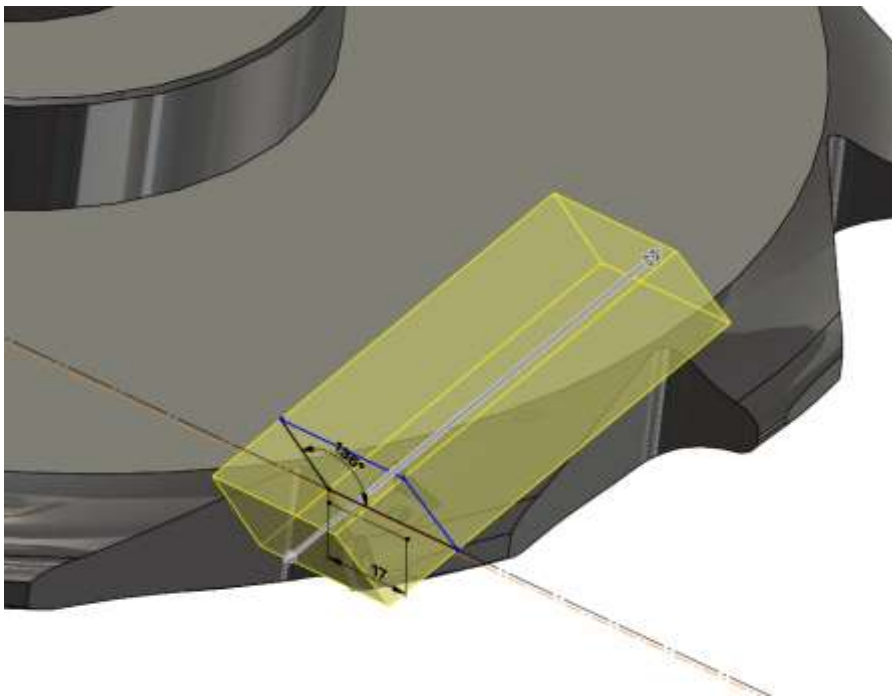


Рисунок.3.16. Створення технологічного вирізу

Всі попередні дії із формуванням посадочних місць під пластинки повторюємо для сусіднього (наступного за поточним) зуба, але з урахуванням шахового розміщення. Тобто фактично все має бути симетрично відносно площини YZ. Після цього за допомогою команди «Круговий масив» копіюємо створені посадочні місця на інші зуби навколо осі фрези із кутовим кроком 60°.



Рисунок.3.17. Копіювання посадочних місць на решту зубів

Далі, торцевій поверхні ступиці створюємо ескіз і командою «Виріз-Витянути» робимо технологічний виріз з обох сторін диска.

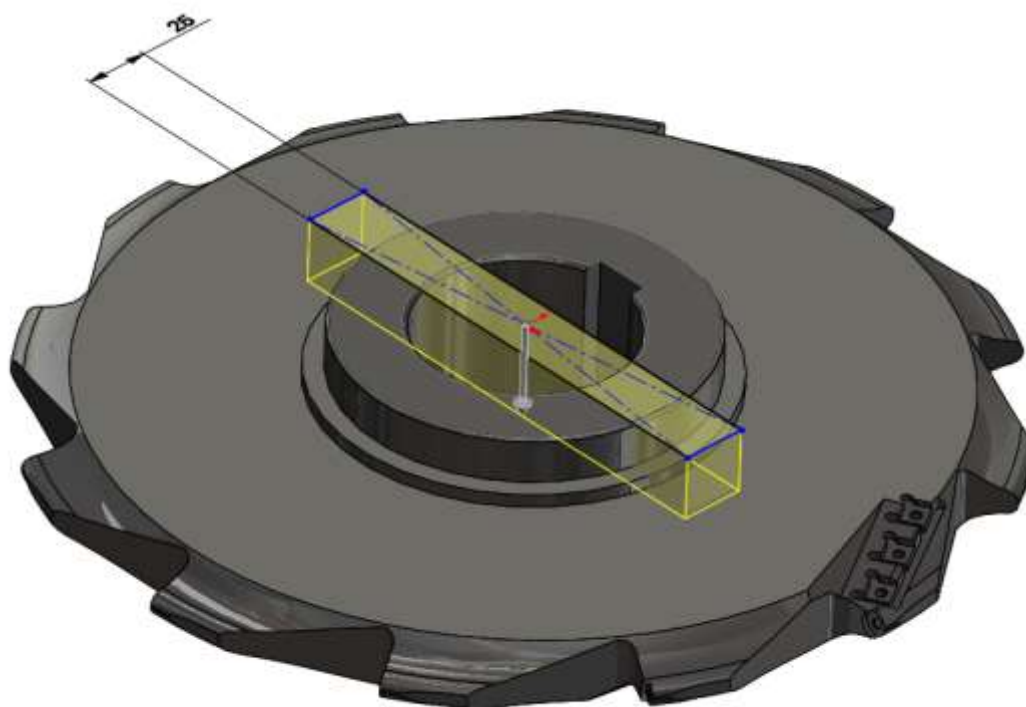


Рисунок.3.18. Створення технологічного вирізу

Та площині над посадочними місцями створюємо ескіз стружкових канавок. Далі командою «Виріз-Витянути» робимо технологічний виріз глибиною 8 мм. Аналогічні дії повторюємо для обох граней суміжних зубів, після чого командою «Круговий масив» копіюємо канавки на інші зуби навколо осі фрези із кутовим кроком 60° .

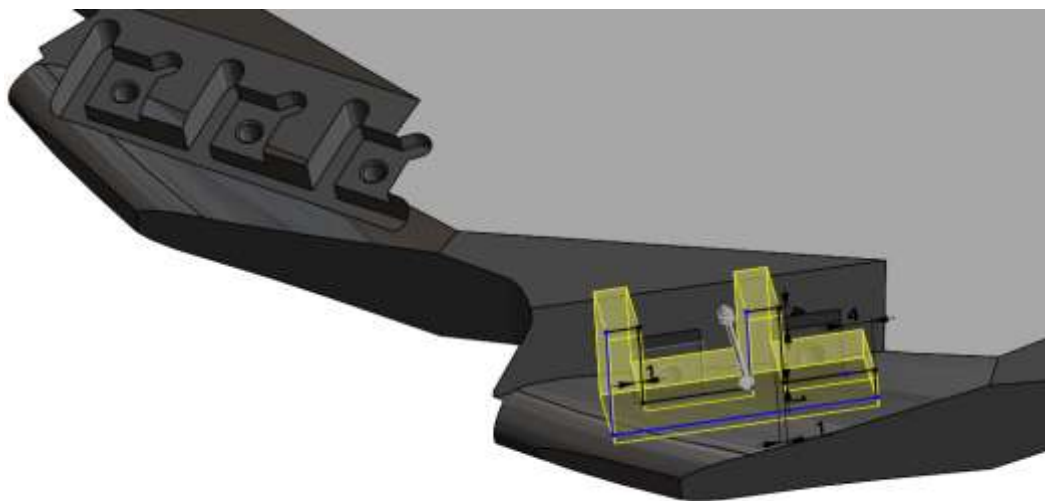


Рисунок 3.19. Створення стружкових канавок

В результаті отримуємо модель диска фрези.



Рисунок.3.20. Готова модель диска фрези

Після цього створюємо моделі твердосплавних пластинок або генеруємо ці моделі в одному із доступних обмінних форматів для САПР через онлайн бібліотеки виробників ріжучого інструменту. Після цього робимо збірну модель фрези із встановленими ріжучими пластинками та генеруємо їх робочі креслення.



Рисунок.3.21. Збірна модель фрези

Конструкція з таким розташуванням пластин забезпечує прийнятні кути різання. Відповідно до розрахунків з 3D моделі рис. 3.22 вони становлять: задній кут $\alpha = 7^\circ$, передній кут $\gamma = 16^\circ$.

Рис.3.23. Робоче креслення корпусу фрези

Висновки

В даному розділі за допомогою програмних методів САПР SOLIDWORKS 2022 було створено електронні 3D-модель дискової модульної фрези: корпусу та складальної одиниці в зборі із ріжучими пластинками і кріпленням.

Для розробки моделі були використані дані розрахунків із Розділу 2. На основі моделей було розроблено креслення корпусу та складальне креслення фрези.

Наступним етапом є розробка технології виготовлення корпусу фрези.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРПУСУ ЗБІРНОЇ ЗУБОРІЗНОЇ ДИСКОВОЇ ФАСОННОЇ ФРЕЗИ НА БАЗІ ГІПЕРБОЛОЇДА

За розробленою моделлю і робочим кресленням корпусу фрези розробляємо технологічний процес виготовлення корпусу за методикою описаною в [22].

4.1. Розрахунок припусків на механічну обробку

Проводимо розрахунок припусків на механічну обробку для робочої частини оправки розмір якої складає $\varnothing 348h7_{(-0,1)}$ мм. В якості заготовки вибираємо гарячекатаний прокат $\varnothing 350$ мм марки Сталь 40Х ДСТУ 7806:2015. Поверхню $\varnothing 348h7$ отримуємо шляхом використання наступних операцій: чорнове точіння ($R_z = 100$ мкм; $h = 100$ мкм) чистове точіння ($R_z = 50$ мкм; $h = 50$ мкм), шліфування ($R_z = 25$ мкм; $h = 25$ мкм). Базування та установка заготовки відбувається у трикулачковому патроні.

