

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри

Машинобудування, мехатроніки і
робототехніки

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

« ____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему:

**Особливості інструменту для зубообробки з розрахунком та
конструюванням зубонарізного довбача**

Виконав здобувач вищої освіти

4 курсу групи ПМ-22мб-3

ОПП «Комп'ютерний інжиніринг
технологій, робототехніка і 3D- друк»

Спеціальності 131 «Прикладна механіка»

_____ Іван МІХЕЄВ

Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр ЛИСЕНКО

Рецензент:

Кропивницький 2025

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-Технологічний факультет
Кафедра машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Перший (бакалаврський) рівень вищої освіти
Галузь знань: 13 Механічна інженерія
Спеціальність: 131 Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма: Комп'ютерний інжиніринг технологій,
робототехніка і 3D друк

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри машинобудування,
мехатроніки і робототехніки
канд. техн. наук, доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«___» _____ 2025р

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
За першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
Міхєєву Івану Миколайовичу

Тема роботи:

Особливості інструменту для зубообробки з розрахунком та конструюванням зубонарізного довбача

Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент Олександр Лисенко
Затверджено наказом ЦНТУ від 20 січня 2025 року № 237-02.

Строк подання роботи до захисту:

12 червня 2025 р.

Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Мета: визначення, розрахунок, розробка конструкції та побудова 3D-моделі інструменту зубонарізний довбач

Завдання:

- проаналізувати теоретичні основи процесу зубонарізання;
- визначити конструктивні особливості зубонарізних довбачів;
- виконати розрахунок та проектування зубонарізного довбача;
- виконати робоче креслення розробленого зубонарізного довбача;
- створити 3D модель розробленого зубонарізного довбача в інженерному середовищі SolidWorks 2023.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури по тематиці роботи	січень, лютий 2025	
2	Виконання загальної частини	лютий 2025	
3	Виконання технологічної частини	березень 2025	
4	Виконання конструкторської частини	квітень 2025	
5	Розробка креслеників	травень 2025	
6	Усунення недоліків після перевірки керівником роботи	травень 2025	
7	Перевірка роботи на академічний плагіат	червень 2025	
8	Рецензування роботи	червень 2025	
9	Захист кваліфікаційної роботи	червень 2025	

Дата видачі завдання: «22» січня 2025р.

Здобувач вищої освіти _____

Іван МИКОЛАЙОВИЧ

Керівник роботи _____

Олександр ЛИСЕНКО

АНОТАЦІЯ

Міхеєв, І. М. Особливості інструменту для зубообробки з розрахунком та конструюванням зубонарізного довбача: кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 131 Прикладна механіка / наук. кер. О.В. Лисенко; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2025. 60 с

Креслеників – разом 3 аркуші формату А1.

Актуальність роботи полягає у забезпеченні вирішення виробничої задачі виготовлення внутрішніх зубчастих коліс, які є важливим компонентом в таких пристроях, як планетарні коробки передач, роботизовані руки та трансмісії гібридних автомобілів.

У кваліфікаційній роботі розглянуто особливості інструменту для зубообробки з розрахунком та конструюванням зубонарізного довбача. Проведено аналіз основних параметрів, що впливають на ефективність різання, зокрема геометрії зуба, кількості зубів, діаметра впадини та зовнішнього діаметра. Виконано розрахунки, які дозволяють визначити оптимальні конструктивні параметри довбача з урахуванням вимог до точності, міцності та зносостійкості. У роботі представлено кінематичну схему процесу нарізання, розрахунки та графічну частину з одним кресленням та двома плакатами, які відображають загальний вигляд довбача, типи довбачів та процес створення 3-Д моделі довбача.

Ключові слова: зубообробка, зубонарізний довбач, геометрія зуба, типи довбачів, кінематична схема, 3D-модель довбача.

ANNOTATION

Mikheiev, I.M. Features of the tool for gear processing with the calculation and design of a gear shaper cutter: qualification bachelor's thesis: Specialty 131 Applied Mechanics/Scientific Adviser O.V. Lysenko; Central Ukrainian National Technical University - Kropyvnytskyi: CNTU, 2025. 60 p

Drawings - 3 A1 sheets in total.

The relevance of the work lies in ensuring the solution of the production task of manufacturing internal gear wheels, which are an important component in devices such as planetary gearboxes, robotic arms, and hybrid car transmissions.

The qualification work considers the features of a tool for tooth processing with calculation and design of a tooth-cutting gouge. An analysis of the main parameters affecting the cutting efficiency, in particular tooth geometry, number of teeth, cavity diameter, and outer diameter, is carried out. Calculations were performed to determine the optimal design parameters of the tooth-cutting, considering the requirements for accuracy, strength, and wear resistance. The paper presents a kinematic diagram of the cutting process, calculations, and a graphic section with one drawing and two posters showing the general appearance of the tooth-cutting gouge, types of tooth-cutting gouges, and the process of creating a 3D model of the tooth-cutting gouge.

Keywords: gear machining, tooth-cutting gouge, tooth geometry, types of tooth-cutting gouge, kinematic diagram, 3D model.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи на тему:

Особливості інструменту для зубообробки з розрахунком та конструюванням зубонарізного довбача

КРБ.ПМ.25.23.68.00.00

Виконав здобувач вищої освіти
4 курсу групи ПМ-22мб-3
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг
технологій, робототехніка і 3D- друк»
Спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Іван МІХЕСВ

Керівник роботи:

_____ Олександр ЛИСЕНКО

Кропивницький 2025

Зміст

Вступ	8
1 Теоретичні основи зубонарізання	10
1.1 Загальні відомості про зубонарізання	10
1.2 Огляд кінематики зубонарізання	11
1.3 Типи конструкцій зубонарізних довбачів	16
1.4 Матеріали виготовлення довбачів	20
1.5 Основні матеріали покриттів для довбачів	22
2 Конструктивні особливості зубонарізних довбачів	24
2.1 Особливості профілю довбача	24
2.2 Геометрія різальних кромок	26
2.3 Покращення геометрії бічних ріжучих кромок	29
3 Розрахунок зубонарізного довбача	33
3.2. Визначення кількості зубів довбача, його ділильного та основного кіл	36
3.3. Розрахунок параметрів довбача у вихідному перерізі	39
3.4. Розрахунок коефіцієнтів зміщення та вихідних відстаней довбача	40
3.5. Розрахунок і визначення додаткових розмірів довбача	46
4 Етапи створення 3Д моделі в SolidWorks 2023	52
Висновки	56
Перелік використаних джерел	58

ВСТУП

Світовий ринок зубонарізання в останні кілька років демонструє різке зростання, що обумовлено збільшенням попиту з боку машинобудівних та робото технічних галузей. Конкурентна боротьба на ринку посилюється завдяки діяльності лідерів галузі, таких як Samputensili, Gleason, MHI, Liebherr, які активно впроваджують інновації та здійснюють глобальну експансію. Водночас освоєння нових ринків, насамперед у країнах з економікою, що розвивається, та регіонах із швидким промисловим зростанням, створює для виробників зубонарізних довбачів суттєві можливості для розвитку. Незважаючи на наявність альтернативних методів, зубодовбання залишається однією з ключових, а в деяких випадках і безальтернативною технологією.

Однією з важливих переваг зубонарізання є його економічна доцільність у широкому діапазоні обсягів як дрібносерійного так і для масового виробництва через останні технологічні досягнення як, вдосконалені матеріали покриття для підвищення зносостійкості та оптимізації терміну служби.

Цей метод є основним, а зачасти навіть єдиним життєздатним методом виготовлення для внутрішніх зубчастих коліс, які є важливим компонентом в таких пристроях, як планетарні коробки передач, роботизовані руки та трансмісії гібридних автомобілів.

Також важливою частиною є те що в останні роки можна побачити значне зростання ринку зубонарізних довбачів основним каталізатором якого є все більш широке застосування сучасних верстатів для нарізання зубчастих коліс у великих виробничих підрозділах завдяки тенденції автоматизації та індустрії в цілому.

Мета роботи полягає у визначенні, розрахунку, розробці конструкції та побудові 3D-моделі інструменту зубонарізний довбач. Для реалізації зазначеної мети необхідно виконати такі **завдання**:

- проаналізувати теоретичні основи процесу зубонарізання;
- визначити конструктивні особливості зубонарізних довбачів;

- виконати розрахунок та проектування зубонарізного довбача;
- виконати робоче креслення розробленого зубонарізного довбача;
- створити 3Д модель розробленого зубонарізного довбача в інженерному середовищі SolidWorks 2023.

Актуальність роботи полягає у забезпеченні вирішення виробничої задачі виготовлення внутрішніх зубчастих коліс, які є важливим компонентом в таких пристроях, як планетарні коробки передач, роботизовані руки та трансмісії гібридних автомобілів.

Практичне значення: у кваліфікаційній роботі розглянуто особливості інструменту для зубообробки з розрахунком та конструюванням зубонарізного довбача. Проведено аналіз основних параметрів, що впливають на ефективність різання, зокрема геометрії зуба, кількості зубів, діаметра впадини та зовнішнього діаметра. Виконано розрахунки, які дозволяють визначити оптимальні конструктивні параметри довбача з урахуванням вимог до точності, міцності та зносостійкості. У роботі представлено кінематичну схему процесу нарізання, розрахунки та графічну частину з одним кресленням та двома плакатами, які відображають загальний вигляд довбача, типи довбачів та процес створення 3-Д моделі довбача.

1 Теоретичні основи зубонарізання

1.1 Загальні відомості про зубонарізання

Зубонарізні довбачі застосовуються в усіх галузях, де пред'являються високі вимоги до якості зубчастих передач. Основними сферами їх використання є автомобільна промисловість де зубонарізні довбачі використовуються для виготовлення шестерень коробок передач, диференціалів та інших елементів трансмісії. Завдяки здатності забезпечити високу точність і міцність зубчастих коліс, ці інструменти є незамінними в сучасному автотранспорті. В авіакосмічній галузі застосовується для виробництва зубчастих коліс авіаційних двигунів, механізмів шасі та систем авіоніки. Зубонарізання забезпечує високу точність та легкість конструкцій, що відповідає вимогам авіаційної безпеки. У важкому машинобудуванні включає виробництво надійних зубчастих механізмів для будівельної, гірничої техніки та промислового обладнання. Довбачі формують масивні зубці, які здатні працювати під великими навантаженнями.

Крім того, технологія зубонарізання активно використовується у відновлювальній енергетиці, робототехніці, медичному обладнанні та загальному машинобудуванні. Зокрема, для вітроенергетичних систем та гірничо-будівельної техніки, довбачі забезпечують можливість виготовлення складних або внутрішніх профілів зубчастих передач.

За даними ринку [1], 70% споживання довбачів припадає на автомобільну та загально-промислово галузі, однак ці інструменти знаходять застосування в усіх сферах, де потрібне формування складних або внутрішніх профілів зубців.

Серед переваг над альтернативними методами обробки процес зубонарізання за допомогою довбачів у порівнянні з іншими методами, такими як зубофрезерування, протягування та копіювальне фрезерування, зубонарізання забезпечує надзвичайно точні розміри та чистоту поверхні, часто без потреби в подальшому шліфуванні. За точністю профілю та кроку цей метод перевершує фрезерування [2]. Універсальність довбачів однаково ефективні як для

зовнішніх, так і для внутрішніх зубців, на відміну від фрезерування, яке не дозволяє обробляти внутрішні зубчасті вінці. Метод зубонарізання дозволяє обробку в обмежених просторах, поблизу фланців або уступів. Однорідність зубців через те що кожен зуб формується індивідуально, завдяки чому досягається висока рівномірність профілю і постійність параметрів, що забезпечує стабільність роботи передачі.

Довбачі мають нижчу вартість у порівнянні з протяжками або модульними фрезами, існують також варіанти зі змінними пластинами, що дозволяє зменшити витрати на обслуговування. Оскільки при довбанні знімається матеріал з одного зуба за раз, відбувається менше втрат на стружку у порівнянні з багатозубим фрезеруванням чи протягуванням. Довбання дозволяє легше та швидше адаптувати інструмент до заготовок різного розміру, що робить метод зручним для малих і середніх серій виробництва.

1.2 Огляд кінематики зубонарізання

Зубонарізання довбачем є методом обробки зубчастих коліс, при якому використовується інструмент у формі зубчастого колеса для нарізання зубців як на зовнішніх, так і на внутрішніх поверхнях заготовки.

Принцип роботи зображений на рисунку 1.1 де у процесі довбання довбач і заготовка обертаються синхронно, наче у справжньому зачепленні, і утворюють профіль зуба методом обкочування. Формування кожного зуба відбувається за допомогою багаторазових проходів, які включають чорнову обробку та чистове доведення. Рухи координуються ЧПК або зубчастою передачею, що дозволяє створювати точні евольвентні профілі. Цей метод дозволяє ефективно виготовляти як зовнішні, так і внутрішні зубчасті колеса, зокрема в складних геометричних умовах поблизу фланців, уступів тощо, де інші методи як-от фрезерування не застосовні.

