

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Механіко-технологічний факультет  
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри ММР

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Андрій ГРЕЧКА

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему:

**«Розрахунок та проектування інструментального забезпечення для виготовлення колеса зубчастого»**

**«Calculation and design of tooling for the manufacture of gear wheels»**

**КРБ.ПМ.24.79.000.00.00.00 КР**

Виконав здобувач вищої освіти 4-го  
курсу групи ПМ(ТМ)-21-3СК  
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг  
технологій, робототехніка і 3D-друк»  
спеціальності 131 «Прикладна механіка»  
\_\_\_\_\_ Олег КРИЖАНОВСЬКИЙ

Керівник роботи: к.т.н., доц.

\_\_\_\_\_ Олександр ЛИСЕНКО

Рецензент к.т.н., доц.

\_\_\_\_\_ Руслан ОСІН



Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	перший (бакалаврський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	131 Прикладна механіка
Освітньо-професійна програма	Комп'ютерний інжиніринг технологій, робототехніка і 3D-друк

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ММіР  
Андрій ГРЕЧКА

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Олега КРИЖАНОВСЬКОГО

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розрахунок та проектування інструментального забезпечення для виготовлення колеса зубчастого»  
«Calculation and design of tooling for the manufacture of gear wheels»

2. Керівник роботи: к.т.н., доц. Олександр ЛИСЕНКО

затверджені наказом ЦНТУ від «01» квітня 2024 р. № 130-02

3. Строк подання роботи до захисту «10» червня 2024 р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи:

Мета роботи полягає у вивченні способів обробки зубчастих коліс евольвентного профілю та розробка і проектування відповідного інструментального забезпечення.

Завдання:

- виконати аналіз способів обробки зубчастих коліс евольвентного профілю;
- розробити конструкції інструментів для обробки центрального посадкового отвору зі шліцями – внутрішньої шліцьової протяжки;
- розробити конструкції інструментів для обробки зубчастого вінця зубчастого колеса – зубонарізного довбача та модульної черв'ячної фрези;
- виконати робочі креслення конструкцій розробленого інструментального забезпечення.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд літературних джерел	Квітень 2024	
2.	Вступ	Квітень 2024	
3.	Мета та задачі роботи	Квітень 2024	
4.	Огляд необхідного інструментального забезпечення для виготовлення зубчастих коліс	Квітень 2024	
5.	Розрахунок та проектування шліцьової протяжки	Травень 2024	
6.	Розрахунок та проектування зубонарізного інструменту довбача та черв'ячної фрези	Травень 2024	
7.	Виконання креслень	Травень 2024	
8.	Висновки	Травень 2024	
9.	Оформлення пояснювальної записки	Червень 2024	
10.	Оформлення презентації роботи	Червень 2024	
11.	Задача роботи на перевірку наявності запозичень	Червень 2024	

Дата видачі завдання « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Олександр ЛИСЕНКО  
(підпис)

Завдання прийнято до виконання « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_ Олег КРИЖАНОВСЬКИЙ  
(підпис)

## Анотація

КРИЖАНОВСЬКИЙ Олег. Розрахунок та проектування інструментального забезпечення для виготовлення колеса зубчастого. Випускна кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «бакалавр»: ЦНТУ, м. Кропивницький, 2024. – 71 с. Графічна частина відповідає 3 аркушам формату А1.

**Метою роботи** є вивчення способів обробки зубчастих коліс евольвентного профілю та розробка і проектування відповідного інструментального забезпечення.

**Актуальність:** розрахунок та проектування інструментального забезпечення обробки зубчастих коліс евольвентного профілю є актуальною виробничою задачею.

**Практичне значення:** виконано аналіз способів обробки зубчастих коліс евольвентного профілю, розроблені конструкції інструментів: для обробки центрального посадкового отвору зі шліцами – внутрішньої шліцьової протяжки; для обробки зубчастого вінця зубчастого колеса – зубонарізного довбача та модульної черв'ячної фрези.