Сумарні відхилення розташування поверхонь для прокату складає:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\Sigma k}^2 + \Delta_{\Sigma c}^2} \quad (4.1)$$

де $\Delta_{\Sigma k}$ – загальне відхилення вісі від прямолінійності, $\Delta_{\Sigma k} = 2 \cdot 70 = 140$ мкм [1, стр.178];

$\Delta_{\Sigma c}$ – зміщення вісі заготовки у результаті похибки центрування,

$$\Delta_{\Sigma c} = 0,25 \sqrt{T d_{\text{заг}}^2 + 1} \quad (4.2)$$

$$\Delta_{\Sigma c} = 0,25 \sqrt{3,6^2 + 1} = 934 \text{ мкм}$$

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{140^2 + 934^2} = 944 \text{ мкм}$$

Для наступних переходів величина відхилення заготовки визначається за формулою:

$$\Delta_i = \Delta_{\Sigma} \cdot k_y, \quad (4.3)$$

де k_y – коефіцієнт уточнення, [1, стр.190];

$$k_{y_{\text{т.чорн.}}} = 0,06;$$

$$k_{y_{\text{т.чист.}}} = 0,04;$$

$$k_{y_{\text{шл.}}} = 0,02;$$

$$\Delta_{\text{т.чорн.}} = 944 \cdot 0,06 = 57 \text{ мкм}$$

$$\Delta_{\text{т.чист.}} = 944 \cdot 0,04 = 38 \text{ мкм}$$

$$\Delta_{\text{шл.}} = 944 \cdot 0,02 = 19 \text{ мкм}$$

Отримані значення заносимо у табл.4.1.

Визначаємо значення припусків.

Мінімальний двосторонній припуск визначається за формулою:

$$2Z_{\min i} = 2 \left[Rz_{i-1} + h_{i-1} + \sqrt{\Delta_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2} \right] \quad (4.4)$$

де Rz_{i-1} - висота мікронерівностей на попередньому переході;

h_{i-1} - глибина дефектного поверхневого шару на попередньому переході;

ρ_{i-1} - сумарні відхилення розташування поверхонь на попередньому переході;

ε_i - похибка установки заготовки на виконуваному переході.

$$2Z_{\min} = 2 \left[200 + 200 + \sqrt{944^2 + 300^2} \right] = 2780 \text{ мкм};$$

$$2Z_{\min} = 2 \left[100 + 100 + \sqrt{57^2 + 80^2} \right] = 600 \text{ мкм};$$

$$2Z_{\min} = 2 \left[50 + 50 + \sqrt{38^2 + 50^2} \right] = 325 \text{ мкм}.$$

Розраховуємо технологічні розміри методом розмірних ланцюгів. Вже згадана поверхню зовнішня, тому розрахункові розміри визначаємо як максимальні.

$$d_{i \max} = d_{i+1 \max} + 2Z_{i+1 \min} + Td_i \quad (4.5)$$

$$d_{\max \text{ шліфув}} = 348 \text{ мм}$$

$$d_{\max \text{ т.чистове}} = 348 + 0,325 + 0,14 = 348,465 \text{ мм},$$

$$\text{Приймаємо } d_{\max \text{ т.чистове}} = 348,47 \text{ мм},$$

$$d_{\max \text{ т.чорнове}} = 348,47 + 0,6 + 0,57 = 349,64 \text{ мм},$$

$$d_{\max \text{ заг}} = 349,64 + 2,78 + 3,6 = 356,02 \text{ мм}$$

$$\text{Приймаємо } d_{\max \text{ заг}} = 356 \text{ мм}$$

Розраховуємо мінімальні розміри:

$$d_{i \min} = d_{i \max} - Td_i \quad (4.6)$$

$$d_{\min \text{ заг}} = 356 - 3,6 = 352,4 \text{ мм}$$

$$d_{\min \text{ т.чорнове}} = 349,64 - 0,57 = 349,07 \text{ мм}$$

$$d_{\min \text{ т.чистове}} = 348,47 - 0,14 = 348,33 \text{ мм}$$

$$d_{\min \text{ шліф.}} = 348 - 0,1 = 347,9 \text{ мм}$$

Визначаємо граничні значення припусків для переходів механічної обробки. Розраховуємо максимальні значення припусків:

$$2Z_{i \max} = d_{i-1 \max} - d_{i \max} \quad (4.7)$$

$$2Z_{\max \text{ т.чорн}} = 356 - 349,64 = 6,36 \text{ мм}$$

$$2Z_{\max \text{ т.чист}} = 349,64 - 348,47 = 1,17 \text{ мм}$$

$$2Z_{\max \text{ шл.}} = 348,47 - 348 = 0,47 \text{ мм}$$

Розраховуємо мінімальні значення припусків:

$$2Z_{i \min} = d_{i-1 \min} - d_{i \min} \quad (4.8)$$

$$2Z_{\min} = 352,4 - 349,07 = 3,33$$

$$2Z_{\min} = 349,07 - 348,33 = 0,74$$

$$2Z_{\min} = 348,33 - 347,9 = 0,43$$

Виконуємо перевірку розрахунків за правилом:

$$\Sigma 2Z_{\max} - \Sigma 2Z_{\min} = Td_{\text{заг}} - Td_{\text{дет}} \quad (4.9)$$

$$\Sigma 2Z_{\max} = 6,36 + 1,17 + 0,47 = 8,0 \text{ мм}$$

$$\Sigma 2Z_{\min} = 3,33 + 0,74 + 0,43 = 4,5 \text{ мм}$$

$$8,0 - 4,5 = 3,6 - 0,1$$

$$3,5 = 3,5$$

Перевірка показала, що розрахунки виконані вірно.

Таблиця 4.1

Припуски на оброблення поверхні Ø348h7_(-0,1)

Технологічні операції й переходи обробки елементних поверхонь	Елементи припуску				Розрахунковий припуск, $2Z_{\min}$, мкм	Розрахунковий $\min$ розмір, мм	Допуск, TD, мкм	Прийняті розміри по переходах, мм		Граничні значення припусків, мм	
	Rz	h	Δ	Σ				Dmin	Dmax	Zmax	Zmin
Заготовка -прокат	200	200	944	-	-	356,02	3600	352,4	356	-	-
Чорнове точіння h12	100	100	57	300	2780	349,64	570	349,07	349,64	6,36	3,33
Чистове точіння h9	50	50	38	80	600	348,465	140	348,33	348,47	1,17	0,74
Шліфуван ня h7	25	25	19	50	325	348	100	347,9	348	0,47	0,43

4.2. Вибір заготовки для виготовлення державки

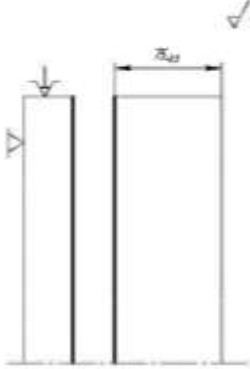
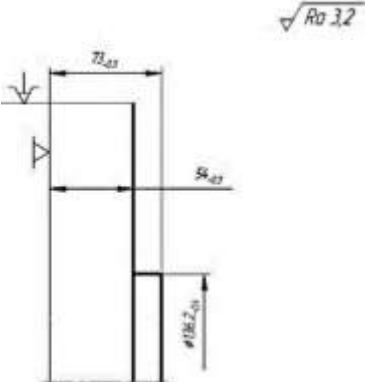
На підприємстві для виготовлення корпусу фрези дискової модульної використовуємо прокат кований діаметром Ø350 мм класу Б (підвищеної точності) ГОСТ 2590-88. Марка - Сталь 40Х ДСТУ 7806:2015 довжина 100 мм.

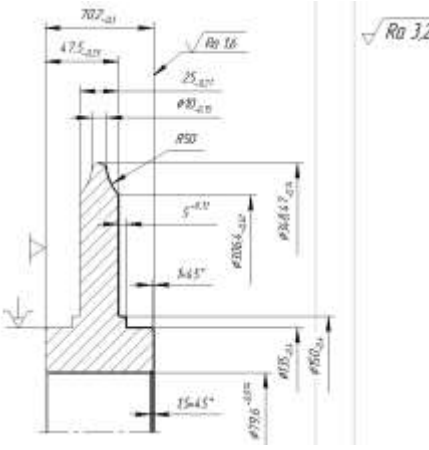
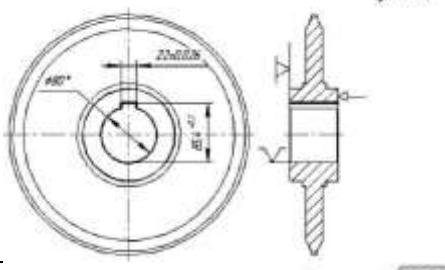
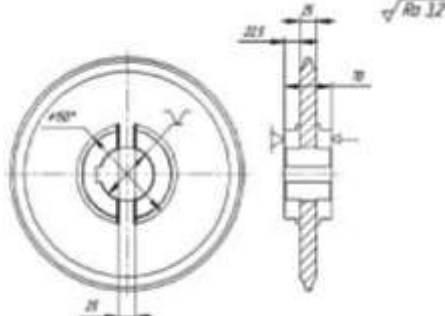
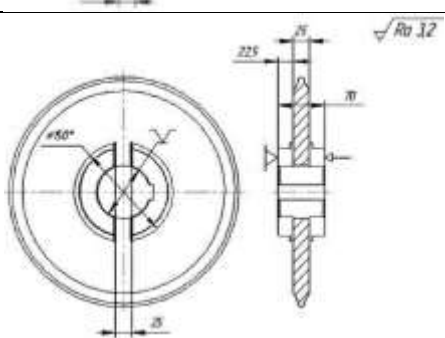
4.3. Технологічний процес виготовлення корпусу інструменту