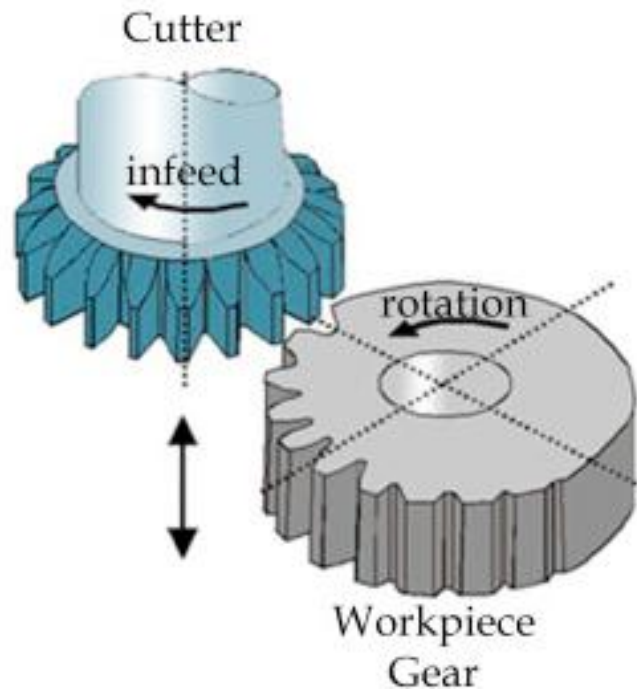


Рисунок 1.1 Принцип роботи зубонарізання довбачем [3]

Під час процесу зубонарізання довбачем основною схемою рухів є поєднання трьох основних рухів: 1. Робочий рух при якому довбач встановлений на шпинделі, який здійснює вертикальні зворотно-поступальні переміщення де рух вниз це робочий хід, під час якого ріжуча кромка довбача знімає метал із заготовки а рух вгору холостий хід, при якому довбач трохи відводиться від заготовки, щоб уникнути контакту з нарізаними зубцями та запобігти задиркам і вібраціям. Такий режим забезпечує високу якість поверхні та стабільну роботу інструмента. 2. Обертальний рух при якому заготовка та довбач одночасно обертаються, імітуючи зачеплення шестерні з зубчастим колесом. Цей рух забезпечується механічною передачею або ЧПК синхронізацією. Завдяки цьому кожен зуб формується в правильному положенні за допомогою поступального контакту зуба довбача із заготовкою. 3. Радіальне переміщення де упродовж кількох робочих ходів довбач поступово подається радіально в напрямку до центра заготовки. Це подавання збільшує глибину зрізу до досягнення повного профілю зуба. Радіальна подача має дуже низьку швидкість порівняно з вертикальним рухом, щоб забезпечити поступову обробку і уникнути перевантаження інструмента де після досягнення повної глибини інструмент

переміщується вгору і повторює процес для наступного зуба через обертання заготовки.

Зубонарізні довбачі використовуються для обробки зовнішніх та внутрішніх циліндричних зубчастих коліс. Кінематичні принципи в обох випадках схожі, проте існують конструктивні та функціональні відмінності.

При зовнішньому зубонарізанні зображеному на рисунку 1.2 ріжучий інструмент взаємодіє із зовнішньою поверхнею заготовки. Під час цього процесу довбач обертається протилежно до заготовки та інструмент подається до центру заготовки, виконуючи формування зубців з її зовнішньої сторони. Такий режим аналогічний обкатуванню довбача по зовнішньому зубчастому колесу.

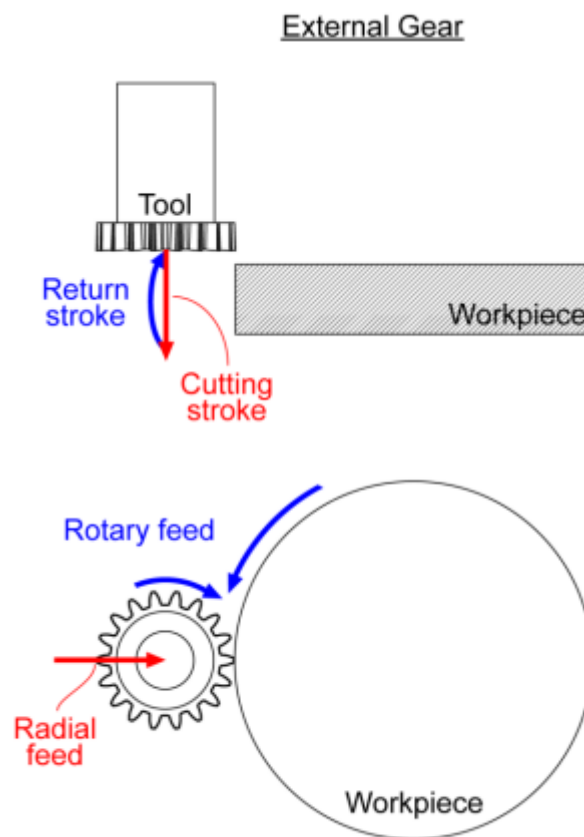


Рисунок 1.2 Зубонарізання зовнішнього зубчастого колеса [4]

При внутрішньому зубонарізанні зображеному на рисунку 1.3 довбач працює всередині порожнистої заготовки, формуючи зубці на її внутрішньому діаметрі де і довбач, і заготовка обертаються в одному напрямку, імітуючи зачеплення зовнішньої шестерні з внутрішнім зубчастим колесом. Ріжуча

частина довбача розташовується всередині кільця зубців. При внутрішньому зубонарізанні довбач для має менше зубців, ніж заготовка, щоб фізично розміститися всередині неї. У випадку зовнішнього нарізання кількість зубів довбача обмежується лише розміром верстата.

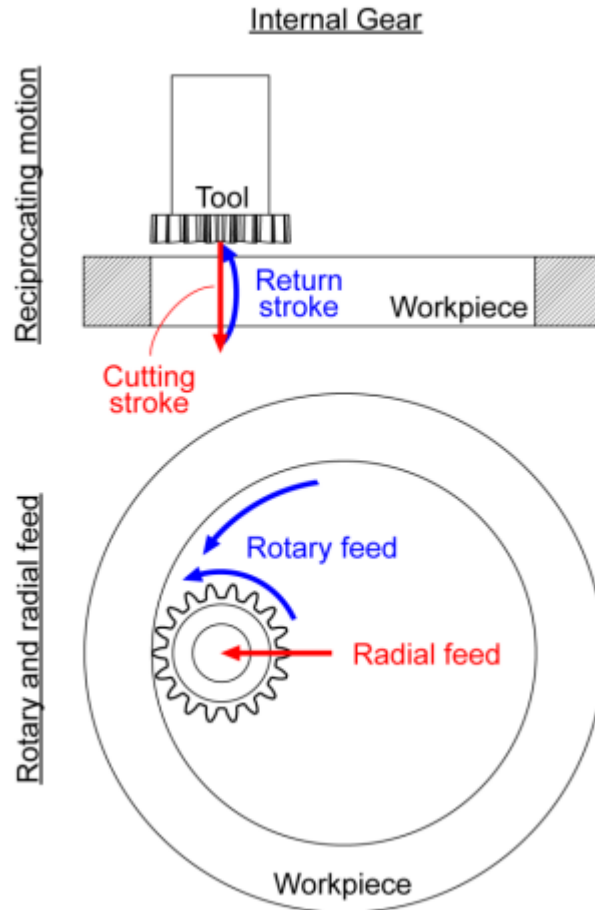


Рисунок 1.3 Зубонарізання внутрішнього зубчастого колеса [4]

Серед відмінностей між зовнішньому та внутрішньому зубонарізанні є напрям подачі де при зовнішньому зубонарізанні подача йде до центру, при внутрішньому від центру, розташування інструмента зовні або всередині заготовки, оберти при зовнішньому зачепленні у різні боки; при внутрішньому в один бік, обмеження за розміром інструмента де внутрішній довбач має бути компактнішим, ніж внутрішній діаметр заготовки.

Обробка зовнішніх та внутрішніх косозубих коліс на рисунку 1.4 здійснюється за однаковими кінематичними принципами, проте з деякими відмінностями у знаках напрямків рухів. Основна відмінність — напрям

гвинтової лінії де для зовнішніх косозубих коліс довбач повинен мати протилежний напрям гвинтової лінії відносно напрямку зубів колеса тоді як для внутрішніх коліс довбач повинен мати той самий напрям гвинтової лінії, що й зуби на заготовці, це забезпечує правильний напрямок зачеплення і коректне геометричне формоутворення.

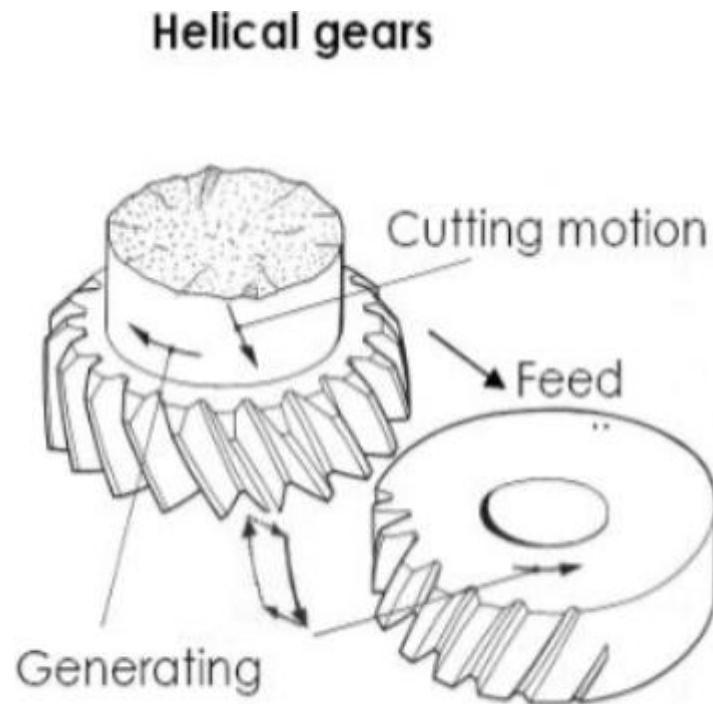


Рисунок 1.4 Зубонарізання косозубих коліс [5]

При довбанні внутрішнього косозубого колеса заготовка орієнтується ідентично до напрямку спіралі довбача, оскільки зубці формуються на внутрішній поверхні, напрямок радіального подавання змінюється, довбач рухається всередину отвору, тоді як при зовнішньому довбанні він рухається назовні.

У всіх випадках реалізуються ті самі три основні рухи: зворотно-поступальний рух довбача, синхронне обертання заготовки та інструмента та радіальна подача для досягнення повної глибини профілю.

Для забезпечення точного розміщення зубців необхідно синхронізувати обертання довбача та заготовки. Це досягається за допомогою зубчастих передач

змінних шестерень або сервоприводів та ЧПК-синхронізації. Взаємозв'язок описується через відношення один оберт заготовки за один оберт довбача. Після кожного зворотно-поступального руху довбача заготовка повертається на частину оберту, що дозволяє інструменту перейти до наступного зуба і так цикл повторюється доти, доки не буде сформовано всі зуби. Між ходами здійснюється незначне радіальне зміщення, що дозволяє поступово досягнути потрібної глибини де у результаті формується повний евольвентний профіль, ідентичний профілю ріжучої кромки інструмента.

1.3 Типи конструкцій зубонарізних довбачів

Для виробництва зубчастих коліс було розроблено багато видів зубонарізних довбачів які відрізняються за типом, розміром та методом кріплення.

Дискові довбачі подібні до зубчастих коліс, оскільки мають плоску конструкцію з евольвентними зубами по зовнішньому краю. Посадка на шпindel довбального верстата здійснюється через внутрішній отвір у центрі інструмента. Основне призначення дискових довбачів — нарізання зовнішніх евольвентних зубчастих коліс, включаючи прямозубі, косозубі, черв'ячні передачі та шліци. Інструменти цього типу охоплюють широкий діапазон розмірів зубчастих коліс. На рисунку 1.5 наведено приклад дискового зубонарізного довбача.



Рисунок 1.5 Дисківий зубонарізний довбач [6]

Стандартні дисківі довбачі працюють з кутом тиску 20° і охоплюють модулі від 0,2 до 25, а їхні діаметри становлять від 10 до 300 мм. Типи інструментів дисківого типу поділяються на чорнові, чистові та напівчистові, включаючи потужні інструменти для грубого знімання припуску та точні інструменти для точного формування геометрії. Широка контактна площа дисківих довбачів забезпечує жорсткість, що робить їх придатними для виробництва середніх партій прямозубих і косозубих коліс у сфері автомобільного та загального машинобудування. Виготовлення дисківих довбачів включає кування або механічну обробку суцільного матеріалу швидкорізальної сталі з подальшим шліфуванням до профілю відповідно до стандартів ANSI, DIN. У процесі обробки інструмент працює подібно до зубчастого колеса, реалізуючи індексацію та зворотно-поступальні рухи, утворюючи по одному зубу на кожен робочий хід у кожній впадині. Точність дисківих довбачів досягає рівня стандарту DIN AA, A, і вони легко піддаються повторному заточуванню. ЧПК-довбальні верстати можуть використовувати ці інструменти для виготовлення декількох зубчастих коліс в одному робочому циклі. Технічні характеристики дисківих довбачів включають: модулі від 0,2 до 25, кут нахилу $\alpha = 20^\circ$, міжцентрова відстань від 32 до 1,4, зовнішній діаметр від 10 до 300 мм; внутрішній отвір — від 22 до 100 мм [7].

Чашковий довбач на рисунку 1.6 відрізняється збільшеною осьюовою довжиною.



Рисунок 1.6 Чашковий зубонарізний довбач [8]

Ця конструктивна особливість була розроблена для вирішення проблеми зіткнення кріпильних елементів з оброблюваною деталлю. Втулка або заглиблення чашоподібної форми слугує місцем для кріплення інструмента. Такі довбачі застосовуються у випадках, коли використання дискових довбачів неможливе, наприклад, при нарізанні зубців поблизу уступів валів або всередині корпусних елементів. Такі довбачі використовуються як для зовнішнього, так і для внутрішнього зубонарізання, коли хвостові інструменти не підходять або дискові не можуть бути застосовані.

Розміри таких довбачів подібні до дискових, однак їхній зовнішній діаметр зменшується через великий центральний отвір. Ці інструменти дозволяють нарізати як зовнішні прямозубі або косозубі зубці на зовнішній поверхні, так і внутрішні зубці на внутрішньому отворі. Чашкові довбачі зберігають жорсткість, подібну до дискових, але дають змогу виконувати зубонарізні операції в обмежених або внутрішніх просторах.

Ключовою рисою хвостових довбачів на рисунку 1.7, є їхня монолітна конструкція, в якій ріжуча частина з зубами та кріпильний хвостовик є єдиним цілим. Для надійної фіксації безпосередньо у шпинделі верстата хвостовик може

мати циліндричну або, частіше виготовляють у вигляді стандартного конуса Морзе.



Рисунок 1.7 Хвостовий зубонарізний довбач [9]

Ключовим призначенням цих довбачів є обробка внутрішніх евольвентних профілів у ситуаціях, де застосування дискових інструментів є технологічно неможливим. Цілісна конструкція надає інструменту високу жорсткість, а його компактна геометрія є фактором для роботи, де для габаритного дискового довбача бракує місця. Водночас, монолітна конструкція є і слабким місцем цих довбачів. На відміну від модульних систем, будь-яке пошкодження зубів робить інструмент непридатним до подальшого використання і веде до його повної заміни.