**Ключові слова:** зубчасте колесо, евольвентний профіль, шліцьова протяжка, дисковий довбач, черв'ячна фреза.

### **Annotation**

KRYZHANOVSKYI Oleh. Calculation and design of tooling for the manufacture of gear wheels. Graduation thesis for the educational degree "Bachelor": CNTU, city Kropyvnytskyi, 2024. - 71 p. The graphic part corresponds to 3 sheets of A1 format.

**The purpose of the work** is to study methods of processing gears of an involute profile and to develop and design the appropriate tooling.

**Relevance:** calculation and design of tool support for the processing of involute profile gears is an urgent production task.

**Practical meaning:** an analysis of methods of processing gears of an involute profile was performed, tool designs were developed: for processing the central landing hole with slots - internal slot broaching; for processing the toothed crown of the toothed wheel - gear-shaping cutter and modular worm cutter.

**Key words:** gear, involute profile, splined broach, gear-shaping cutter, worm cutter.

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Механіко-технологічний факультет  
Кафедра «Машинобудування, мехатроніки і робототехніки»

# **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної роботи на тему:

**«Розрахунок та проектування інструментального забезпечення для  
виготовлення колеса зубчастого»**

**«Calculation and design of tooling for the manufacture of gear wheels»**

**КРБ.ПМ.24.79.000.00.00.00 ПЗ**

Виконав здобувач вищої освіти 4-го  
курсу групи ПМ(ТМ)-21-3СК  
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг  
технологій, робототехніка і 3D-друк»  
спеціальності 131 «Прикладна механіка»  
\_\_\_\_\_ Олег КРИЖАНОВСЬКИЙ

Керівник роботи к.т.н., доц.  
\_\_\_\_\_ Олександр ЛИСЕНКО

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС.....	
1.1. Аналіз технологічності деталі типу зубчасте колесо .....	12
1.2. Конструктивні особливості внутрішніх протяжок .....	15
1.3. Методи нарізання зубчатих коліс.....	18
1.4. Інструмент для нарізання зубчатих коліс методом копіювання .....	20
1.5. Інструмент для нарізання зубчатих коліс методом обкатки.....	22
2. ПРОЕКТУВАННЯ ШЛІЦЬОВОЇ ПРОТЯЖКИ.....	
2.1. Загальні позначення розрахунку протяжки.....	26
2.2. Проектування шліцьової протяжки.....	27
3. РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУЮВАННЯ ЗУБОНАРІЗНОГО ДОВБАЧА.....	
3.1. Загальні відомості до розрахунку довбача .....	35
3.2. Розрахунок параметрів евольвентної циліндричної передачі зовнішнього зачеплення.....	35
3.3. Розрахунок параметрів довбача в висхідному перетині .....	37
3.4. Розрахунок параметрів нового довбача .....	38
3.5. Розрахунок параметрів сточеного довбача.....	39
4. РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУЮВАННЯ МОДУЛЬНОЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ .	
4.1. Загальні відомості до розрахунку черв'ячної фрези .....	43
4.2. Евольвентна циліндрична передача зовнішнього зачеплення .....	43
4.3. Розрахунок параметрів висхідного виробного черв'яка фрези.....	45
4.4. Розрахунок параметрів ріжучої частини фрези .....	47
ВИСНОВКИ.....	50

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	52
ДОДАТКИ.....	54
Додаток А.....	55
Додаток Б .....	64
Додаток В.....	68

## ВСТУП

Зубчасті колеса це головні деталі зубчастих передач. Зубчасті передачі використовують в самих різних відповідальних вузлах та механізмах в машинобудуванні. Зокрема це, коробки подач, коробки передач, редуктори та інші механічні передачі, призначенні для передачі колового руху або ще й перетворення колового руху у прямолінійний та навпаки, це усілякі приводи та гідромашини, шестеренні гідронасоси та редуктори, та багато ін.

Оскільки основною робочою поверхнею зубчастого колеса є зубчастий вінець, який представляє собою ряд зубів з евольвентним профілем, розташованих по колу, то саме якість його виробництва безпосередньо впливає на експлуатаційні характеристики машин і механізмів.

Як правило зубчасте колесо представляє собою тіло у вигляді диску, в центрі якого виконано посадковий центральний отвір, а по циліндричному зовнішньому краю вироблений зубчастий вінець. Надійним посадковим центральним отвором є шліцьовий.