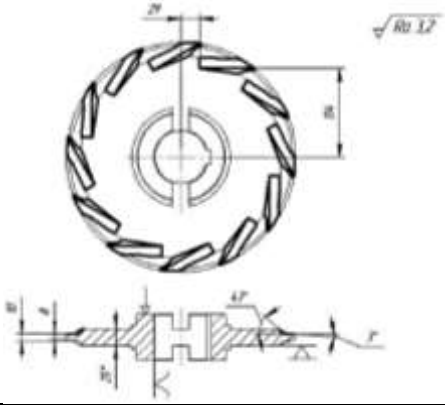
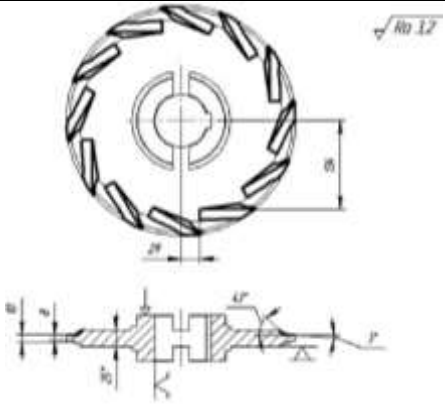
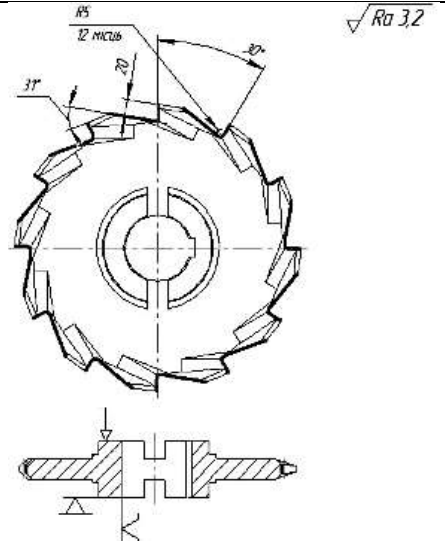
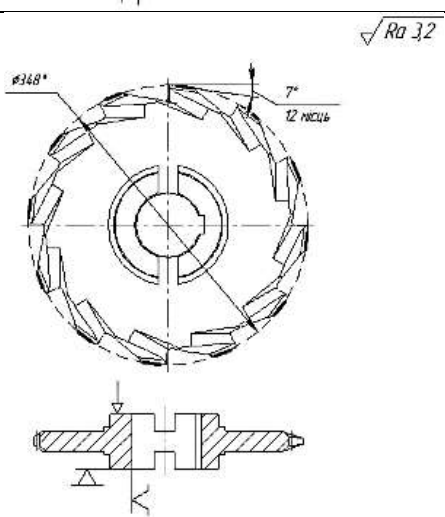
Технологічний процес характеризується використанням універсального обладнання та верстатів і сумісних пристроїв, а також верстатів з ЧПК, різального та вимірювального обладнання, що необхідні для Технологічний процес та маршрут обробки деталі з необхідним обладнанням та інструментами приведено в таблиці 4.2.

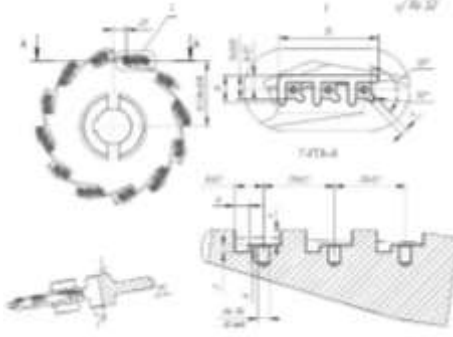
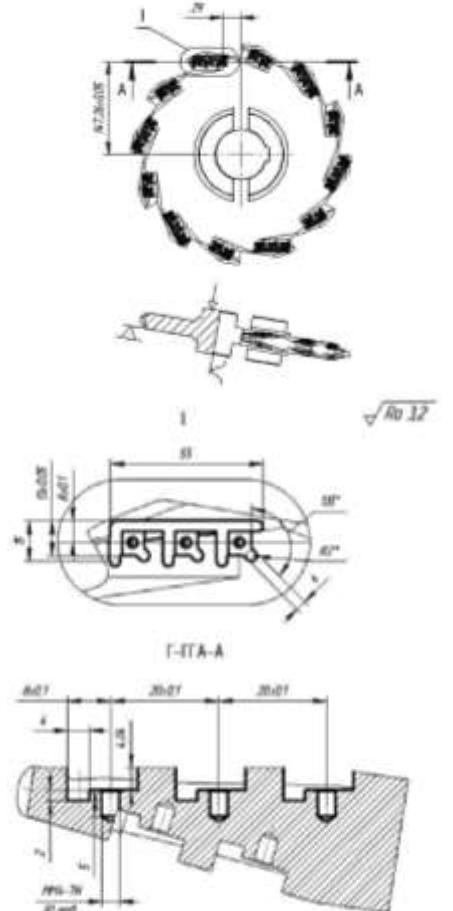
Таблиця 4.2

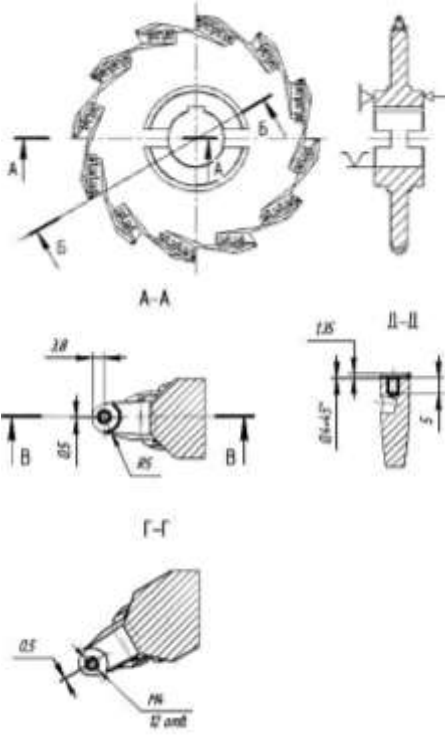
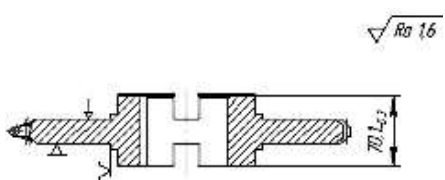
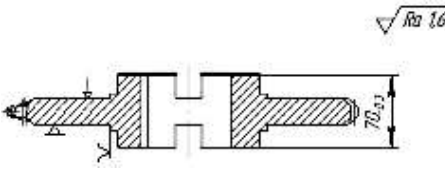
Технологічний маршрут виготовлення деталі

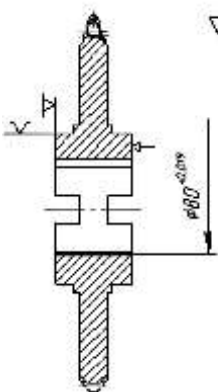
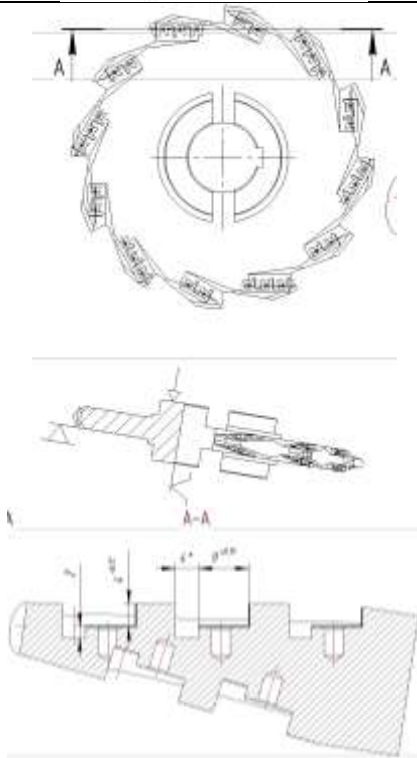
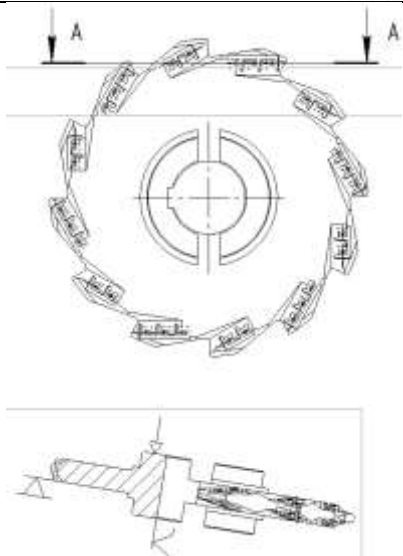
№	Найменування операції	Ескіз операції	Верстат, інструмент	Пристосування
005	Відрізна Відрізати, витримуючи розмір 100 мм		Стрічковий верстат JET HBS1321VS, пила стрічкова	Лещата з призмою
010	Токарна Підрізати торець, витримуючи розмір 73 Точити поверхні, витримуючи розміри Ø136,2, 54		Токарно- гвинторізний верстат 16K20; різець підрізний ГОСТ 18879-73 різець прохідний ГОСТ 18879-73	Патрон трьохкула чковий ГОСТ 2675-80