Значною інновацією є довбачі зі змінними пластинами на рисунку 1.8, які є кращою альтернативою монолітним конструкціям. Вони складаються з міцного сталевго корпусу та комплекту змінних твердосплавних пластин, які виконують функцію ріжучих елементів.



Рисунок 1.8 Довбач зі змінними пластинами [10]

Коли ріжуча кромка зношується, пластину можна замінити на нову. Такий підхід дозволяє виключити процедуру переточування всього інструменту. Досягається суттєве зниження вартості обробки однієї деталі, як приклад Opti-Cut від Gleason [11], демонструє можливість скорочення витрат на деталь до 60% порівняно з інструментами зі швидкорізальної сталі.

1.4 Матеріали виготовлення довбачів

Довбачі виготовляються з різноманітних інструментальних матеріалів, які забезпечують збалансовані властивості: твердість, міцність, в'язкість, зносостійкість, червонотійкість і оброблюваність. Історично основним матеріалом була швидкорізальна сталь завдяки її здатності зберігати твердість при високих температурах. У сучасному виробництві інструментів використовуються також швидкорізальні сталі порошкової металургії, тверді сплави, часто з твердими покриттями.

Швидкорізальні сталі це леговані інструментальні сталі, призначені для роботи на більших швидкостях різання, ніж звичайні вуглецеві сталі. До складу

таких сталей входять хром, вольфрам, молібден, ванадій і, в деяких марках, кобальт. Основні типи швидкорізальних сталей для довбачів: M2 який не містить кобальт, M35 та M42 що містять 5–8% кобальту, T1, T15, T42 це типи з високим вмістом вольфраму.

Ці сталі досягають твердості 62–66 HRC і зберігають її до температур 600–620 °C [12]. Їх висока термостійкість і в'язкість забезпечують опір сколам та тріщинам при переривчастому різанні. До переваг швидкорізальних сталей слід віднести: низька вартість інструменту, простота переточування, висока в'язкість і зносостійкість, придатність для малосерійного та середньосерійного виробництва на заготовках з м'яких сталей.

Довбачі постачаються у формі дисків та хвостовиків, часто з твердими покриттями, що підвищують довговічність. Наприклад, компанія Maxwell Tools виготовляє довбачі з швидкорізальних сталей марок M35, M4, ASP2030 і ASP2052 з покриттями TiN, TiCN, TiAlN. Вони демонструють твердість до 62 HRC, високу в'язкість і зносостійкість при адекватній оброблюваності.

Швидкорізальні сталі порошкової металургії виготовляються шляхом спікання дрібнодисперсних порошків, що забезпечує однорідну мікроструктуру з рівномірно розподіленими карбідами. Марки швидкорізальної сталі порошкової металургії, що застосовуються при виготовленні довбачів: ASP2030, ASP2052, CPM M4, S690, S390. Ці сталі мають вищу твердість до 65 HRC для CPM M4 [13], кращу зносостійкість і червоностійкість, підвищену в'язкість та стійкість до ударних навантажень.

До переваг можна віднести що ці сталі витримують високі швидкості різання, потребують рідших переточувань порівняно з традиційними швидкорізальними сталями, ідеальні для великосерійного виробництва точних деталей, зокрема зубчастих передач автомобілів.

Серед недоліків це те що вони складніші в обробці (оброблюваність 45–50% від сталі з 1% C), мають вищу вартість виробництва порівняно зі звичайною швидкорізальною сталлю.

1.5 Основні матеріали покриттів для довбачів

Процеси напилення тонких покриттів PVD/CVD застосовуються до інструментів зі швидкорізальної сталі для підвищення поверхневої твердості та зниження зносу. Стандартні варіанти покриттів включають нітрид титану (TiN), титан-алюмінієвий нітрид (TiAlN), титан-карбонітрид (TiCN) та нітрид алюмінію-хрому (AlCrN). Термін служби, зносостійкість та граничні швидкості різання залежать від твердості, в'язкості та червоностійкості покриття.

Використання PVD-покриттів почалося саме з TiN у 1970-х роках. Покриття зменшує тертя з оброблюваним матеріалом та знижує контактні навантаження. Згідно з [14], свердла з швидкорізальної сталі марки M2 з покриттям TiN просвердлили 200 отворів проти 50 у непокритих, за однакових режимів. Мітчики [15] з TiN показали удвічі більший ресурс. Твердість TiN сягає 2300 HV, захищаючи від абразивного зносу й кратерного руйнування. До недоліків можна віднести обмежена червоностійкість, окислення TiN починається при температурах нижче 600 °C, через що ефективність швидко знижується при сухій або високошвидкісній обробці.

Поєднання Ti та Al формує покриття з вищою термостійкістю та стійкістю до окислення. При високих температурах TiAlN утворює захисний шар Al_2O_3 , що дозволяє різати на більших швидкостях. У лабораторних дослідженнях TiAlN переважає TiN на інструментах із швидкорізальної сталі. Довбачі, виготовлені методом порошкової металургії та покриті TiAlN, демонстрували кращу продуктивність при обробці загартованих сталей. Експерименти з мітчиками показали, що термін служби TiAlN-покриття перевищував непокриті на 200%, показавши найкращий результат серед усіх покриттів. Попри вищу вартість TiAlN, підвищений ресурс виправдовує витрати. TiAlN є основним вибором в галузях зубообробки — дослідження підтвердили, що це найдовговічніше покриття для високошвидкісної обробки важкооброблюваних сталей.

Покриття TiCN формує дуже тверде покриття (~3000 HV) зі збереженням високої ударної міцності також TiCN демонструє високу стійкість до зламу та

абразивного зносу, що робить його ефективним для високошвидкісної або переривчастої обробки, а також обробки абразивних чи твердих матеріалів. Інструменти з TiCN добре зберігають гостру ріжучу кромку, що робить їх ефективними при роботі з жароміцними або легованими сплавами. Випробування показали, що фрези з TiCN перевершили TiN покриття на 30% у нарізанні зубців. TiCN забезпечує довговічність у чорновій обробці. Однак TiCN окислюється при нижчих температурах, ніж покриття з високим вмістом алюмінію, отже TiCN підходить для сталей, але TiAlN/AlCrN краще працюють при екстремальному нагріві. Покриття AlCrN це одне з найтермостійкіших та найзносоустійкіших покриттів серед PVD, де температура окислення сягає понад 900 °C.

Хоча досліджень AlCrN на швидкорізальних сталях поки що небагато, вже відомо, що при гарячій обробці TiN/TiAlN демонструють гірші результати, ніж AlCrN, серед основних недоліків AlCrN це висока вартість і тенденція до крихкості, проте воно є ідеальним для сухої високошвидкісної обробки жароміцних сталей, зокрема при обкатці та довбанні шестерень.

2 Конструктивні особливості зубонарізних довбачів

2.1 Особливості профілю довбача

Зазвичай, стандартний зуборізний довбач застосовується для формування зубів з ідеальним евольвентним профілем, що не потребує додаткових змін. Проте, для оптимізації робочих параметрів зубчастого колеса його конструкція часто передбачає застосування профілів із модифікаціями. Виробники пропонують зуборізні довбачі з різноманітними змінами геометрії.

Профіль зуба довбача може мати низку конструктивних особливостей, наявність яких часто є обов'язковою вимогою. На рисунку 2.1 продемонстровано шість таких ключових особливостей.

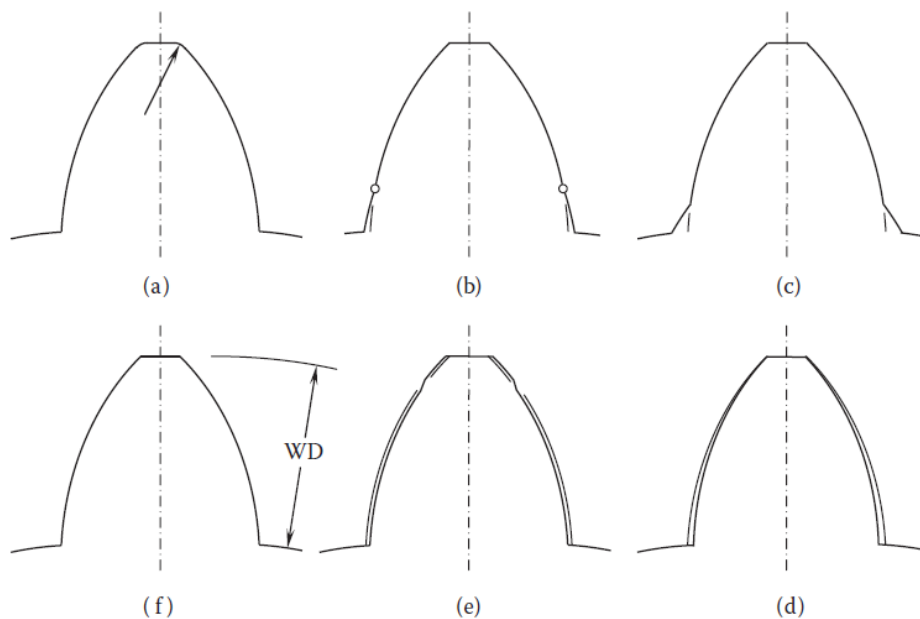


Рисунок 2.1 Особливості профілю зуба довбачів [16]

Модифікація на рисунку 2.1, а передбачено заокруглення гострих кутів на вершині ріжучого інструмента. В результаті у западині між зубами оброблюваного колеса утворюється плавний перехід заданого радіуса. Наявність радіуса підвищує опір зубів на вигин і значно подовжує їх термін служби при

циклічних навантаженнях. Крім того, це захищає сам інструмент від швидкого викришування гострої ріжучої кромки.

Інструменти з розвантажувальними наконечниками, таким типом модифікації знімають додатковий шар металу біля вершини зуба колеса рисунок 2.1 , b. Така модифікація допомагає уникнути небажаного контакту між поверхнями зубів у зачепленні, що, як правило, сприяє зниженню рівня шуму під час роботи передачі. Для високошвидкісних механізмів це є критично важливим для запобігання шуму та концентрації навантаження на краю зуба через його пружну деформацію.

На рисунку 2.1, c зона біля основи зуба довбача має специфічний кут, що дозволяє формувати фаску на вершині зубів оброблюваного колеса. Завдяки заповненню кореня зуба інструмента досягається чіткий злам кромки на вершині зуба деталі. Таке рішення ефективно запобігає утворенню дефектів під час термічної обробки та мінімізує пошкодження від механічних ударів чи задирок при транспортуванні та монтажі, які могли б стати джерелом шуму.

На рисунку 2.1, f робоча поверхня зуба довбача оснащується характерним виступом, який формує підріз біля кореня зуба на заготовці. Цей підріз функціонує як додатковий зазор, головне призначення якого — забезпечити простір для інструментів на наступних етапах фінішної обробки. Довбачі з таким виступом є поширеним вибором для коліс, що в подальшому підлягають шевінгуванню або шліфуванню.

На рисунку 2.1, e профіль зуба інструмента шліфують під дещо зменшеним кутом. Це дозволяє створити припуск на обробку, який рівномірно збільшується від основи до вершини зуба колеса. Така модифікація геометрії залишає необхідний матеріал для фінішних операцій.

На рисунку 2.1, d висота зуба довбача відповідає повній висоті зуба колеса. Завдяки цьому зовнішній діаметр заготовки калібрується до фінального розміру безпосередньо в процесі нарізання зубів. Цей тип модифікації найчастіше знаходить застосування при виготовленні зубчастих передач з дрібним модулем.

У специфічних умовах зубообробки можливе застосування й інших, індивідуально розроблених модифікацій профілю.

2.2 Геометрія різальних кромок

Ріжучі кромки зубонарізних довбачів, що застосовуються для нарізання евольвентних зубчастих коліс, відзначаються невеликими величинами своїх основних геометричних параметрів. Ця особливість робить їх надзвичайно чутливими до точності виготовлення: будь-які, навіть мінімальні, відхилення геометрії від розрахункових значень здатні суттєво знизити стійкість (термін служби) інструмента та негативно позначитися на точності оброблених деталей. З огляду на це, першочергового значення набуває завдання суворого контролю геометрії ріжучих елементів.

У стандартних конструкціях довбачів параметри їхньої верхньої ріжучої кромки є чітко визначеними і сталими: передній кут γ_0 дорівнює 5° та задній кут α_0 дорівнює 6° , а кут нахилу λ_0 дорівнює 0° . Оскільки ці кути є незмінними по всій довжині кромки, їхній детальний аналіз зазвичай не потрібен. Натомість, значно пильнішої уваги та контролю потребують саме бічні ріжучі кромки інструмента.

Для проведення аналізу з ріжучої кромки зубонарізного довбача пов'язують локальну декартову систему координат x_{uz} . Її початок розміщують безпосередньо в досліджуваній точці O_c як показано на рисунку 2.2. Хоча орієнтація осей системи може бути довільною, для наочності та спрощення розрахунків їх розташовують так, як це зображено на схемі.

Виведення рівняння для кута нахилу λ_y в точці m базується на аналізі трьох ключових векторів: вектор A спрямований уздовж лінії, що утворюється при перетині передньої поверхні інструмента R_s з його осьовим перерізом через точку m . Вектор B є дотичним до самої ріжучої кромки в цій же точці.

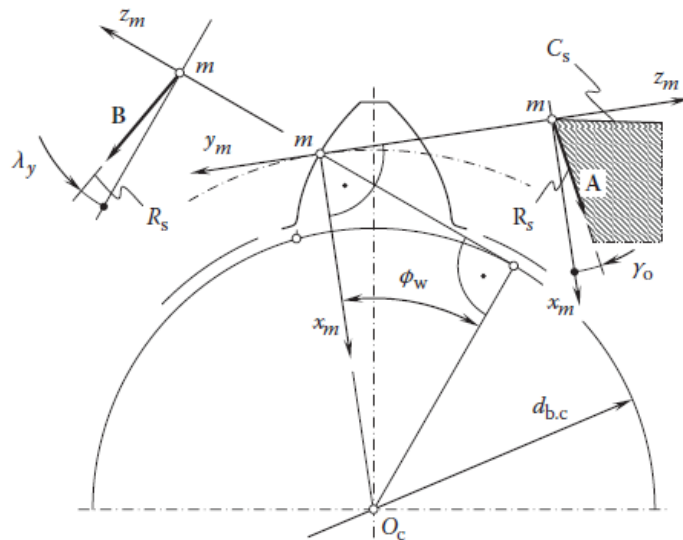


Рисунок 2.2 Геометрія різальної кромки зуба довбача з кутом нахилу λ різальної кромки [16]

Важливою умовою для векторів A , B є те, що їхні проєкції на площину $x_m y_m$ дорівнюють одиниці, $pr_{xy}A = 1$ та $pr_{xy}B = 1$.