Для виготовлення посадкового центрального отвору, в тому числі й шліцьового доцільно використовувати внутрішню шліцьову протяжку, оскільки вона дозволяє за один робочий хід виконати обробку від чорнової до кінцевої та нарізати необхідні шліці в отворі.

Протяжка – багатолезовий інструмент з низкою послідовно виступаючих одне над іншим лезами в напрямку перпендикулярному до напрямку швидкості головного руху. Призначена для обробки при поступальному головному русі різання і відсутності руху подачі. Вона є найпродуктивнішим інструментом. Протяжка – металомісткий, складний у виготовленні, і тому дорогий інструмент. Економічна доцільність їх застосування виправдовується при забезпеченні оптимальних елементів конструкцій та режимів різання, якісному виготовленні протяжок правильної експлуатації.

Для нарізування зубів на зубчастих колесах використовують багато різних інструментів, але перевагу віддають інструментам, що працюють за методом обкатування імітуючи зубчасті зачеплення це довбач, що імітує циліндричне зубчасте зачеплення колесо – колесо та черв'ячна модульна фреза, що імітує черв'ячне зачеплення черв'як – зубчасте колесо.

Ці інструменти дозволяють отримати евольвентний профіль необхідної якості, забезпечивши при цьому відносно високу продуктивність обробки.

Довбач це металорізальний інструмент для нарізування зубів прямозубих і косозубих зубчастих коліс зовнішнього і внутрішнього зачеплення, зубчастих вінців шевронних коліс з канавкою і без неї, зубчастих коліс блоків, зубчастих коліс з виступаючими фланцями, що обмежують вільний вихід інструменту і зубчастих рейок. Довбач має вигляд зубчастого колеса, спорядженого ріжучими елементами з відповідним заточуванням.

Черв'ячна фреза – це багатолезовий інструмент з ріжучими зубами, який призначений для нарізання методом обкатки зубчастих коліс, які мають з евольвентний профіль. Фреза називається черв'ячною тому, що принцип її роботи базується на рухах присутніх при зачепленні черв'яка з черв'ячним колесом. Черв'ячні фрези поділяються на чорнові (для попередньої обробки), чистові (для чистової обробки) та прицеційні (для обробки підвищеної точності). Кількість заходів передбачає поділ черв'ячних фрез на однозаходні і багатозаходні. Відповідно напрямку витків фрези поділяють на правозаходні та лівозаходні. За конструкцію черв'ячні фрези бувають цільними та складеними.

Отже **метою роботи** є вивчення способів обробки зубчастих коліс евольвентного профілю та розробка і проектування відповідного інструментального забезпечення.

**Актуальність:** розрахунок та проектування інструментального забезпечення обробки зубчастих коліс евольвентного профілю є актуальною виробничою задачею.

**Практичне значення:** виконано аналіз способів обробки зубчастих коліс евольвентного профілю, розроблені конструкції інструментів: для обробки центрального посадкового отвору зі шліцями – внутрішньої шліцьової протяжки; для обробки зубчастого вінця зубчастого колеса – зубонарізного довбача та модульної черв'ячної фрези.

# 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ІНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

## 1.1. Аналіз технологічності деталі типу зубчасте колесо

Циліндричним зубчастим колесом називають плоске тіло у формі колеса з замкнутою системою зубів по зовнішній циліндричній поверхні. При чому зубами називають виступи з тіла колеса, призначені для передачі обертального руху шляхом взаємодії з виступами на другому зубчастому колесі (рис. 1.1).