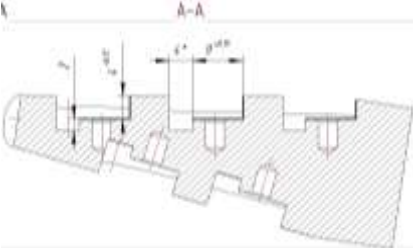
030	Токарна з ЧПК Підрізати торець, витримуючи розмір 70,2; Точити поверхні, витримуючи розміри Ø135; 5; Точити поверхні, витримуючи розміри Ø150; 5; 47,5; 25; Точити поверхні, витримуючи розміри R50; Ø10		Токарний з ЧПК НААС ST10 різець підрізний ГОСТ 18879-73 різець прохідний ГОСТ 18879-73 різець прохідний ГОСТ 18879-73 Різець фасонний спеціальний;	Патрон трьохкула чковий ГОСТ 2675-80
035	Протяжна Протягнути паз, витримуючи розміри 85,4; 22;		Горизонтально- протяжний 7523 Протяжка Ø80 H=22мм ГОСТ 18218-80	Пристосу вання УСП
040	Фрезерна з ЧПК Фрезерувати 2 пази, витримуючи розмір 25		Вертикально- фрезерний 3 ЧПК NHX4000 Фреза кінцева Ø25 Z=5 ГОСТ 17026-71	Пристосу вання УСП
045	Фрезерна з ЧПК Фрезерувати 2 пази, витримуючи розмір 25		Вертикально- фрезерний 3 ЧПК NHX4000 Фреза кінцева Ø25 Z=5 ГОСТ 17026-71	Пристосу вання УСП

050	Фрезерна з ЧПК Фрезерувати 12 уступів, витримуючи розміри 8; 10; 43°; 3°; 29; 134;		Вертикально- фрезерний 3 ЧПК BFR 10-NC Фреза кінцева Ø16 Z=5 ГОСТ 17026-71	Пристосу вання УСП
055	Фрезерна з ЧПК Фрезерувати 12 уступів, витримуючи розміри 8; 10; 43°; 3°; 29; 134;		Вертикально- фрезерний 3 ЧПК BFR 10-NC Фреза кінцева Ø16 Z=5 ГОСТ 17026-71	Пристосу вання УСП
060	Фрезерна з ЧПК Фрезерувати 12 уступів, витримуючи розміри 20; R5; 30°; 31°;		Вертикально- фрезерний 3 ЧПК BFR 10-NC Фреза кінцева Ø16 Z=5 спеціальна	Пристосу вання УСП 3 поворотн им столом
065	Фрезерна з ЧПК Фрезерувати 12 місць, витримуючи розмір 7°;		Вертикально- фрезерний 3 ЧПК BFR 10-NC Фреза кінцева Ø16 Z=5 ГОСТ 17026-71	Пристосу вання УСП

070	Фрезерно-свердлильна ЧПК 3 Фрезерувати канавок, витримуючи розміри 15; 13±0,05; 55; 4; 2; 30 Свердлити 30 отв. на глибину 5 мм, попередньо на Ø3,82 мм Нарізати різьбу 30 отв. М4-7Н Зенкувати фасок, витримуючи розміри 0,6x45 30		Фрезерний ЧПК Hermle C800 3 Фреза кінцева Ø4 Z=2 ГОСТ 17026-71 Свердло Ø3,82 ГОСТ 10902-77; Мітчик машинний ГОСТ 24705-81 Зенкер Ø5,2 ГОСТ 12489-71	Прийомування УСП 3 поворотним столом
075	Фрезерно-свердлильна ЧПК 3 Фрезерувати канавок, витримуючи розміри 15; 13±0,05; 55; 4; 2; 30 Свердлити 30 отв. на глибину 5 мм, попередньо на Ø3,82 мм Нарізати різьбу 30 отв. М4-7Н Зенкувати фасок, витримуючи розміри 0,6x45 30		Фрезерний ЧПК Hermle C800 3 Фреза кінцева Ø4 Z=2 ГОСТ 17026-71 Свердло Ø3,82 ГОСТ 10902-77; Мітчик машинний ГОСТ 24705-81 Зенкер Ø5,2 ГОСТ 12489-71	Прийомування УСП 3 поворотним столом

080	Фрезерно-свердлильна ЧПК 3 Фрезерувати 12 канавок, витримуючи розміри 1,35; R5; Свердлити 12 отв. на глибину 5 мм, попередньо на Ø3,82 мм Нарізати різьбу 12 отв. М4 Зенкувати 12 фасок, витримуючи розміри 0,4x45		Свердлильний з ЧПК HAAS VF-5/40 Фреза кінцева Ø10 Z=4 ГОСТ 17026-71 Свердло Ø3,82 ГОСТ 10902-77; Мігчик машинний ГОСТ 24705-81 Зенкер Ø5,2 ГОСТ 12489-71	Пристосування УСП 3 поворотним столом
085	Термообробка (гартування)	-	Піч	-
090	Термообробка (відпуск)	-	Піч	-
095	Галтування	-	Галтувальний верстат	-
105	Плоско-шліфувальна Шліфувати поверхню, витримуючи розмір 70,1		Плоско-шліфувальний ЗП722 Круг шліфувальний 1-450x80x50 ГОСТ 2424-83	Пристосування спеціальне
110	Плоско-шліфувальна Шліфувати поверхню, витримуючи розмір 70		Плоско-шліфувальний ЗП722 Круг шліфувальний 1-450x80x50 ГОСТ 2424-83	Пристосування спеціальне

115	Шліфувальна			Внутришньо-шліфувальний 3К228В Круг шліфувальний 1-64х100х50 ГОСТ 2424-83	Пристосування спеціальне
120	Шліфувальна з ЧПК	30 посадкових місць під ріжучі пластини, витримуючи розміри 2, 4, 9;		Шліфувальний з ЧПК Precimat 408 Головка шліфувальна АW 4х15 24А ГОСТ 2447-82	Пристосування спеціальне
125	Шліфувальна з ЧПК	30 посадкових місць під ріжучі пластини, витримуючи розміри 2, 4, 9;		Шліфувальний з ЧПК Precimat 408 Головка шліфувальна АW 4х15 24А ГОСТ 2447-82	Пристосування спеціальне

				
130	Слюсарна	-	Слюсарний верстак	-
135	Промивка	-	Мийна машина	-
140	Контрольна	-	Контрольний стіл	Пристосування для контролю
145	Маркування	-	Контрольний стіл	-

Для покращення та оптимізації виробництва деталі «Корпус фрези дискової модульної» необхідно провести ряд операцій:

- для скорочення затрат часу при проведенні контрольних замірів поверхонь деталі передбачити активні методи контролю
- спроектувати пристрій для поліпшення закріплення та більш точного позиціонування деталі на верстаті
- складні операції токарної обробки виконувати на верстатах з ЧПК.

Втілення цих змін до технологічного процесу дозволяють підвищити економічну ефективність та продуктивність роботи, а також точність виконуваного виробу.

4.4. Розрахунок режимів різання

За основу методу розрахунку режимів різання взято застосування емпіричних формул, коефіцієнтів та значень, отриманих експериментальним шляхом. Дані залежності дають змогу розрахувати основну частину параметрів, які характеризують процеси різання та отримання заготовок при різних умовах обробки. Окрім цього враховують параметри різального інструменту та його розміри, матеріал інструменту, а також заготовки, обладнання що використовується при обробці деталі.

4.4.1 Режими різання при точінні, операція 010

Обробка виконується на токарному верстаті мод.16K20. Обробка виконується у патрон трьохкулачковому ГОСТ 2675-80.

Перехід №1 – Підрізати торець, витримуючи розмір 73. Інструмент - різець підрізний ГОСТ 18879-73.

Знаходимо глибину різання t , мм для першого переходу:

$$t = 75 - 73 = 2,0 \text{ мм}$$

Вибираємо подачу - S_0 мм/об [22, ст.268, табл.13] $S_0 = 0,35$ мм/об.

Коректуємо значення подачі за паспортом верстату, приймаємо менше значення $S_{0\text{вт}}$ (мм/об). Приймаємо $S_{0\text{вт}} = 0,35$ мм/об.

Визначаємо швидкість різання, яка допускається властивостями різця за формулою:

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot t^x \cdot S_{0\text{вт}}^y} \cdot K_v, \text{ м/хв}, \quad (4.10)$$

де T – стійкість інструменту, $T = 60$ хв;

C_v , m , x , y вибираємо з [22, ст. 269-270, табл. 17], $C_v = 350$, $m = 0,2$, $x = 0,15$, $y = 0,35$;

$$K_v = K_{mv} \cdot K_{nv} \cdot K_{uv} \cdot K_{\phi v} \cdot K_{\phi lv} \cdot K_{rv}, \quad (4.11)$$

де K_{mv} – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив фізико - механічних властивостей оброблюваного матеріалу на швидкість різання [22, ст. 261, табл.1];

$$K_{mv} = K_\Gamma \left(\frac{750}{\sigma_B} \right)^{n_v}, \quad (4.12)$$

де K_Γ – група сталі по оброблюваності, $K_\Gamma = 1,0$ [22, ст. 263, табл. 2];

n_v – показник степені, $n_v = 1,0$;

K_{nv} – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив стану поверхні заготовки на швидкість різання [22, ст. 263, табл. 5];

K_{uv} – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив інструментального матеріалу на швидкість різання [22, ст. 263, табл. 6];

K_{rv} – поправочний коефіцієнт, який враховується для інструменту з різальною частиною зі швидкорізальної сталі [22, ст. 271, табл. 18];