Згідно з побудовою, вектори A та B лежать в одній площині. Ця площина є дотичною до передньої поверхні R_s зуба довбача в точці m . Оскільки ці вектори лежать в одній площині, їхній добуток завжди дорівнюватиме нулю.

Нормальний передній кут на бічній ріжучій кромці зуба довбача вимірюється в поперечному перерізі ріжучої кромки площиною, що є перпендикулярною до ріжучої кромки в точці, яка нас цікавить. Передня поверхня R_s стандартного зуборізного довбача має форму конуса обертання. Вісь обертання конуса збігається з віссю довбача.

Для визначення нормального переднього кута γ_N використовується локальна декартова система координат xuz . Початок системи координат xuz знаходиться в точці, що нас цікавить, в межах бічної ріжучої кромки. Координатні осі орієнтовані так, як показано на рисунку 2.3.

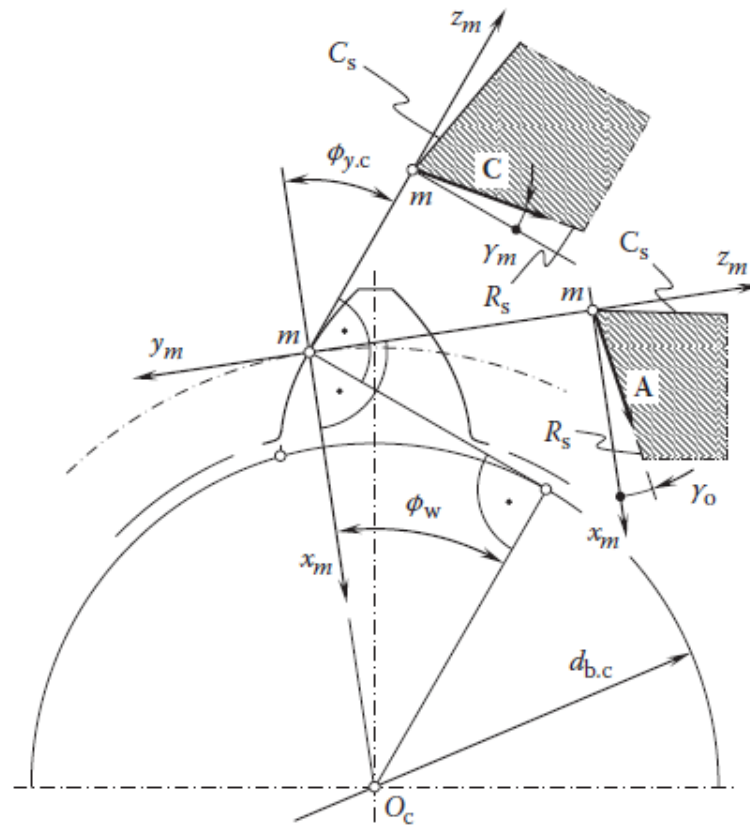


Рисунок 2.3 Геометрія різальної кромки довбача: нормальний передній кут γ_N різальної кромки [16]

Для виведення рівняння для нормального переднього кута γ_N евольвентного зуборізного довбача використовуються три вектори: вектор В використовується для виведення рівняння для переднього кута γ_N . Вектор С спрямований уздовж лінії перетину передньої поверхні R_s з площиною, що є дотичною до основного циліндра зуборізного довбача. Величина вектора С обирається такою, щоб проєкція вектора С на координатну площину $x_m y_m$ дорівнювала одиниці $pr_{xy} C = 1$. Третій вектор — це одиничний вектор j уздовж осі y_m .

За побудовою, вектори А та С розташовані в одній спільній площині. У точці m в межах різучої кромки ця площина є дотичною до передньої поверхні R_s зуба зуборізного довбача. Оскільки вектори А та С утворюють набір з двох компланарних векторів, їхній мішаний добуток дорівнює нулю.

2.3 Покращення геометрії бічних ріжучих кромок

Реальна геометрія ріжучої кромки зубонарізного довбача не відповідає оптимальним вимогам, а її фактичні параметри суттєво відрізняються від бажаних.

Ключова проблема полягає в тому, що кут профілю зуба інструмента, $\varphi_{y.c}$, не є постійним і змінюється по довжині бічної кромки. Він досягає мінімального значення біля основи активного профілю d_{lc} і максимального — на зовнішньому діаметрі $d_{o.c}$. Величина цієї зміни безпосередньо залежить від кількості зубів довбача z і негативно позначається на загальній геометрії ріжучої частини.

Типові довбачі мають критично малий нормальний передній кут γ_N . Для стандартного інструмента з основним переднім кутом $\gamma_0 = 5^\circ$ значення γ_N коливається в діапазоні від 0° до всього лише $2 - 3^\circ$ на зовнішньому діаметрі. Такий вузький і малий діапазон $0-3^\circ$ є недостатнім для ефективного різання, і для підвищення продуктивності кут γ_N необхідно збільшувати. Здавалося б, рішенням може бути збільшення основного переднього кута γ_0 . Однак такий підхід є контрпродуктивним так як для отримання навіть невеликого приросту нормального кута γ_N потрібне непропорційно велике збільшення кута γ_0 а також значне збільшення γ_0 різко погіршує точність самого інструмента, що призводить до суттєвих відхилень профілю нарізаного колеса від заданої геометрії.

Через ці недоліки такий спосіб підвищення продуктивності вважається непрактичним.

Більш ефективним рішенням, особливо для специфічних завдань зубонарізання, є застосування довбачів із модифікованими передніми поверхнями.

На рисунку 2.4 наведено приклад такої поверхні R_s^0 для інструмента великого модуля. Її геометрія є складною: частина поверхні на зовнішньому діаметрі формується циліндричним шліфувальним кругом, а ділянки біля ріжучих кромок — конічним.

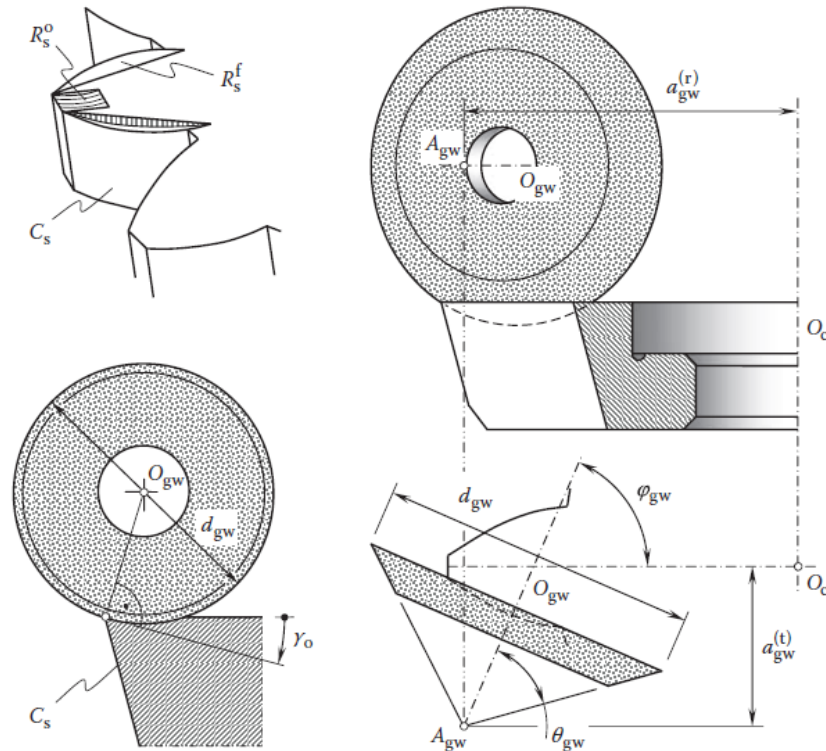


Рисунок 2.4 Модифікація передньої поверхні R_s^o довбача з великим кроком [13]

Для створення такої поверхні необхідно розрахувати як параметри самого круга, так і параметри його встановлення: кут нахилу осі круга φ_{gw} , радіальне a_{gw}^r та тангенціальне a_{gw}^t положення його вершини A_{gw} .

Така модифікація дозволяє спроектувати інструмент із заздалегідь заданим оптимальним значенням нормального переднього кута γ_N , що значно підвищує ефективність різання. Цей метод є економічно виправданим для довбачів великого діаметра.

Для інструментів меншого діаметра передні поверхні можна шліфувати за допомогою двоконусного круга або фасонного ріжучого інструмента на рисунку 2.5.

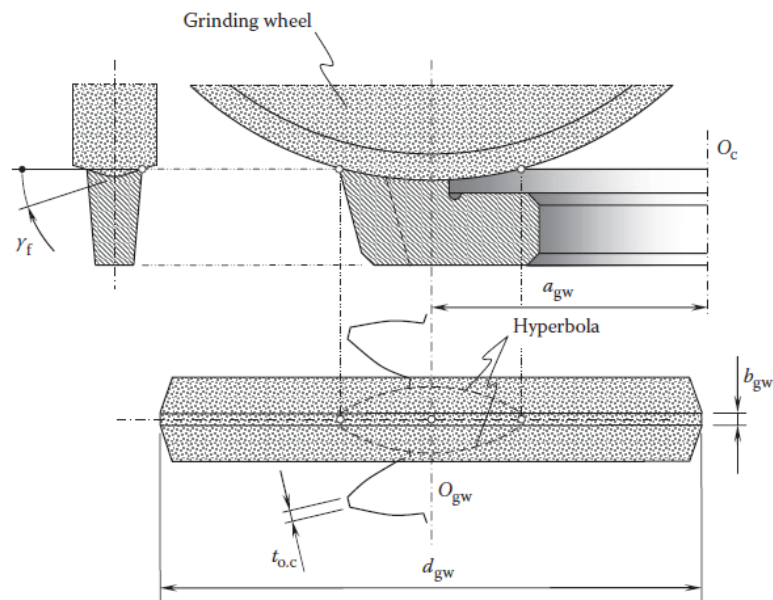


Рисунок 2.5 Модифікація передньої поверхні R_s довбача середнього розміру [16]

У цьому випадку геометрія O_{gw} фасонного круга проектується так, щоб ріжуча кромка відновленого довбача була ідентичною новій. Такі параметри, як діаметр круга d_{gw} , міжосьова відстань a_{gw} та довжина верхньої площадки b_{gw} , розраховуються для досягнення оптимального кута γ_N .

Сферою застосування інструментів з модифікованою передньою поверхнею є нарізання великомодульних прямозубих коліс з великою кількістю зубів. Модифікація стає особливо доцільною, коли стійкість інструмента має гарантувати обробку хоча б одного колеса великого діаметра. Аналогічна проблема неоптимальності стосується і задньої поверхні. У всіх типів довбачів нормальний задній кут α_N є небажано малим. Оптимізувати геометрію задньої поверхні значно складніше, проте такі рішення існують.

Як приклад можна навести конструкцію косозубого довбача, показану на рисунку 2.6.

3 Розрахунок зубонарізного довбача

3.1. Розрахунок параметрів оброблюваного та спряженого з ним зубчастих коліс

Вихідні дані: вид зчеплення коліс за 1643-81 С, ступінь точності оброблюваного колеса 7, нормальний модуль зачеплення $m = 3$ мм, кут профілю вихідного контуру зубчастої рейки $\alpha = 20^\circ$, коефіцієнт зміщення оброблюваного колеса $x_1 = 0$, коефіцієнт зміщення спряженого колеса $x_2 = 0$, кількість зубів оброблюваного колеса $z_1 = 32$, кількість зубів спряженого колеса $z_2 = 96$, коефіцієнт висоти головки зубів $h_a^* = 1$, коефіцієнт граничної висоти зубів $h_1^* = 2$, коефіцієнт радіального зазору $C^* = 0,25$

3.1.1. Діаметри ділительних кіл за формулою (3.1):

$$d = m \cdot z \quad (3.1)$$

$$d_1 = m \cdot z_1 = 3 \cdot 32 = 96 \text{ мм};$$

$$d_2 = m \cdot z_2 = 3 \cdot 96 = 288 \text{ мм}.$$

3.1.2. Кут α_1 профілю зубів на ділительному колі за формулою (3.2) та торцевий модуль m_t прямозубих коліс за формулою (3.3):

$$\alpha_1 = \alpha \quad (3.2)$$

$$\alpha_1 = 20^\circ$$

$$m_t = m \quad (3.3)$$

$$m_t = 3 \text{ мм}$$

3.1.3. Діаметри основних кіл за формулою (3.4):

$$d_b = d \cdot \cos \alpha \quad (3.4)$$

$$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha = 96 \cdot \cos 20^\circ = 90,211 \text{ мм}$$

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha = 288 \cdot \cos 20^\circ = 270,632 \text{ мм}$$

3.1.4. Якщо міжосьова відстань не задана, для некоригованої передачі, визначаються кут зачеплення α_w оброблюваного та спряженого з ним прямозубих коліс за формулою (3.5), а також коефіцієнт зрівнювального зміщення Δy за формулою (3.6):

$$\alpha_w = \alpha \quad (3.5)$$

$$\alpha_w = 20^\circ.$$

$$\Delta y = 0 \quad (3.6)$$

3.1.5. Міжосьова відстань оброблюваного та спряженого з ним коліс за формулою (3.7):

$$A_w = 0,5 \cdot m \cdot (z_1 + z_2) \quad (3.7)$$

$$A_w = 0,5 \cdot 3 \cdot (32 + 96) = 192 \text{ мм}$$

3.1.6. Висота головки зубів коліс за формулою (3.8):

$$h_a = (h_a^* + x - \Delta y) \cdot m \quad (3.8)$$

$$h_{a1} = (h_a^* + x_1 - \Delta y) \cdot m = (1 + 0 - 0) \cdot 3 = 3 \text{ мм}$$

$$h_{a2} = (h_a^* + x_2 - \Delta y) \cdot m = (1 + 0 - 0) \cdot 3 = 3 \text{ мм}$$