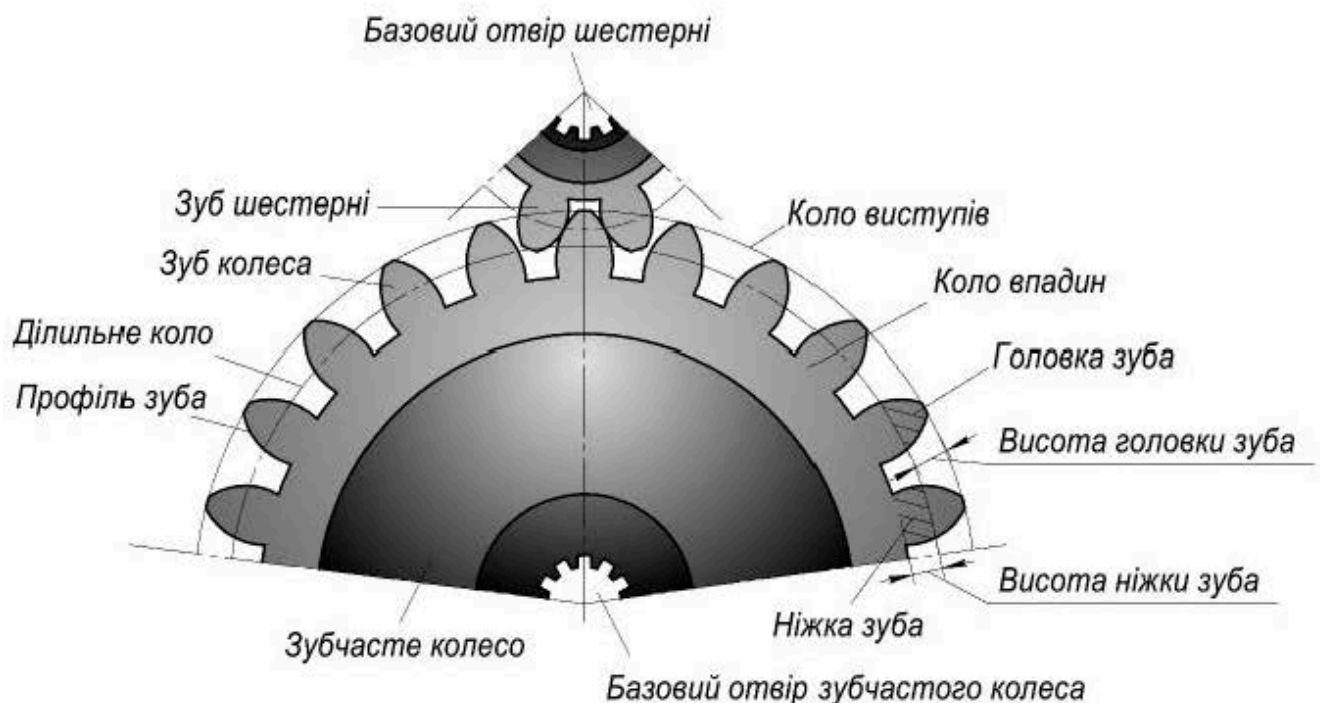


Рисунок 1.1 – Схема зубчастого зачеплення з евольвентним профілем зубів

Зубчасте колесо має тіло і зубчастий вінець. Поверхню, що розділяє зубчастий вінець та основний корпус зубчастого колеса, називають поверхнею западин. Зубчастий вінець циліндричних зубчастих коліс розташовують між поверхнею западин і поверхнею вершин.

Як показує практика машинобудівних заводів, при виготовленні зубчастих коліс у якості матеріалів, найбільше використовують сталі, як вуглецеві, так і леговані. Однак в окремих випадках, виходячи з конструктивних особливостей та

необхідності також можуть виготовляти зубчасті колеса і з інших матеріалів, зокрема з чавуну, бронзи, пластику та ін.

Вимоги до зубчастих коліс, перш за все високоточних, визнається експлуатаційними вимогами, зокрема для зубчастих коліс необхідно забезпечити стабільність розмірів. Це призводить до підвищених вимог до матеріалу, з яких виготовляють зубчасті колеса по однорідності та умови відсутності (що майже не можливо забезпечити в умовах реального виробництва) або рівноваги внутрішніх напруг у матеріалі після процесів обробки.

Виходячи з вказаних вимог до матеріалу для виготовлення зубчастого колеса надається перевага легованим сталям, які в процесі обробки піддаються меншому ступеню короблення в порівнянні з наприклад зі звичайними вуглецевими сталями, але мають більшу вартість. Наприклад, при виготовленні коліс 5 ... 6-го ступенів точності у якості матеріалів для виготовлення використовують сталі 20Х, 12ХНЗА, 25ХГТ (для деталей з таких сталей характерна технологія зміцнення робочих поверхонь термообробка – нітроцементация), 18ХГТ (цементация), 40Х і 40ХФА (гартування). Вуглецеві сталі (сталь 15, 20) піддають цементации, а сталі 40, 45 – загартуванню.