$K_{\phi v}, K_{\phi 1v}, K_{rv}$ – поправочні коефіцієнти, які враховують вплив геометричних параметрів різця на швидкість різання [22, ст. 271, табл. 18].

$$K_v = 0,8 \left(\frac{750}{930} \right)^{1,0} \cdot 0,8 \cdot 0,65 \cdot 0,9 \cdot 0,97 \cdot 0,94 = 0,28$$

$$V = \frac{350}{60^{0,2} \cdot 2,0^{0,15} \cdot 0,35^{0,2}} \cdot 0,28 = 48,04 \text{ м/хв}$$

Визначаємо частоту обертів оброблюваної деталі, яка відповідає знайденій швидкості головного руху різання в хв^{-1} :

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_{\max}}, \quad (4.13)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 48,04}{3,14 \cdot 350} = 44$$

Одержані значення частоти обертів, оброблюваної деталі коректуємо за паспортом верстату та приймаємо найближче менше значення $n_{\text{вт}} = 40 \text{ хв}^{-1}$

Визначаємо дійсну швидкість різання в м/хв.

$$V_d = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{\text{вт}}}{1000}, \quad (4.14)$$

$$V_d = \frac{3,14 \cdot 350 \cdot 40}{1000} = 44,0 \text{ м/хв}$$

Визначаємо силу різання P_z за формулою:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V_d^n \cdot K_p, \quad (4.15)$$

де C_p, x, y, n визначаємо по [22, ст. 273-274], $C_p=300$, $x=1,0$, $y=0,75$, $n=0$.

$$K_p = K_{mp} \cdot K_{yp} \cdot K_{\varphi p} \cdot K_{\lambda p} \cdot K_{rp}, \quad (4.16)$$

де K_p – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив конкретних умов обробки.

K_{mp} – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив фізико - механічних властивостей оброблюваного матеріалу на силові залежності [22, ст. 264, табл. 9].

$K_{\varphi p}, K_{yp}, K_{\lambda p}, K_{rp}$ – поправочний коефіцієнт, який враховує вплив геометричних параметрів різця на силу різання [22, ст. 275, табл. 23].

$$K_p = \left(\frac{930}{750}\right)^{0,75} \cdot 0,94 \cdot 1,15 \cdot 1,0 \cdot 0,93 = 1,18$$

$$P_z = 10 \cdot 300 \cdot 2,0^1 \cdot 0,35^{0,75} \cdot 44,0^0 \cdot 1,18 = 3221,7 \text{ Н}$$

Визначаємо потужність, витрачену на різання в кВт.

$$N = \frac{P_z \cdot V_d}{1020 \cdot 60}, \quad (4.17)$$

$$N = \frac{3221,7 \cdot 44}{1020 \cdot 60} = 2,32 \text{ кВт}$$

Вибраний режим різання перевіряємо по потужності верстату за умовою:

$$N_{\text{різ}} < N_{\text{шп}},$$

де $N_{\text{шп}}$ - потужність на шпинделі верстату.

$$N_{\text{шп}} = N_{\text{дв}} \cdot \eta, \text{ кВт}, \quad (4.18)$$

де $N_{\text{дв}}, \eta$ вибираємо з [22, ст. 421], $N_{\text{дв}} = 10 \text{ кВт}$, $\eta = 0,75$

$$N_{\text{шп}} = 10 \cdot 0,75 = 7,5 \text{ кВт}$$

$$2,32 \text{ кВт} < 7,5 \text{ кВт} \text{ — умова виконується}$$

Визначаємо машинний час за формулою:

$$t_0 = \frac{L}{n \cdot S_{\text{овт}}} \cdot i, \text{ хв}, \quad (4.19)$$

де L – шлях інструменту в напрямку подачі в мм;

i – кількість робочих ходів,

$$L = l + y + \Delta \quad (4.20)$$

де l – розмір поверхні, що оброблюється в напрямку подачі в мм;

$y = t \cdot \tan \varphi$ – величина врізання мм, де φ – головний кут в плані;

$\Delta = 1 \div 3 \text{ мм}$ – вихід ріжучого інструменту (перебіг);

$$t_0 = \frac{175 + 2,0 + 3}{40 \cdot 0,35} \cdot 1 = 12,86 \text{ хв}$$

Перехід №2 – Точити поверхні, витримуючи розміри $\varnothing 136,2$; 54.
Інструмент – різець прохідний ГОСТ 18879-73.

Знаходимо глибину різання t , мм для першого переходу:

$$t = 73 - 54 = 19 \text{ мм}$$

Приймаємо глибину різання 3,2 мм, кількість проходів 6.

Вибираємо подачу - S_0 мм/об [22, ст.268, табл.13] $S_0 = 0,35 \text{ мм/об}$.

Коректуємо значення подачі за паспортом верстату, приймаємо менше значення $S_{0\text{вт}}$ (мм/об). Приймаємо $S_{0\text{вт}} = 0,35 \text{ мм/об}$.

Визначаємо швидкість різання, яка допускається властивостями різця за формулою (4.10):

$$K_v = 0,8 \left(\frac{750}{930} \right)^{1,0} \cdot 0,8 \cdot 0,85 \cdot 1,0 \cdot 0,97 \cdot 0,94 = 0,40$$

$$V = \frac{350}{60^{0,2} \cdot 3,2^{0,15} \cdot 0,35^{0,2}} \cdot 0,40 = 64,0 \text{ м/хв}$$

Визначаємо частоту обертів оброблюваної деталі, яка відповідає знайдений швидкості головного руху різання за формулою (4.13):

$$n = \frac{1000 \cdot 64,0}{3,14 \cdot 350} = 58,2$$

Одержані значення частоти обертів, оброблюваної деталі коректуємо за паспортом верстату та приймаємо найближче менше значення $n_{\text{вт}} = 50 \text{ хв}^{-1}$

Визначаємо дійсну швидкість різання в м/хв за формулою (4.14)

$$V_d = \frac{3,14 \cdot 350 \cdot 50}{1000} = 55,0 \text{ м/хв}$$

Визначаємо силу різання P_z за формулою (4.15):

$$P_z = 10 \cdot 300 \cdot 3,2^1 \cdot 0,35^{0,75} \cdot 55,0^0 \cdot 1,18 = 5154,71 \text{ Н}$$

Визначаємо потужність на різання в кВт за формулою (4.17):

$$N = \frac{5154,71 \cdot 55}{1020 \cdot 60} = 4,63 \text{ кВт}$$

$$4,63 \text{ кВт} < 7,5 \text{ кВт} \text{ — умова виконується}$$

Визначаємо машинний час за формулою (4.19):

$$t_0 = \frac{106,9 + 3,2 + 3}{50 \cdot 0,35} \cdot 6 = 38,78 \text{ хв}$$

Загальний час по операції складає 51,64 хв.

4.4.2 Режими різання при свердлінні, операція 020

Обробка отвору виконується на свердлильному верстаті мод.МА655.

Інструмент – свердло Ø78 ГОСТ 10903-77.

Визначаємо глибину різання t , мм при свердлінні:

$$t = \text{Ø}78 / 2 = 39 \text{ мм}$$

Вибираємо подачу S_0 , мм/об по [22, ст.277,табл.25] - $S_0=0,4$ мм/об.

Визначаємо швидкість різання при свердлінні за формулою:

$$V = V_{\text{таб}} \cdot K_{Mv} \cdot K_{nv} \text{ м/хв} \quad (4.21)$$

$$V = 81 \cdot 0,75 \cdot 0,9 = 54,68 \text{ м/хв}$$

Визначаємо частоту обертання свердла відповідно знайдений швидкості різання за формулою:

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_{\text{св}}}, \text{ хв}^{-1} \quad (4.22)$$

$$n = \frac{1000 \cdot 54,68}{3,14 \cdot 78} = 223 \text{ хв}^{-1}$$

Коректуємо частоту обертання свердла за паспортним даними верстату і встановлюємо дійсну частоту обертання - $n_{\text{ем}} = 180 \text{ хв}^{-1}$.

Визначаємо дійсну швидкість різання свердла за формулою:

$$V_d = \frac{\pi \cdot D_{\text{св}} \cdot n_{\text{вТ}}}{1000}, \text{ м/хв} \quad (4.23)$$

$$V_d = \frac{3,14 \cdot 78 \cdot 180}{1000} = 44,1 \text{ м/хв}$$

Знаходимо силу різання та крутний момент при свердлінні за формулами:

$$P_0 = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot S_o^y \cdot K_p, \text{ Н} \quad (4.24)$$

$$M_{\text{кр}} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot S_o^y \cdot K_p, \text{ Н} \quad (4.25)$$

де C_p, q, y, C_M, q, y , — визначаємо по [22, стр.281, табл.32]; $C_p = 68, q = 1,0, x =, y = 0,7$; — для сили різання, $C_M = 0,0345, q = 2,0, x =, y = 0,8$; — для крутного моменту.

$$P_0 = 10 \cdot 68 \cdot 78^{1,0} \cdot 0,4^{0,7} \cdot 0,63 = 17946,75 \text{ Н}$$

$$M_{\text{кр}} = 10 \cdot 0,0345 \cdot 78^{2,0} \cdot 0,4^{0,7} \cdot 0,63 = 710,22 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Визначаємо потужність, витрачену на різання в кВт за формулою:

$$N = \frac{M_{\text{кр}} \cdot n}{9750}, \quad (4.26)$$

$$N = \frac{1127,33 \cdot 180}{9750} = 13,11 \text{ кВт}$$

Визначаємо режим різання перевіряємо по потужності верстату за умовою та формулою (1.29):

$$N_{\text{шп}} = 21 \cdot 0,8 = 16,8 \text{ кВт} > 13,11 \text{ кВт} \text{ — умова виконується}$$

Визначаємо машинний час при свердлінні за формулою:

$$t_0 = \frac{L}{n \cdot S_o} \cdot i, \text{ хв} \quad (4.27)$$

$$y = 0,5 \cdot D, \text{ мм} \quad (4.28)$$

$$y = 0,5 \cdot 78 = 39 \text{ мм}$$

$$L = 71,2 + 39 + 5 = 115,2 \text{ мм}$$

$$t_0 = \frac{115,2}{180 \cdot 0,4} \cdot 1 = 1,6 \text{ хв}$$

Висновки

В цьому розділі ми розраховували режими різання згідно довіднику, склали технологічний процес з дотриманням всіх рекомендацій обробки деталей та підбору оброблюваного обладнання з досягненням найбільшої економічної вигоди та мінімальними затратами часу на виготовлення деталі. Також провели аналіз технологічного процесу та внесли певні поправки задля кращої оптимізації.