3.1.7. Діаметри кіл вершин зубів коліс за формулою (3.9):

$$d_a = d_1 + 2 \cdot h_a \quad (3.9)$$

$$d_{a1} = d_1 + 2 \cdot h_{a1} = 96 + 2 \cdot 3 = 102 \text{ мм}$$

$$d_{a2} = d_2 + 2 \cdot h_{a2} = 288 + 2 \cdot 3 = 294 \text{ мм}$$

3.1.8. Висота ніжки зубів коліс за формулою (3.10):

$$h_f = (h_a^* + C^* - x) \cdot m \quad (3.10)$$

$$h_{f1} = (h_a^* + C^* - x_1) \cdot m = (1 + 0,25 - 0) \cdot 3 = 3,75 \text{ мм}$$

$$h_{f2} = (h_a^* + C^* - x_2) \cdot m = (1 + 0,25 - 0) \cdot 3 = 3,75 \text{ мм}$$

3.1.9. Повна висота зубів коліс за формулою (3.11):

$$h = h_a + h_f \quad (3.11)$$

$$h_1 = h_{a1} + h_{f1} = 3 + 3,75 = 6,75 \text{ мм}$$

$$h_2 = h_{a2} + h_{f2} = 3 + 3,75 = 6,75 \text{ мм}$$

3.1.10. Діаметри кіл западин зубів коліс за формулою (3.12):

$$d_f = d_a - 2 \cdot h \quad (3.12)$$

$$d_{f1} = d_{a1} - 2 \cdot h_1 = 96 - 2 \cdot 6,75 = 88,5 \text{ мм}$$

$$d_{f2} = d_{a2} - 2 \cdot h_2 = 288 - 2 \cdot 6,75 = 280,5 \text{ мм}$$

3.1.11. Товщини зубів оброблюваного та спряженого з ним коліс на ділильних колах за формулою (3.13):

$$S = 0,5 \cdot \pi \cdot m + 2 \cdot x \cdot m \cdot \tan \alpha - E_{cs} \quad (3.13)$$

$$S_1 = 0,5 \cdot \pi \cdot m + 2 \cdot x_1 \cdot m \cdot \tan \alpha - E_{cs1} = 0,5 \cdot \pi \cdot 3 + 0 - 0,07 = 4,64 \text{ мм}$$

$$S_2 = 0,5 \cdot \pi \cdot m + 2 \cdot x_2 \cdot m \cdot \tan \alpha - E_{cs2} = 0,5 \cdot \pi \cdot 3 + 0 - 0,1 = 4,61 \text{ мм}$$

де E_{cs1} і E_{cs2} — найменші відхилення товщин зубів коліс, необхідні для утворення бокового зазору в зубчастому зачепленні. Значення E_{cs1} і E_{cs2} залежать від ступеня точності коліс та виду зчеплення. Для частини зубчастих коліс у Таблиця 3.1 наведено величини E_{cs} за 1643-81 [18].

Таблиця 3.1. Величини E_{cs} за 1643-81

		Діаметр ділильного кола колеса, мм

Вид зчеплення коліс	Ступінь точності коліс	до 80	від. 80 до 125	від. 125 до 180	від. 180 до 250	від. 250 до 315	від. 315 до 400	від. 400 до 500	від. 500 до 630
Д	6	0,035	0,040	0,045	0,055	0,060	0,060	0,070	0,080
	7	0,035	0,045	0,050	0,060	0,070	0,070	0,080	0,090
	8	0,040	0,050	0,060	0,070	0,070	0,080	0,090	0,100
С	6	0,055	0,060	0,070	0,080	0,090	0,100	0,110	0,120
	7	0,060	0,070	0,080	0,090	0,100	0,120	0,140	0,140
	8	0,070	0,080	0,090	0,100	0,120	0,140	0,140	0,160
В	6	0,090	0,100	0,120	0,140	0,160	0,160	0,180	0,200
	7	0,100	0,120	0,140	0,140	0,180	0,180	0,200	0,220
	8	0,100	0,120	0,140	0,160	0,180	0,200	0,220	0,250

3.1.12. Найбільший радіус кривизни профілю зубів оброблюваного колеса на вершині зубів за формулою (3.14):

$$\rho_{a1} = 0,5 \cdot \sqrt{d_{a1}^2 - d_{b1}^2} \quad (3.14)$$

$$\rho_{a1} = 0,5 \cdot \sqrt{102^2 - 90,211^2} = 9,521 \text{ мм.}$$

3.1.13. Радіус кривизни в точці початку робочої частини профілю зубів оброблюваного колеса за формулою (3.15):

$$\rho_{p1} = A_w \cdot \sin \alpha_w - 0,5 \cdot \sqrt{d_{a2}^2 - d_{b2}^2} \quad (3.15)$$

$$\rho_{p1} = 192 \cdot \sin 20^\circ - 0,5 \cdot \sqrt{294^2 - 270,632^2} = 8,235 \text{ мм.}$$

3.2. Визначення кількості зубів довбача, його ділильного та основного кіл

3.2.1. За Таблиця 3.2 визначаємо: тип довбача - дисковий прямозубий, при $m = 3 \text{ мм}$, $d'_0 = 100 \text{ мм}$, $B=20 \text{ мм}$, $B_{zn}=8 \text{ мм}$, $B_p=12 \text{ мм}$.

Орієнтовне значення кількості зубів довбача за формулою (3.16):

$$z'_0 = \frac{d'_0}{m} \quad (3.16)$$

де d'_0 — номінальний діаметр ділильного кола довбача, що вибирається за

Таблиця 3.2

$$z'_0 = \frac{100}{3} = 33,333$$

Таблиця 3.2 Номінальні діаметри d'_0 ділильного кола довбача

Тип довбача	Модуль m , мм	Діаметр d'_0 , мм	Висота довбача, мм		
			нового B	зношеного B_{zn}	робочої частини B_p
Дисковий прямозубий	1–1,5	80	12	4	8
	1,75–2,5	80	15	5	10
	2,75–5	80	17	7	10
	1–1,75	100	17	9–6	8–11
	2–5	100	20	8–7	12–13
	5,5–8	100	22	8–7	14–15
	2–3,5	125	22	7	15
	3,75–4	125	24	8	16
	5–10	125	28	9	19
	6–7	150	30	9,5	20,5
	8–10	160	32	12	20
	8–12	200	40	13,5	26,5

3.2.2. Розрахункове значення кількості зубів довбача z'_0 округлюється до цілого значення z_0 .

$$z_0 = 34$$

3.2.3. Діаметр ділильного кола довбача з прийнятою кількістю зубів z_0 за формулою (3.17):

$$d_0 = z_0 \cdot m \quad (3.17)$$

$$d_0 = 34 \cdot 3 = 102 \text{ мм}$$

3.2.4. Діаметр основного кола довбача за формулою (3.18):

$$d_{b0} = d_0 \cdot \cos \alpha \quad (3.18)$$

$$d_{b0} = 102 \cdot \cos 20^\circ = 95,849 \text{ мм}$$

3.2.5. Діаметр D_k основного кола копіру має бути точно або приблизно рівний діаметру d_0 , тобто за формулою (3.19):

$$D_k \approx d_0 \quad (3.19)$$

Окрім того, діаметр D_k має дорівнювати одному з наступних значень (у мм): 8; 12; 15; 25,4; 26; 38,1; 50,8; 55; 62; 63,5; 72; 75; 76,2; 77; 88,9; 99; 100; 101,6; 103; 125; 142; 150; 162; 164; 171; 178; 180; 197; 198; 202; 225.

$$D_k \approx d_0 = 101,6 \text{ мм.}$$

3.2.6. Кут встановлення напрямних зубошліфувального верстата за формулою (3.20):

$$\alpha_{уст} = \arccos\left(\frac{d_{b0}}{D_k}\right) \quad (3.20)$$

$$\alpha_{уст} = \arccos\left(\frac{95,849}{101,6}\right) = 19,37^\circ.$$

3.2.7. Для рівномірного зношування шліфувального круга необхідно дотримуватися умови (3.21):

$$(\alpha + 1^\circ) \geq \alpha_{уст} > (\alpha - 6^\circ) \quad (3.21)$$

$$(21^\circ) \geq 19,37^\circ > (14^\circ).$$

Умова виконана.

3.3. Розрахунок параметрів довбача у вихідному перерізі

3.3.1. Діаметр кола вершин зубів довбача у вихідному перерізі за формулою (3.22):

$$d'_{a0} = d_1 + d_0 - d_{f1} \quad (3.22)$$

$$d'_{a0} = 96 + 102 - 88,5 = 109,5 \text{ мм}$$

3.3.2. Товщина зубів довбача на ділительному колі у вихідному перерізі за формулою (3.23):

$$S'_0 = \pi \cdot m - S_1 \quad (3.23)$$

$$S'_0 = \pi \cdot 3 - 4,64 = 4,78 \text{ мм}$$

3.3.3. Профільний кут на колі вершин зубів довбача у вихідному перерізі за формулою (3.24):

$$\alpha'_{a0} = \arccos\left(\frac{d_{b0}}{d'_{a0}}\right) \quad (3.24)$$

$$\alpha'_{a0} = \arccos\left(\frac{95,849}{109,5}\right) = 28,92^\circ$$

3.3.4. Товщина зубів довбача на колі вершин зубів у вихідному перерізі за формулою (3.25):

$$S'_{a0} = d'_{a0} \cdot \left(\frac{S'_0}{d_0} + \operatorname{inv}\alpha - \operatorname{inv}\alpha'_{a0} \right) \quad (3.25)$$

$$S'_{a0} = 97,5 \cdot \left(\frac{4,78}{102} + 0,0149 - 0,047736 \right) = 1,536 \text{ мм.}$$

3.4. Розрахунок коефіцієнтів зміщення та вихідних відстаней довбача

Для нового довбача

3.4.1. Мінімально допустима товщина зубів нового довбача на колі вершин зубів за формулою (3.26):

$$S_{a0\min} = \sqrt{0,2595 \cdot m - 0,0375} \quad (3.26)$$

$$S_{a0\min} = \sqrt{0,2595 \cdot 3 - 0,0375} = 0,861 \text{ мм.}$$

3.4.2. Передній γ_B та задній α_B кути довбача на вершині зубів доцільно прийняти відповідно до 9323-79 [19]: $\gamma_B = 5^\circ$, $\alpha_B = 6^\circ$.

3.4.3. Перевірка достатності заднього кута α_n на бокових сторонах зубів довбача в головній січній площині за формулою за формулою (3.27):

$$\alpha_n = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}\alpha_B \cdot \sin \alpha) \quad (3.27)$$

$$\alpha_n = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}6^\circ \cdot \sin 20^\circ) = 2,058^\circ.$$

3.4.4. Необхідно, щоб $\alpha_n \geq 2^\circ 30'$. Якщо ця умова не виконується, тоді приймають $\alpha_n = 2^\circ 30'$ і за формулою (3.28) визначаємо необхідне значення кута α_v .

$$\alpha_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg}\alpha_n}{\sin \alpha} \right) \quad (3.28)$$

$$\alpha_B = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{tg}2,50^\circ}{\sin 20^\circ} \right) = 7,2748^\circ \approx 7^\circ 16'.$$

3.4.5. Діаметр кола вершин зубів нового довбача за формулою (3.29):

$$d_{a0} = d'_{a0} + 2 \cdot x_0 \cdot m \quad (3.29)$$

де x_0 — коефіцієнт зміщення вихідного контуру зубчастої рейки, що відповідає мінімально допустимій товщині зубів нового довбача на колі вершин зубів.

$$d_{a0} = 109,5 + 2 \cdot 0,611 \cdot 3 = 113,166 \text{ мм};$$

3.4.6. Профільний кут на колі вершин зубів нового довбача, що відповідає коефіцієнту x_0 за формулою (3.30):

$$\alpha_{a0} = \arccos\left(\frac{d_{b0}}{d_{a0}}\right) \quad (3.30)$$

$$\alpha_{a0} = \arccos\left(\frac{95,849}{113,166}\right) = 32,12^\circ$$

3.4.7. Товщина зубів нового довбача на колі вершин зубів у перерізі, що відповідає коефіцієнту x_0 за формулою (3.31):

$$S_{a0} = d_{a0} \cdot \left[\frac{S'_0 + 2 \cdot x_0 \cdot m \cdot \operatorname{tg}\alpha}{d_0} + \operatorname{inv}\alpha - \operatorname{inv}\alpha_{a0} \right] \quad (3.31)$$

$$S_{a0} = 113,166 \cdot \left[\frac{4,78 + 2 \cdot 0,611 \cdot 3 \cdot \operatorname{tg}20^\circ}{102} + \operatorname{inv}20^\circ - \operatorname{inv}32,12^\circ \right] = 0,867 \text{ мм};$$

3.4.8. Прирівнявши $S_{a0} = S_{a0\min}$, можна визначити значення коефіцієнта x_0 з рівняння:

$$S_{a0\min} = d_{a0} \cdot \left[\frac{S'_0 + 2 \cdot x_0 \cdot m \cdot \operatorname{tg}\alpha}{d_0} + \operatorname{inv}\alpha - \operatorname{inv}\alpha_{a0} \right] \quad (3.32)$$

$$S_{a0min} = 113,166 \cdot \left[\frac{4,78 + 2 \cdot 0,611 \cdot 3 \cdot \operatorname{tg}20^\circ}{102} + \operatorname{inv}20^\circ - \operatorname{inv}32,12^\circ \right] =$$

$$= 0,867 \text{ мм.}$$

3.4.9. Зміна коефіцієнта x_0 задається в межах ± 2 . Підставивши поточне значення коефіцієнта x_0 у формули (3.29 – 3.32) і порівнюючи значення S_{a0} зі значенням S_{a0min} , обчисленим за відповідною формулою (3.26), можна визначити шукане значення коефіцієнта x_0 при точності розв'язання, що визначається нерівністю:

$$|S_{a0} - S_{a0min}| \leq 0,010 \text{ мм} \quad (3.33)$$

$$|0,867 - 0,861| = 0,006 \text{ мм.}$$

Умова виконується

3.4.10. Додатна вихідна відстань, обмежена загостренням зубів нового довбача за формулою (3.34):

$$a_H^I = \frac{x_0 \cdot m}{\operatorname{tg}\alpha_B} \quad (3.34)$$

$$a_H^I = \frac{0,611 \cdot 3}{\operatorname{tg}7,2748^\circ} = 14,359 \text{ мм.}$$

3.4.11. Верстатний кут зачеплення нового довбача, що забезпечує повну обробку робочої частини профілю зубів оброблюваного колеса за формулою (3.35):

$$\alpha_{WH}^{II} = \arccos \left[\frac{2 \cdot (d_{b1} + d_{b0}) \cdot (d_{f1} - 2 \cdot \rho_{p1} \cdot \sin \alpha)}{(d_{b1} + d_{b0})^2 + d_{f1}^2 - d_{b0}^2 - 4 \cdot \rho_{p1}^2} \right] \quad (3.35)$$

$$\alpha_{WH}^{II} = \arccos \left[\frac{2 \cdot (90,211 + 95,849) \cdot (88,5 - 2 \cdot 8,235 \cdot \sin 20^\circ)}{(90,211 + 95,849)^2 + 88,5^2 - 95,849^2 - 4 \cdot 8,235^2} \right] = 20,83^\circ.$$

3.4.12. Додатна вихідна відстань, що забезпечує повну обробку робочої частини профілю зубів оброблюваного колеса за формулою (3.36):

$$a_H^{\text{II}} = \left[\frac{(\text{inv}\alpha_{\text{WH}}^{\text{II}} - \text{inv}\alpha) \cdot (d_1 + d_0) - 2 \cdot x_1 \cdot \text{tg}\alpha \cdot m}{C} \right] \quad (3.36)$$

де C — допоміжна величина, що визначається за формулою (3.37).

$$C = 2 \cdot \text{tg}\alpha_B \cdot \text{tg}\alpha_u = 2 \cdot \text{tg}\alpha_{r0} \quad (3.37)$$

де α_u — кут профілю зубів довбача на ділильному колі, який визначається по формулі (3.38)

$$\alpha_u = \text{arctg}\left(\frac{\text{tg}\alpha}{1 - \text{tg}\gamma_B \cdot \text{tg}\alpha_B}\right) \quad (3.38)$$

Розрахуємо кут профілю зубів довбача:

$$\alpha_u = \text{arctg}\left(\frac{\text{tg}20^\circ}{1 - \text{tg}5^\circ \cdot \text{tg}7,2748^\circ}\right) = 20,2077^\circ;$$

α_{r0} — задній кут у перерізі зубів довбача площиною ділильного циліндра, який визначається по формулі (3.39)

$$\alpha_{r0} = \text{arctg}(\text{tg}\alpha_B \cdot \text{tg}\alpha_u) \quad (3.39)$$

Розрахуємо задній кут у перерізі довбача:

$$\alpha_{r0} = \text{arctg}(\text{tg}7,2748^\circ \cdot \text{tg}20,2077^\circ) = 2,6902^\circ \approx 2^\circ 41'.$$

Розрахуємо допоміжну величину:

$$C = 2 \cdot \text{tg}\alpha_{r0} = 2 \cdot \text{tg}2,6902^\circ = 0,09397.$$

Розрахуємо додатну вихідну відстань:

$$a_{\text{H}}^{\text{II}} = \left[\frac{(\text{inv}20,83^\circ - \text{inv}20^\circ) \cdot (96 + 102) - 2 \cdot 0 \cdot \text{tg}20^\circ \cdot 3}{0,09397} \right] = 4,231 \text{ мм.}$$

Із двох розрахованих значень додатних вихідних відстаней a_{H}^{I} та a_{H}^{II} для проєктованого довбача приймається менше з них, яке позначається як a_{H} . Для проєктуємого довбача $a_{\text{H}} = 4,231 \text{ мм}$.

Для гранично переточеного довбача

3.4.14. Верстатний кут зачеплення гранично переточеного довбача, що гарантує відсутність зрізання або неповної обробки профілю зубів колеса у зоні їх вершин за формулою (3.40):

$$\alpha_{\text{wc}}^{\text{I}} = \text{arctg} \left[\frac{2 \cdot (\rho_{a1} + \rho_{p10})}{d_{b1} + d_{b0}} \right] \quad (3.40)$$

$$\alpha_{\text{wc}}^{\text{I}} = \text{arctg} \left[\frac{2 \cdot (9,521 + 5)}{90,211 + 95,849} \right] = 8,87^\circ.$$

де ρ_{10} — мінімально допустимий радіус кривизни профілю зубів довбача, значення якого приймається залежно від номінального діаметра d_0' ділильного кола довбача: при $d_0' = 100 \div 200 \text{ мм}$ — $\rho_{10} = 5 \text{ мм}$.

Якщо $d_{f1} < d_{b1}$, тоді розраховується верстатний кут зачеплення гранично переточеного довбача, що визначає початок підрізання ніжки зубів колеса, за формулою (3.41):

$$\alpha_{\text{wc}}^{\text{II}} = \arccos \left[\frac{2 \cdot d_{f1} \cdot (d_{b1} + d_{b0})}{(d_{b1} + d_{b0})^2 + d_{f1}^2 - d_{b0}^2} \right] \quad (3.41)$$

$$\alpha_{\text{wc}}^{\text{II}} = \arccos \left[\frac{2 \cdot 67,5 \cdot (70,477 + 84,572)}{(70,477 + 84,572)^2 + 67,5^2 - 84,572^2} \right] = 12,5504^\circ.$$

У цьому випадку верстатний кут зачеплення гранично переточеного довбача α_{wc} приймається рівним найбільшому з кутів α_{wc}^I та α_{wc}^{II} .

Приймаємо $\alpha_{wc} = 12,5504^\circ$ як найбільший із кутів α_{wc}^I та α_{wc}^{II}

3.4.15. Від'ємна вихідна відстань, що відповідає гранично переточеному довбачу за формулою (3.41):

$$a_c = \left[\frac{(\operatorname{inv}\alpha_{wc} - \operatorname{inv}\alpha) \cdot (d_1 + d_0) - 2 \cdot x_1 \cdot \operatorname{tg}\alpha_B \cdot m}{C} \right] \quad (3.42)$$

$$a_c = \left[\frac{(\operatorname{inv}12,5504^\circ - \operatorname{inv}20^\circ) \cdot (96 + 102) - 2 \cdot 0 \cdot \operatorname{tg}7,2748^\circ \cdot 3}{0,09397} \right] =$$

$$= -28,772 \text{ мм.}$$

Остаточне визначення додатнього A та від'ємного A_1 вихідних відстаней

3.4.16. Максимально можлива величина сточування нового довбача за формулою (3.43):

$$H = a_H - a_c \quad (3.43)$$

$$H = 4,231 - (-28,772) = 33,003 \text{ мм.}$$

3.4.17. Остаточне визначення додатнього A та від'ємного A_1 вихідних відстаней, висоти робочої частини довбача B'_p та нової висоти довбача B' :

$$a_H < 0,5 \cdot B_p \quad (3.43)$$

$$4,231 < 0,5 \cdot 12$$

$$A = a_H = 4,231 \text{ мм}$$

$$A_1 = -(B_p - A) \quad (3.44)$$

$$A_1 = -(12 - 4,231) = -7,769$$

$$B'_p = B_p = 12$$

$$B' = B = 20 \text{ мм}$$

3.5. Розрахунок і визначення додаткових розмірів довбача

3.5.1. Інволюта верстатного кута зачеплення α_{wA} колеса розраховується за формулою (3.45) та нового довбача з прийнятою додатною вихідною відстанню A :

$$\operatorname{inv}\alpha_{wA} = \operatorname{inv}\alpha + \left(\frac{2 \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot (x_1 + x_{0A})}{z_1 + z_0} \right) \quad (3.45)$$

де x_{0A} — коефіцієнт зміщення у новому перерізі довбача з прийнятою додатною вихідною відстанню A розраховується за формулою (3.46):

$$x_{0A} = \frac{A \cdot \operatorname{tg}\alpha_B}{m} \quad (3.46)$$

$$x_{0A} = \frac{4,231 \cdot \operatorname{tg}7,2748^\circ}{3} = 0,18$$

Розраховуємо інволюту верстатного кута зачеплення α_{wA} :

$$\operatorname{inv}\alpha_{wA} = \operatorname{inv}20^\circ + \left(\frac{2 \cdot \operatorname{tg}20^\circ \cdot (0 + 0,18)}{32 + 34} \right) = 0,016889 = 20,821069^\circ$$

3.5.2. Інволюта верстатного кута зачеплення α_{wA1} колеса та гранично переточеного довбача з прийнятою від'ємною вихідною відстанню A_1 розраховується за формулою (3.47):

$$\operatorname{inv}\alpha_{wA1} = \operatorname{inv}\alpha + \left(\frac{2 \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot (x_1 + x_{0A1})}{z_1 + z_0} \right) \quad (3.47)$$

де x_{0A1} — коефіцієнт зміщення в перерізі гранично переточеного довбача з прийнятою від'ємною вихідною відстанню A_1 розраховується за формулою (3.48):

$$x_{0A1} = \frac{A_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha_B}{m} \quad (3.48)$$

$$x_{0A1} = \frac{-7,769 \cdot \operatorname{tg} 7,2748^\circ}{3} = -0,331.$$

Розрахуємо інволюту верстатного кута зачеплення α_{wA1} :

$$\operatorname{inv} \alpha_{wA1} = \operatorname{inv} 20^\circ + \left(\frac{2 \cdot \operatorname{tg} 20^\circ \cdot (0 - 0,331)}{32 + 34} \right) = 0,0112533 = 18,263343^\circ$$

3.5.3. Товщина зубів нового довбача по дузі ділильного кола розраховується за формулою (3.49):

$$S_0 = S'_0 + A \cdot C \quad (3.49)$$

$$S_0 = 4,78 + 4,231 \cdot 0,09397 = 5,178 \text{ мм.}$$

3.5.4. Діаметр зовнішнього кола нового довбача за формулою (3.50):

$$d_{a0A} = \frac{d_{b1} + d_{b0}}{\cos \alpha_{wA}} - d_{f1} \quad (3.50)$$

$$d_{a0A} = \frac{90,211 + 95,849}{\cos 20,821069^\circ} - 88,5 = 110,560 \text{ мм.}$$

3.5.5. Товщина зубів нового довбача по дузі зовнішнього кола за формулою (3.51):

$$S_{a0A} = d_{a0A} \cdot \left(\frac{S_0}{d_0} + \operatorname{inv} \alpha - \operatorname{inv} \alpha_{a0A} \right) \quad (3.51)$$

де α_{a0A} — кут профілю зубів нового довбача на зовнішньому колі за формулою (3.52):

$$\alpha_{a0A} = \arccos\left(\frac{d_{b0}}{d_{a0A}}\right) \quad (3.52)$$

$$\alpha_{a0A} = \arccos\left(\frac{d_{b0}}{d_{a0A}}\right) = \arccos\left(\frac{95,849}{110,560}\right) = 29,89^\circ.$$

Розрахуємо товщину зубів нового довбача:

$$S_{a0A} = 110,560 \cdot \left(\frac{5,178}{102} + \text{inv}20^\circ - \text{inv}29,89^\circ\right) = 1,388 \text{ мм.}$$

3.5.6. Висота головки зубів нового довбача за формулою (3.53):

$$h_{a0} = \frac{(d_{a0A} - d_0)}{2} \quad (3.53)$$

$$h_{a0} = \frac{(110,560 - 102)}{2} = 4,28 \text{ мм.}$$

3.5.7. Товщина зубів нового довбача по хорді на ділільному колі за формулою (3.54):

$$S_x = d_0 \cdot \sin\left[\left(\frac{S_0}{d_0}\right), \text{рад}\right] \quad (3.54)$$

$$S_x = 102 \cdot \sin\left[\left(\frac{5,178}{102}\right), \text{рад}\right] = 5,176$$

3.5.8. Відстань від кола вершин зубів до їх хорд на ділільному колі нового довбача за формулою (3.55):

$$h_x = h_{a0} + \frac{d_0}{2} \left[1 - \cos\left(\left(\frac{S_0}{d_0}\right), \text{рад}\right)\right] \quad (3.55)$$

$$h_x = 4,28 + \frac{102}{2} \left[1 - \cos \left(\frac{5,178}{102} \right) \right] = 4,357 \text{ мм.}$$

3.5.9. Повна висота зубів довбача в будь-якому перерізі за формулою (3.56):

$$h_0 = h_1 + 0,3 \cdot m \quad (3.56)$$

$$h_0 = 6,75 + 0,3 \cdot 3 = 7,65 \text{ мм.}$$

3.5.10. Діаметр основного кола довбача під час шліфування профілю його зубів за формулою (3.57):

$$d_{b0} = d_0 \cdot \cos \alpha_u \quad (3.57)$$

$$d_{b0} = 102 \cdot \cos 20,2077^\circ = 95,722 \text{ мм.}$$

3.5.11. Кут профілю α_{10} у граничній точці профілю зубів нового довбача розраховується за формулою (3.58) та радіус кривизни ρ_{p0} профілю в цій точці за формулою (3.59):

$$\alpha_{10} = \arctg \left[\operatorname{tg} \alpha - \frac{4 \cdot (h_1^* - h_a^* - x_{0A})}{z_0 \cdot \sin(2 \cdot \alpha)} \right] \quad (3.58)$$

$$\alpha_{10} = \arctg \left[\operatorname{tg} 20^\circ - \frac{4 \cdot (2 - 1 - 0,18)}{34 \cdot \sin(2 \cdot 20^\circ)} \right] = 12,07^\circ.$$

$$\rho_{p0} = 0,5 \cdot d_0 \cdot \sin \alpha - \frac{(h_1^* - h_a^* - x_{0A})}{\sin(2 \cdot \alpha)} \cdot m \quad (3.59)$$

$$\rho_{p0} = 0,5 \cdot 102 \cdot \sin 20^\circ - \frac{2 - 1 - 0,18}{\sin(2 \cdot 20^\circ)} \cdot 3 = 13,616 \text{ мм.}$$

3.5.12. Кути розгортки евольвенти в граничній точці профілю v_{10} за формулою (3.60), та на вершині $v_{\alpha 0}$ зубів нового довбача за формулою (3.61):

$$d'_0 = 100 \text{ мм}, m = 3 \text{ мм}, d_{\text{отв}} = 44,45 \text{ мм}, b_1 = 10 \text{ мм}, D = 70 \text{ мм}, b_2 = 11 \text{ мм}, \\ D_2 = 75 \text{ мм}.$$

3.6 Визначення додаткових даних для робочого креслення довбача

Довбач виготовляється із швидкорізальної сталі Р6М5К5 згідно з 19265-73. Для 7-ї ступені точності оброблюваного колеса клас точності довбача — А.