Наступним етапом є прорахунок економічного ефекту від впровадження нової конструкції фрези та розробка відповідного STARTUP проекту.

РОЗДІЛ 5. STARTUP: ЗБІРНА ДИСКОВА ФРЕЗА ІЗ ТВЕРДОСПЛАВНИМИ ПЛАСТИНАМИ СТАНДАРТНОЇ ФОРМИ

У STARTUP проєкті розглядаються переваги та недоліки запропонованої конструкції збірної дискової фрези зі стандартними твердосплавними пластинами над аналогами які існують на ринку.

Опис ідеї проєкту

Розроблену дискову фрезу зі схемою розташування стандартних пластин вздовж твірної гіперболоїда, будемо рекомендувати для виготовлення зубчастих коліс з модулем 10. В проєкті для порівняння будуть розглядатися аналоги від такі виробників як «Sandvik Coromant», «Ingersoll», «LMT Fette». Ідея STARTUP в тому що завдяки нашій конструкції з використанням стандартних пластин, вартість обслуговування прогресивного ріжучого інструмента буде значно нижчою, ніж аналогічних продуктів на ринку. Дані розрахунки наведенні в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Порівняння розробленої моделі фрези із моделями інших виробників

Виробник інструменту	Модель фрези	К-ть ріжучих пластин, шт	Вартість однієї пластини, \$	Загальна вартість пластин, \$
Sandvik Coromant	CoroMill 170	24	49	1500
		12	27	
Ingersoll Cutting Tools	3SW8F350010GA-00	24	35	1056
		12	18	
LMT Fette	7078811	24	14	576
		24	10	
Проектowana фреза	проект	60 (квадрат)	1	90
		12 (круг)	2,5	

Враховуючи вартість твердосплавних пластин, можна зробити висновок, що експлуатація та обслуговування проектованої фрези буде економічно доцільнішою.

ВИСНОВКИ

В роботі досліджено формоутворення дисковими модульними фрезами профілю зубчастого колеса з параметрами $m = 10$ мм, $Z = 21$, $x = 0$.

Розроблено прикладні програми в середовищі Scilab що дозволяють досліджувати формоутворення профілю зубчастого колеса і автоматично формувати файл з координатами точок профілю зубчастого колеса призначеного для CAD систем з його автоматичної побудови в середовищі CAD – Solidworks.

Визначено вплив параметрів ріжучого інструменту на профіль западини зубчастого $m = 10$ мм, $Z = 21$, $x = 0$, проведено аналіз форми западини зубчастого колеса отриманими такими рейками та встановлено інструмент, яким можна отримати необхідний профіль западини.

На основі вихідного інструментального контуру на базі гіперболоїда розроблено збірну дискову фрезу, у якій різальна частина реалізована непереточуваними твердосплавними пластинами стандартної форми (круглі, квадратні) на відміну від аналогів «Sandvik Coromant», «Ingersoll» де різальна частина реалізована пластинами спеціальної форми. Що забезпечує зменшення витрат на виготовлення та експлуатацію цього розробленого інструмента в порівнянні з аналогами.

ДОДАТКИ

Програмний код для розрахунків у середовищі MATHCAD:

```

%% фреза гіперболоїдна пальцева для нарізання зубчастих евольвентних
коліс.

clc
clear all
close('all')
%% xdel(winsid())

global ra rf Xa Ya rb w0 rd c a RI RG1 ku XE1 YE1 RY1 rf1 b

deg=pi/180;

m=10; %% модуль зубчастого колеса
Zk=12; %% кількість зубів зубчастого колеса
x=0.0; %% к-нт зміщення зубчастого колеса
dS=0.0; %% величина зменшення товщини зуба колеса для створення бічного
зазору
an=20*deg; %% кут вихідного профлю зубчастого колеса
%% основні поррахункові параметри зубчастого колеса
rd=0.5*m*Zk; %% ділильний радіус зубчастого колеса
ra=rd+m+x*m; %% радіус вершин зубів колеса
rf=rd-1.25*m+x*m; %% радіус западини зубів колеса
rb=rd*cos(an); %% радіус основного кола зубчастого колеса
%% параметри для розрахунку координат точок евольвенти профілю зуба
w=(0.5*pi*m-2*m*x*tan(an)+dS)/(2*rd); %%  $M_{PI} \cdot m \cdot 0.5 + dS -$ 
2*m*x*tan(v2*M_PI/180)
TETA=tan(an)-an; %%
w0=w-TETA; %%
%% координати вершинної точки рейки, що фрмують перехідну криву у
ніжки зуба
Ya=-1.25*m+x*m; %%

```

```

Xa=(0.5*(0.5*pi*m-2*m*x*tan(an)+dS)-(1.25*m-x*m)*tan(an)); %%
%% параметричні функції перехідної кривої зуба
%%
%% x0=[2;rf];

x0=[0;rd];
options = optimset('Display','off');
REZRPA = fsolve(@RPA,x0,options);
%% disp(REZRPA);
RPA(REZRPA);
rf1=REZRPA(2);
tmin=REZRPA(1);
%
tmax = fsolve(@RPF,-2,options);
%
ku=300; %% кількість розрахункових точок
T1=linspace(tmin,tmax,ku);

RY2=linspace(rf1+0.5*(ra-rf1),ra,ku);
%RY1=linspace(rf1,ra-0.5*(ra-rf1),ku);
RY1=linspace(rf1,ra,ku);
RDN=abs(RY1-rd);
[RDmin, kuRD]=min(RDN);

%% координати точок перехідної кривої
for j=1:ku
    XP1(j)=xP(T1(j));
    YP1(j)=yP(T1(j));
    ZP1(j)=0;
end

```

%% координати точок евольвентної кривої половина профілю

for j=1:ku

XE1(j)=RY1(j)*sin(wy(RY1(j)));

YE1(j)=RY1(j)*cos(wy(RY1(j)));

ZE1(j)=0;

end

%% координати точок евольвентної кривої повний профіль

for j=1:ku

XE1P(j)=RY2(j)*sin(wy(RY2(j)));

YE1P(j)=RY2(j)*cos(wy(RY2(j)));

ZE1P(j)=0;

end

%% координати точок радіуса западин

XPmax=xP(tmax);

YPmax=yP(tmax);

tDrf=atan(XPmax/YPmax);%% кутове значення розгортки половини дуги сектора западин

TRF1=linspace(0.5*pi-tDrf,0.5*pi+tDrf,ku);

XRF1=rf*cos(TRF1);

YRF1=rf*sin(TRF1);

ZRF1=0*rf*sin(TRF1);

%% розрахунок точок гіперболоїда

global YF RAI

ku1=50;% кількість точок гіперболоїда на колі

TG1=linspace(0,2*pi,ku1);

```

RAI=0.5*270;RG1=rf+RAI;
%a=25.8; b=15.93;c=7.6;
%% RY2=linspace(RAI-(ra-rf1),RAI,ku);

YA1=YE1(ku);YF1=YE1(1);%найбільша і найменша координата Y точок
профілю евольвенти
YF=rf;
%% RY21=linspace(RAI-(YA1-YF),RAI-(YF1-YF),ku);
a0=RAI-2.5*m;b0=19;c0=19;

RY22A = RAI-YE1(ku)+YF;
RY22RD = RAI-YE1(kuRD)+YF;
UA1=(-(a0 + RY22A)*(a0 - RY22A))^(1/2)/a0;
URD1=(-(a0 + RY22RD)*(a0 - RY22RD))^(1/2)/a0;
ACOSA=tan(0.5*pi-acos(rb/ra));
c02=a0.*ACOSA.^(-1).*UA1.*(1+UA1.^2).^(-1/2).*(1+2.*UA1.^2).^(-
2).*(3+2.*UA1.^2+2.*(1+UA1.^2).^(1/2));
%% c02=(a0*UA1)/(ACOSA*(UA1^2 + 1)^(1/2));

%% atan(a0/c0)/deg;
c01=a0/(tan(0.5*pi-acos(rb/ra)))-0.0;
%% початкове значення
a=a0;b=0;c=c0;
GP1RD=GIP_axes1(URD1);
TAxesRD=GP1RD(3);
GPRD=GIP1(TAxesRD,URD1);
XG2axesRD=GPRD(1);
YG2axesRD=GPRD(2);
ZG2axesRD=GPRD(3);
b01=XE1(kuRD)-XG2axesRD-2;

```

```
%%
```

```
% b=b0;
```

```
X2I=[a0;b0;c0];
```

```
options = optimset('Display','off');
```

```
[xS,fval] = fminsearch(@MINEVOLDISK1,X2I,options) ;
```

```
xS
```

```
fval
```

```
a=xS(1);b=xS(2);c=xS(3);
```

```
for j=1:ku
```

```
    RY22(j)= RAI-YE1(j)+YF;
```

```
    UG1(j)=(-(a + RY22(j))*(a - RY22(j)))^(1/2)/a;
```

```
    GP1=GIP_axes1(UG1(j));
```

```
    TAxes=GP1(3);
```

```
    GP=GIP1(TAxes,UG1(j));
```

```
    XG2axes(j)=GP(1);
```

```
    YG2axes(j)=GP(2);
```

```
    ZG2axes(j)=GP(3);
```

```
    DELTA(j)=XE1(j)-XG2axes(j);
```

```
end
```

```
b=b+min(DELTA);
```

```
for i=1:ku
```

```

    for j=1:ku1
        GP=GIP1(TG1(j),UG1(i));
        XG2(i,j)=GP(1);
        YG2(i,j)=GP(2);
        ZG2(i,j)=GP(3);
    end
end

%
for j=1:ku
    RY22(j)= RAI-YE1(j)+YF;
    UG1(j)=(-(a + RY22(j))*(a - RY22(j)))^(1/2)/a;
    GP1=GIP_axes1(UG1(j));
    TAxes=GP1(3);
    GP=GIP1(TAxes,UG1(j));
    XG2axes(j)=GP(1);
    YG2axes(j)=GP(2);
    DELTA(j)=XE1(j)-XG2axes(j);
end

MZ1=sign(min(DELTA));
MZ2=sign(max(DELTA));

if MZ1*MZ2 > 0
    MINb=max(abs(DELTA));

else
    MAXDF=max(DELTA);

```

```

    MINDF=min(DELT A);
    MINb=abs(MAXDF-MINDF);
end

TdXG2axes=diff(XG2axes);
TdYG2axes=diff(YG2axes);
TdG=atan(TdYG2axes./TdXG2axes)/deg;

for j=1:ku-1
    TdG1(j)=atan(TdYG2axes(j)/TdXG2axes(j));
    TdG2(j)=atan((a*UG1(j))/(c*(UG1(j)^2 + 1)^(1/2)));
end

KT=49;
u2=[0;1];
KTM=10;
for j=1:2

    XTE(j)=XG2axes(KT)+u2(j)*cos(TdG2(KT))*KTM;
    YTE(j)=YG2axes(KT)+u2(j)*sin(TdG2(KT))*KTM;

end

%% профіль западини зубчастого колеса
figure
hold on
axis equal

```

```

grid on
plot(XP1,YP1,'LineWidth',3,'Color','b ');% бічна права перехідна крива
plot(XE1,YE1,'LineWidth',3,'Color','r ');% бічна права евольв крива
plot(-XE1P,YE1P,'LineWidth',3,'Color','y ');% бічна ліва евольв крива
plot(-XP1,YP1,'LineWidth',3,'Color','b ');% бічна ліва перехідна крива
plot(XRF1,YRF1,'LineWidth',3,'Color','g ');% крива западини зуба
plot(XG2axes,YG2axes,'LineWidth',3,'Color','y ');% крива западини зуба
утворена гіперболоїдом;

%% plot(XTE,YTE,'LineWidth',2,'Color','m ');% дотична до профілю зуба

xlabel('X, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
ylabel('Y, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
title('профіль западини зубчастого колеса+ос гіпер')
hold off

%% 3д модель зачеплення
figure
grid on
axis equal
hold on
view(45,45)
h12=mesh(XG2,YG2,ZG2);
set(h12,'EdgeColor','b')
%
plot3(XP1,YP1,ZP1,'LineWidth',3,'Color','b ');% бічна права перехідна крива
plot3(XE1,YE1,ZE1,'LineWidth',3,'Color','r ');% бічна права евольв крива
%% plot3(-XE1P,YE1P,ZE1P,'LineWidth',3,'Color','r ');% бічна ліва евольв
крива
plot3(-XE1,YE1,ZE1,'LineWidth',3,'Color','r ');% бічна права евольв крива
plot3(-XP1,YP1,ZP1,'LineWidth',3,'Color','b ');% бічна ліва перехідна крива

```

```

plot3(XRF1,YRF1,ZRF1,'LineWidth',3,'Color','g');% крива западини зуба
plot3(XG2axes,YG2axes,ZG2axes,'LineWidth',3,'Color','y');% крива осьового
перерізу гіперболоїду;
plot3([-m;m],[RG1;RG1],[0;0],'LineWidth',3,'Color','black');% крива осьового
перерізу гіперболоїду;
xlabel('X, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
ylabel('Y, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
zlabel('Z, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
%%% title('гіперболоїд + твірні')
hold off
%%% графік відхилення профілю
figure
hold on
% axis equal
grid on
plot(YE1,DELTA,'LineWidth',3,'Color','b');% бічна права перехідна крива
xlabel('Координата Y точки профілю евольвенти,
мм','FontSize',12,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
ylabel('Відхилення профілю евольвенти, мм','FontSize',12,'FontName','Arial
Cyr','FontWeight','bold');
%%% title('профілю від евольвенти',MINb)
hold off

%%% параметри гіперболоїду

%
% x01 = [2*Xa,m,rb];
% options = optimset('Display','off');
% [xS,fval] = fminsearch(@FR3OPT,x01,options) ;
% xS

```

```

% fval
%
%
% %%SA=[1.07444180045113 1.70837411418855 28.1612933734969];
% SA=xS
%
%
%
% a=SA(1);c=SA(2); RG1=SA(3);
% %%
%
%
%
% %% RAKT=[rf1;ra];
% for j=1:ku;
%   RI=RY1(j);
%   %%UG1(j)=fsolve(@FGR,0);
%   UG1(j)=(1/2).*(a.^2+c.^2).^(-1).*((-2).*c.*RG1+(4.*c.^2.*RG1.^2+(-
4).*(a.^2+ ...
%   c.^2).*(a.^2+RG1.^2+(-1).*RI.^2)).^(1/2));
% end
%
%
%
%
%
% for j=1:ku
%   XG1(j)=xG(UG1(j));
%   YG1(j)=yG(UG1(j));
%   ZG1(j)=0;
% end

```

```

% %%% профіль западини зубчастого колеса + крива осьового переїзу
гіперболоїда
% figure
% hold on
% axis equal
% grid on
% plot(XP1,YP1,'LineWidth',3,'Color','b');% бічна права перехідна крива
% plot(XE1,YE1,'LineWidth',3,'Color','r');% бічна права евольв крива
% plot(-XE1,YE1,'LineWidth',3,'Color','r');% бічна ліва евольв крива
% plot(-XP1,YP1,'LineWidth',3,'Color','b');% бічна ліва перехідна крива
% plot(XRF1,YRF1,'LineWidth',3,'Color','g');% крива западини зуба
% plot(XG1,YG1,'LineWidth',3,'Color','g');% крива осьового переїзу
гіперболоїда
% xlabel('X, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
% ylabel('Y, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
% title('профіль западини зубчастого колеса + крива осьового переїзу
гіперболоїда')
% hold off
% %%%
% %%% кутове відхилення променю точок евольвенти та осьового переїзу
гіперболоїда
% for j=1:ku;
%   UgE(j)=asin(XE1(j)/RY1(j));
%   UgG(j)=asin(XG1(j)/RY1(j));
%   DELU(j)=UgG(j)-UgE(j);
%   DELF(j)=RY1(j)*DELU(j);
% end
% MZ1=sign(min(DELF));
% MZ2=sign(max(DELF));
% if MZ1*MZ2 >= 0

```

```

%      DELTA=max(abs(DELF));
%
% else
%      MAXDF=max(DELF);
%      MINDF=min(DELF);
%      DELTA=abs(MAXDF-MINDF);
% end
%
%
% %%% відхилення профілю зубчастого колеса від кривої осьового переізу
гіперболоїда
% figure
% hold on
% %axis equal
% %title('2-D Line Plot')
% title(num2str(DELTA,3),'FontSize',12,'FontName','Arial
Cyr','FontWeight','bold');
% grid on
% plot(RY1,DELF,'LineWidth',3,'Color','b ');% бічна права перехідна крива
% xlabel('X, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
% ylabel('Y, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
% title('відхилення профілю зубчастого колеса від кривої осьового переізу
гіперболоїда')
% hold off
%
% %%% кількість точок гіперболоїда на колі
% ku1=100;
% TG1=linspace(0,2*pi,ku1);
% for i=1:ku
%   for j=1:ku1

```

```

% GP=GIP(TG1(j),UG1(i));
% XG2(i,j)=GP(1);
% YG2(i,j)=GP(2);
% ZG2(i,j)=GP(3);
% end
% end
%% параметри твірних гіперболоїда
%% робоча частина
UGS1=UG1(ku);
UGS2=UG1(1);
%% частина
UGS3=(1/2)*(a^2+c^2)^(-1)*((-2)*c*RG1+(4*c^2*RG1^2+(-4)*(a^2+ ...
c^2)*(a^2+RG1^2+(-1)*rf^2))^(1/2));
UGS=[UGS1;UGS2;UGS3];
%% координати точок твірних гіперболоїда
for j=1:3
    GP=GIP1(0,UGS(j));
    XGS2(j)=GP(1);
    YGS2(j)=GP(2);
    ZGS2(j)=GP(3);
end
XRG=[XGS2(1);XGS2(2)];YRG=[YGS2(1);YGS2(2)];ZRG=[ZGS2(1);ZGS2(2)];
XPG=[XGS2(2);XGS2(3)];YPG=[YGS2(2);YGS2(3)];ZPG=[ZGS2(2);ZGS2(3)];
%
% figure
% grid on
% axis equal
% hold on
% view(45,45)
% h12=mesh(XG2,YG2,ZG2);