У технічних вимогах зазначається:

1. Твердість: 63...65 HRC.
2. На всіх поверхнях довбача не допускаються: тріщини, вибоїни, викришені ділянки, задирки та сліди корозії.
3. Похибка профілю зуба: $\leq 0,005$ мм.
4. Різниця сусідніх окружних кроків зубів: $\leq 0,006$ мм.
5. Накопичена похибка окружного кроку зубів: $\leq 0,018$ мм.
6. Конусність і овальність отвору $\varnothing 44,45+0,008$ мм — не більше 0,004 мм. Не допускається завалювання країв отвору $\varnothing 44,45+0,008$ мм за межі 2 мм.
7. Загальні допуски згідно з 30893.2–2002 – mK.
8. Маркування: $m = 3$, $z_0 = 34$, кл. А, Р6М6К5.

4 Етапи створення 3Д моделі в SolidWorks 2023

1. За допомогою команди «Видавити» створюємо основне тіло довбача
рисунок 4.1

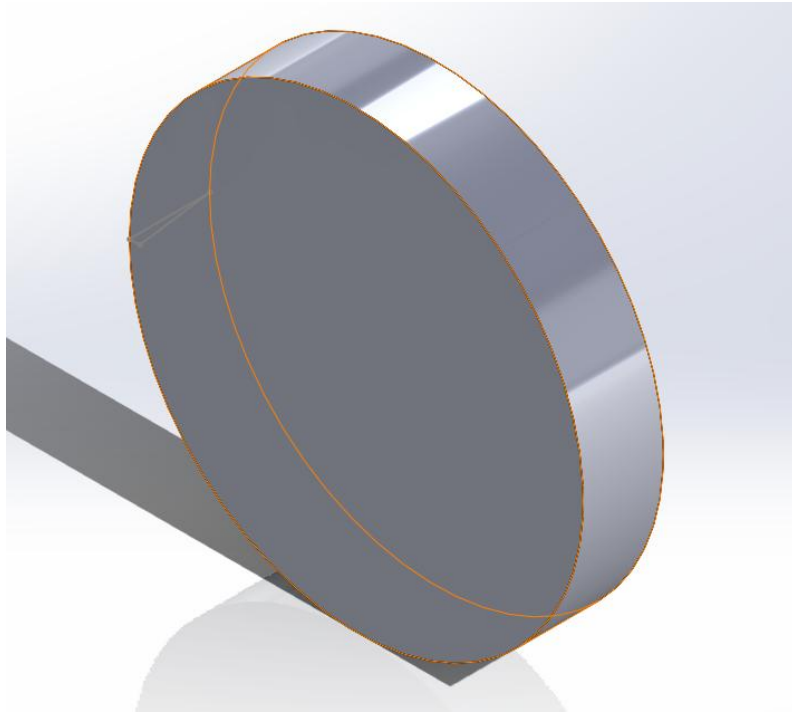


Рисунок 4.1 Основне тіло довбача

2. За допомогою команди «Вирізати обертанням» вирізаємо кут α_B
рисунок 4.2

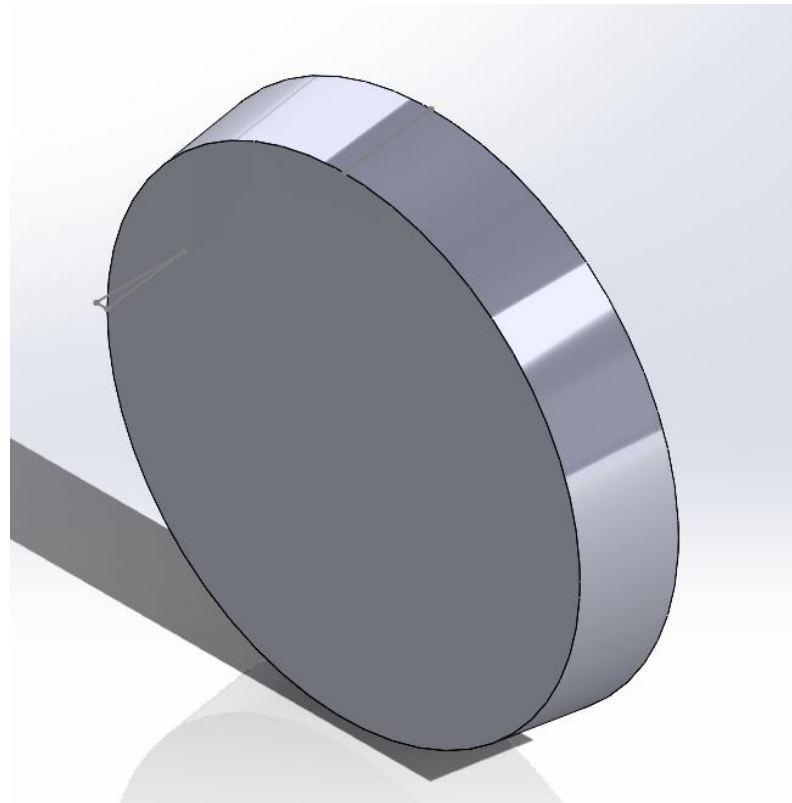


Рисунок 4.2 Тіло з кутом нахилу α_B

3. За допомогою команди «Додаткова площина» створюємо площину під кутом рисунок 4.3

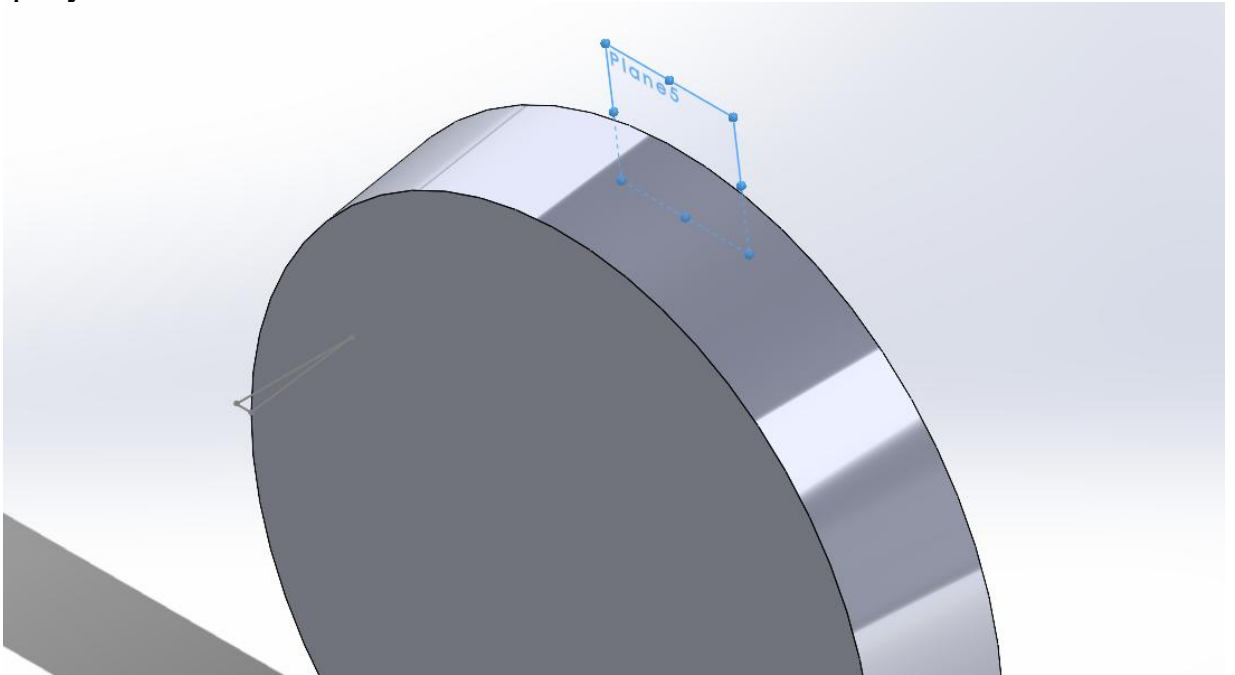


Рисунок 4.3 Додаткова площина під кутом

4. В новій площині створюємо ескіз частини профілю зуба рисунок 4.4.

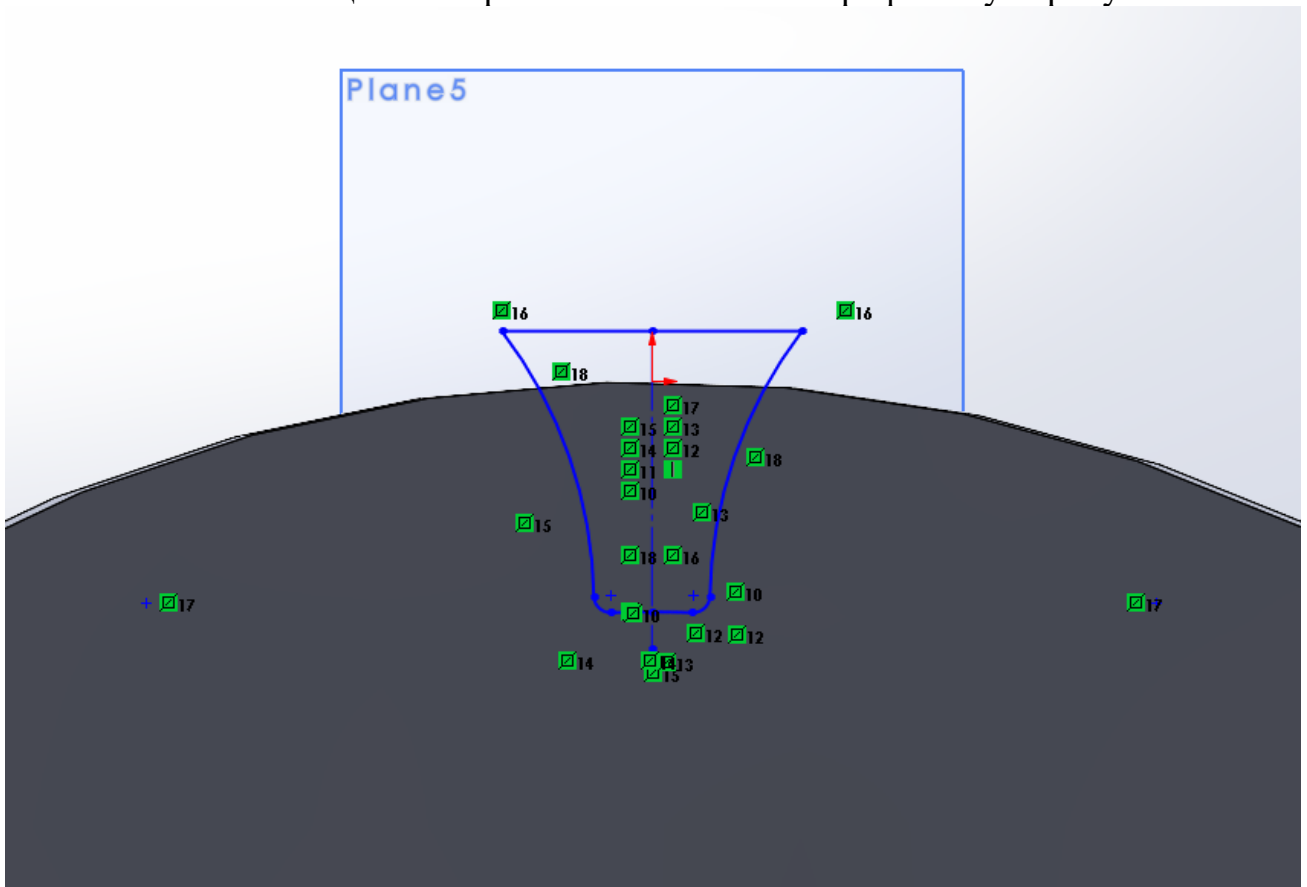


Рисунок 4.4 Ескіз частини профілю зуба

5. За допомогою команди «Вирізати по траєкторії» створюємо частину профілю зуба рисунок 4.5.

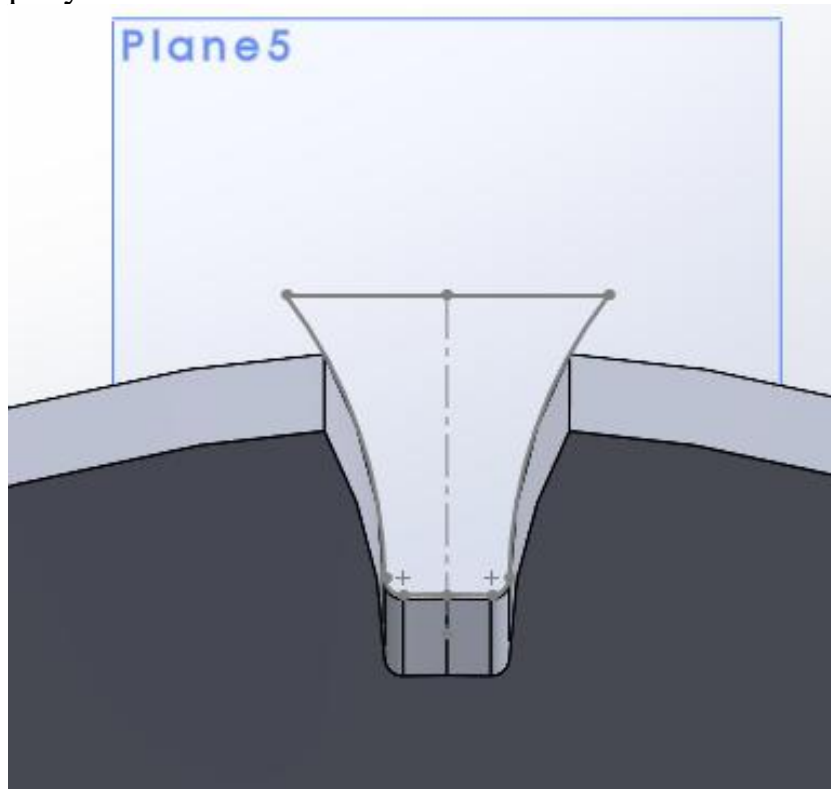


Рисунок 4.5 Частина профілю зуба

6. За допомогою команди «Круговий масив» створюємо необхідну кількість зубів рисунок 4.6.