```

```

% set(h12,'EdgeColor','b')
% plot3(XG1,YG1,ZG1,'LineWidth',3,'Color','red')
% plot3(XRG,YRG,ZRG,'LineWidth',3,'Color','green')
% plot3(XPG,YPG,ZPG,'LineWidth',3,'Color','red')
% xlabel('X, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
% ylabel('Y, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
% zlabel('Z, мм','FontSize',16,'FontName','Arial Cyr','FontWeight','bold');
% title('гіперболоїд + твірні')
% hold off
%
%% запис координат точок в файл EXEL

%% твірна гіперболоїда - робоча ділянка
RG(:,1)=XRG(:);RG(:,2)=YRG(:);RG(:,3)=ZRG(:);
%% твірна гіперболоїда - перехідна ділянка
PG(:,1)=XPG(:);PG(:,2)=YPG(:);PG(:,3)=ZPG(:);
%% бічна сторона евольвенти
RE(:,1)=XE1(:);RE(:,2)=YE1(:);
%% перехідна крива
RP(:,1)=XP1(:);RP(:,2)=YP1(:);
%% крива западини колеса
RZ(:,1)=XRF1(:);RZ(:,2)=YRF1(:);
%% крива осьового перерізу гіперболоїда
AXG(:,1)=XG2axes(:);AXG(:,2)=YG2axes(:);
%% вісь гіперболоїда
AXG1X=[-m;m];AXG1Y=[RG1;RG1];AXG1Z=[0;0];
AXG1(:,1)=AXG1X(:);AXG1(:,2)=AXG1Y(:);AXG1(:,3)=AXG1Z(:);
%% записуємо в файл EXEL
xlswrite('RG3.xls',RG); % трьохмірні криві - робоча частина гіперболоїда
xlswrite('PG3.xls',PG); % трьохмірні криві - неробоча частина гіперболоїда

```

```

xlswrite('AXG1.xls',AXG1); % трьохмірні криві - вісь гіперболоїда
%%
xlswrite('RE.xls',RE); % плоска крива
xlswrite('RP.xls',RP); % плоска крива
xlswrite('RZ.xls',RZ); % плоска крива
xlswrite('AXG.xls',AXG); % плоска крива

```

```

function f=GIP1(t,u) %% гіперболоїд дискової фрези
global c a RG1 b
f(1)=-c*u+b;
f(2)=a*cos(t)+a*u*sin(t)+RG1;
f(3)=-a*sin(t)+a*u*cos(t);

```

```

function f=GIP_axes1(u) %% осьовий переїз гіперболоїда
global c a RG1 b
f(1)=-c*u+b;
f(2)=(RG1 + (a*(-u^2 + sqrt(1 + u^2)))/sqrt(1 + 2*u^2));
f(3)=atan(u)+pi;
%f(2)=RG1 + (a*sqrt(1 + 1/(1 + u^2)))*(1 + u*(u + sqrt(1 + u^2)))/(2 + u^2);

```

```

function MINb=MINEVOLDISK1(x2)
%%
global YF c a RAI ku XE1 YE1 b

a=x2(1);
b=x2(2);
c=x2(3);

```

```

%%
for j=1:ku
    RY22(j)= RAI-YE1(j)+YF;
    UG1(j)=(-(a + RY22(j))*(a - RY22(j)))^(1/2)/a;
    GP1=GIP_axes1(UG1(j));
    TAxes=GP1(3);
    GP=GIP1(TAxes,UG1(j));
    XG2axes(j)=GP(1);
    YG2axes(j)=GP(2);
    DELTA(j)=XE1(j)-XG2axes(j);

end

%%
% b=b+min(DELTA);
% for j=1:ku
%   RY22(j)= RAI-YE1(j)+YF;
%   UG1(j)=(-(a + RY22(j))*(a - RY22(j)))^(1/2)/a;
%   GP1=GIP_axes1(UG1(j));
%   TAxes=GP1(3);
%   GP=GIP1(TAxes,UG1(j));
%   XG2axes(j)=GP(1);
%   YG2axes(j)=GP(2);
%   DELTA(j)=XE1(j)-XG2axes(j);
% end

MZ1=sign(min(DELTA));

```

```
MZ2=sign(max(DELTA));
```

```
if MZ1*MZ2 > 0
```

```
    MINb=max(abs(DELTA));
```

```
else
```

```
    MAXDF=max(DELTA);
```

```
    MINDF=min(DELTA);
```

```
    MINb=abs(MAXDF-MINDF);
```

```
end
```

```
end
```

```
%%Функція полярного кута евольвенти
```

```
function f=wy(u) %% u - відповідає радіусу точки
```

```
global rb w0
```

```
    f=w0+tan(acos(rb/u))-acos(rb/u);
```

```
end
```

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Метод копіювання. *StudFiles*. URL: <https://studfile.net/preview/819960/page:1/>
2. Метод обкатки. *StudFiles*. URL: <https://studfile.net/preview/819960/page:2/>
3. Методи нарізання зубчатих коліс. *StudFiles*. URL: <https://studfile.net/preview/6021709/page:3/>
4. 4.9 Методи нарізання зубів зубчатих коліс. *StudFiles*. URL: <https://studfile.net/preview/6756248/page:11/>
5. Моїсеєнко О. И, Павлов Л. Е, Діденко С. И. Твердосплавні зуборізні інструменти. М. : Машинобудування, 1977.
6. Ю.Є. Паливода, Ю.Б. Капаціла, І.Г. Ткаченко. Технологія оброблення зубчастих коліс: Навч. посібн. Тернопіль : ТНТУ, 2016. 136 с.
7. ГОСТ 10996-64 Фрези дискові зуборізні модульні. Технічні умови
8. Дискові зуборізні (модульні) фрези. *Інтернет магазин металорізючого та металообробного інструменту*. URL: <http://bs111.ru/frezerovanie/561-diskovye-zuboreznye-modulnye-frezy.html>
9. GearSpect. *GearSpect*. URL: <https://gearspect.com/>
10. Product description - TOS Olomouc s.r.o. *TOS OLOMOUC, s.r.o. - TOS Olomouc s.r.o.* URL: <https://www.tos-olomouc.cz/en/production-program/numerically-controlled-milling-machines/vertical-milling-machine-continuous-control-fv-30-cnc/>
11. Це наша історія. *Gleason Corporation*. URL: <https://www.gleason.com/ru/operations/gleason-pfauter-maschinenfabrik-gmbh-ludwigsburg-germany/this-is-our-story>.
12. Gear hobbing machines | Liebherr - Liebherr. *Liebherr – Internationale Firmengruppe & Familienunternehmen - Liebherr*. URL: <https://www.liebherr.com/en-ru/gear-technology-and-automation-systems/gear-technique/gear-cutting-machines/gear-hobbing-machines/gear-hobbing-machines-4339243>.
13. Sandvik Coromant. *Sandvik Coromant*. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/about-us>.
14. Sandvik Coromant. Рішення для зубофрезерування. Керівництво. <https://polidecktech.com/>. URL: <https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2022/02/Sandvik-Coromant-зубонарізка.pdf>.

15. Ingersoll Cutting Tools. *Ingersoll Werkzeuge GmbH*. URL: <https://www.ingersoll-imc.de/en/about-us/ingersoll-cutting-tools>.
16. Ingersoll Cutting Tools. *INGERSOLL GEAR PRODUCTION*. <https://www.ingersoll-imc.de/>. URL: https://www.ingersoll-imc.de/fileadmin/user_upload/user_upload/pdfs/Kataloge/Katalog_Verzahnung_DE-EN.pdf.
17. Production | LMT Tools. *Präzisionswerkzeuge und Lösungen für Ihre Anforderungen | LMT Tools*. URL: <https://www.lmt-tools.com/en/company/lmt-tools>.
18. LMT Tools. *LMT Fette Gear Cutting Tools and Knowledge*. <https://www.lmt-tools.com/>. URL: https://www.lmt-tools.com/fileadmin/user_upload/content_lmt-tools/content/segmente/verzahnen/downloads/LMT-Tools-Katalog-Verzahnen-s.pdf.
19. Корпорація Gleason. *Gleason Corporation*. URL: <https://www.gleason.com/ru>.
20. Зубофрезерний інструмент. *Gleason Corporation*. URL: <https://www.gleason.com/ru/products/tools/cylindrical/hobbing-and-milling/carbide-tools>.
21. PUKHOVSKYY E. DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED DESIGN SYSTEM FOR FLEXIBLE AUTOMATED PRODUCTION. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2021. Vol. 5, no. 3. URL: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2021.5.3.250168>.
22. Довідник технолога-машинобудівника Т2 / Під ред. А.Г. Косилової и Р.К. Мещерекова – М.: Машинобудування, 1985 – 656с.
23. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці./ Равська Н.С., Мельничук П.П., Мамлюк О.В., Ніколаєнко Т.П., Охріменко О. А. //К.: Вид. СКД-Друк, 2013 – 215с.
24. ГОСТ 27301-87 Пластини ріжучі змінні багатогранні твердосплавні з радіусом при вершині з одностороннім тороїдальним отвором. Конструкція і розміри.