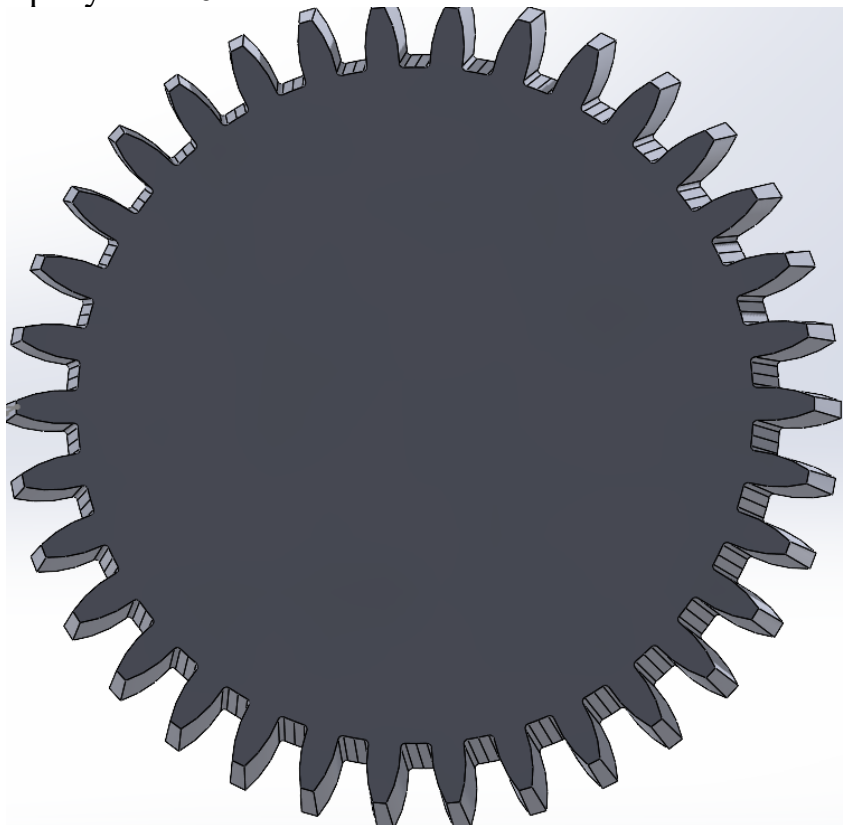


Рисунок 4.6 Тіло інструмента з необхідною кількістю зубів

7. За допомогою команди «Вирізати обертанням» вирізаємо кут γ_B та фаску рисунок 4.7

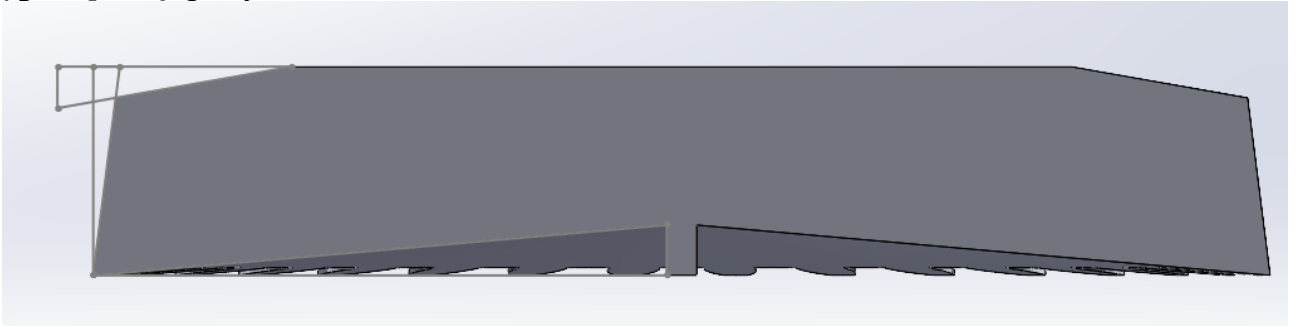


Рисунок 4.7 Деталь з вирізаними кутами γ_B та фаскою

8. За допомогою команди «Вирізати обертанням» створюємо внутрішній отвір, опорний торець та розточку отвору рисунок 4.8

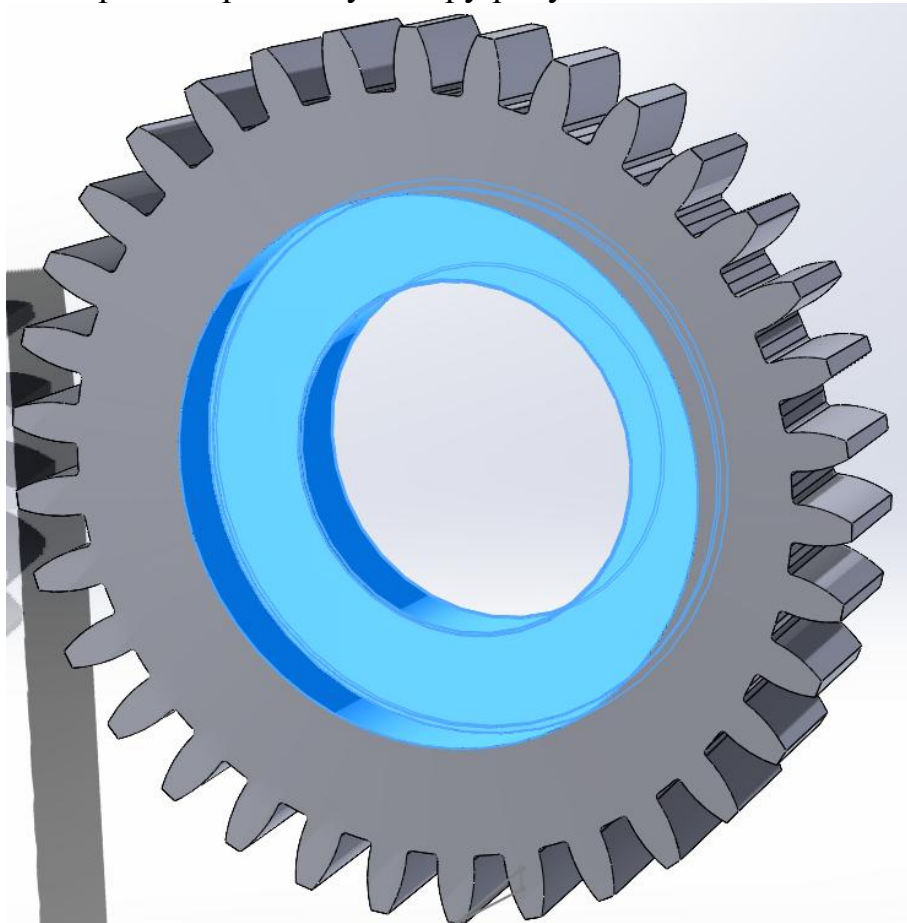


Рисунок 4.8 Готовий інструмент

Висновки

У кваліфікаційній бакалаврській роботі було проведено комплексне дослідження особливостей інструменту для зубообробки, зокрема зубонарізного довбача, з акцентом на його конструктивні, технологічні та експлуатаційні параметри.

1. Проаналізовано загальні відомості про процес зубонарізання, його призначення, переваги та застосування в сучасному машинобудуванні, що дозволило глибше зрозуміти роль зубонарізного довбача в точному формоутворенні зубчастих коліс.

2. Розглянуто кінематичні особливості процесу зубонарізання методом довбання, включаючи взаємодію інструменту з заготовкою, режими різання та принцип генерації профілю зуба, що є критичним для забезпечення точності передач.

3. Досліджено матеріали, які використовуються для виготовлення зубонарізних довбачів. Особливу увагу приділено швидкорізальним сталям та порошковим матеріалам, з урахуванням їх механічних властивостей, зносостійкості та оброблюваності.

4. Проаналізовано сучасні типи твердих покриттів (TiN, TiAlN, AlCrN тощо), що наносяться на зубонарізні довбачі з метою підвищення їх довговічності, теплостійкості та ефективності обробки, а також визначено вплив покриттів на знос і ресурс інструменту.

5. Наведено систематизований опис геометричних параметрів зубонарізного довбача, зокрема форми зуба, задніх і передніх кутів, профілю ріжучої частини, що дає змогу забезпечити ефективне різання та стабільність процесу.

6. Розглянуто сучасні підходи до покращення геометрії зубонарізних довбачів, зокрема оптимізацію мікрогеометрії, застосування покриттів з пониженим коефіцієнтом тертя, а також методи підвищення точності профілю та чистоти обробки.

7. В результаті проведених розрахунків розроблено та сконструйовано дисковий зубонарізний довбач із заданими параметрами, що відповідають

вимогам до точності, продуктивності та зносостійкості інструменту для обробки зубчастих передач.

8. Створено тривимірну (3D) модель дискового зубонарізного довбача із застосуванням сучасного CAD-програмного забезпечення, що дозволило візуалізувати конструкцію інструменту, перевірити правильність обраних параметрів і підготувати креслення для подальшого виготовлення.

Отримані теоретичні та практичні результати можуть бути використані в подальших дослідженнях з удосконалення конструкцій зубообробного інструменту, а також впроваджені у виробничу практику при проектуванні та експлуатації зубонарізних довбачів.

Перелік використаних джерел

1. Gear Shaper Cutters Analysis Report 2025: Market to Grow by a CAGR of XX to 2033, Driven by Government Incentives, Popularity of Virtual Assistants, and Strategic Partnerships. : веб-сайт. URL: <https://www.archivemarketresearch.com/reports/gear-shaper-cutters-438570#summary>
2. Gear Shaping vs. Gear Hobbing. : веб-сайт. URL: <https://illinoispulleyandgear.com/blogs/blog/gear-shaping-vs-gear-hobbing#:~:text=As%20described%20above%2C%20gear%20shaping,more%20accurate%20than%20gear%20hobbing>
3. Gupta K., Jain N. K., Laubscher R. Advanced Gear Manufacturing and Finishing: Classical and Modern Processes : навч. посіб. для ВНЗ. Amsterdam : Academic Press (Elsevier), 2017. 240 с.
4. Katz A. Cutting Mechanics of the Gear Shaping Process : дис. Master of Applied Science : University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada, 2017. 137 с.
5. GEARS MACHINING : веб-сайт. URL: <https://www.slideserve.com/chaim/gears-machining>
6. Disk Type Gear Shaper Cutter : веб-сайт. URL: <https://www.jiangxinggongju.com/en/Shaper-Cutters/23.html#:~:text=Disk%20Type%20Gear%20Shaper%20Cutter,240mm%20Material%3AHSS%20M2%2CM35%2CM42%2CASP2030%2CASP2052%2CS390%20Coating%3A%20TiN%2CAP>
7. Disc Type Gear Shaper Cutter : веб-сайт. URL: <https://www.yashtools.com/disc-type-gear-shaper-cutter.php#:~:text=>
8. Bowl Type Gear Shaper Cutter : веб-сайт. URL: <https://www.jiangxinggongju.com/en/Shaper-Cutters/24.html#:~:text=Module%3A%20m0.8,240mm%20Material%3AHSS%20M2%2CM35%2CM42%2CASP2030%2CASP2052%2CS390%20Coating%3A%20TiN%2CAP>

9. Shank type shaper cutter : веб-сайт. URL: <https://franchigaetano.it/en/gear-cutting-tools/shaping-cutters/shank-type-shaper-cutter/>
10. Halnn: Revolutionizing Gear Manufacturing with Indexable Gear Shaper Cutters : веб-сайт. URL: <https://www.halnn-group.com/news/1817.html>
11. Shaping Tools : веб-сайт. URL: <https://www.gleason.com/en/products/tools/cylindrical/shaping/shaping-tools>
12. Choosing the Right Tool Cutting-Face Material: HSS, Carbide, PCD, CBN, Ceramics & Cermets : веб-сайт. URL: <https://www.alliedtooling.com/articles/tool-cutting-face-materials#:~:text=,austenitizing%2C%20quenching%2C%20and%20tempering%20processes>
13. PM M4 High Speed Steel : веб-сайт. URL: <https://www.griggssteel.com/high-speed-steel/pm-m4-steel/#:~:text=PM%20M4%20High%20Speed%20Steel,Chemical%20Composition>
14. A Comparative study of Wear and tool life of HSS TiN coated end mills and WC uncoated end mills. 2nd International Conference on Composite Material, Polymer Science and Engineering. 2019 p. Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen Campus, Khon Kaen, Thailand : веб-сайт. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2019/13/matecconf_cmpse2018_01006.pdf#:~:text=Because%20the%20TiN%20coated%20HSS,reason%20of%20high%20peeling%20of
15. Gil Del Val, A.; Veiga, F.; Pereira, O.; Lopez De Lacalle, L.N. Threading Performance of Different Coatings for High Speed Steel Tapping. *Coatings* **2020**, *10*, 464. : веб-сайт. URL: <https://doi.org/10.3390/coatings10050464>
16. Radzevich, S. P. Gear Cutting Tools: Science and Engineering. Сполучені Штати Америки: CRC Press, 2024 p. 646 с.
17. 1643-81 передачи зубчатые цилиндрические. Методы и средства поверки: веб-сайт. URL: <https://studfile.net/preview/4350672/>

18. 9323-79: веб-сайт. URL: https://instrumentservis.ua/uploads/gosts/9323-79.pdf?srsltid=AfmBOoq_cVK2SzzwmyxxApfIENcHOs1xUHWuxAC0Abq17NdwKuMSWMg0
19. Innovative CNC Gear Shaping - Jan/Feb 1994 Gear Technology: веб-сайт. URL: <https://ik.imagekit.io/agmamedia/gt/issues/0194x/lange.pdf>
20. New Cutting Tool Development in Gear Shaping Technology - Jan/Feb1993 Gear Technology: веб-сайт. URL: <https://ik.imagekit.io/agmamedia/gt/issues/0193x/crockett.pdf>