При виготовленні зубчастих коліс, які мають маточину (рис. 1.2), обробка, як правило розпочинається з посадкового центрального отвору (при цьому поверхня посадкового отвору використовується у якості подвійної спрямовуючої бази) та торцю (при цьому поверхня торцю зубчастого колеса використовується у якості опорної бази). Відносно вказаних поверхонь зубчастого колеса здійснюється всі подальші технологічні операції його обробки.

При виготовленні плоских зубчастих коліс, які мають велику площу торцевої поверхні при малій ширині зубчастого вінця, обробку таких зубчастих коліс розпочинають з базової торцевої поверхні (при цьому поверхня торцю зубчастого колеса використовується у якості установчої бази) та отвору (при цьому поверхня посадкового центрального отвору використовується у якості подвійної опорної бази).

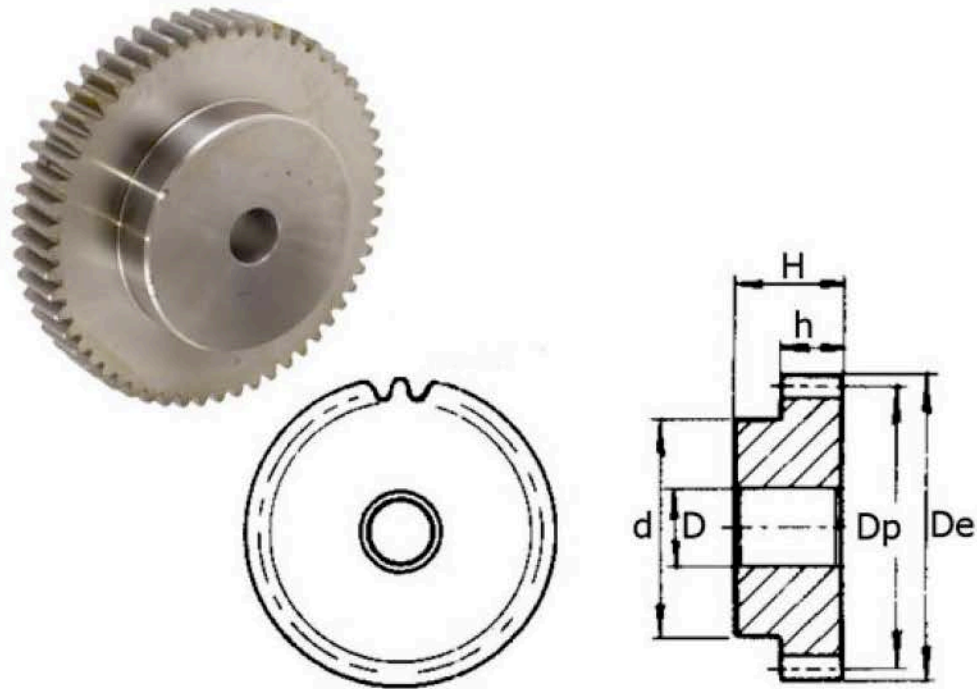


Рисунок 1.2 – Зубчасте колесо  $m = 3$  мм  $z = 12$  з маточиною ( $D = 13 \dots 16$  мм)

При виборі баз для базування зубчастого колеса в процесі різання суттєвий вплив має метод базування обробленого зубчастого колеса при встановленні його на валу, і потім у процесі роботи вузла чи механізму, частиною конструкції якого воно є. Тобто принциповим є характер посадкового центрального отвору – циліндричний отвір або шліцьовий).

Якщо зубчасті колеса мають циліндричний вид внутрішнього посадкового центрального отвору (рис. 1.3), то при базуванні, в процесі його обробки, заготовку встановлюють на точну оправку.



Рисунок 1.3 – Зубчасте колесо з циліндричним посадковим отвором

Якщо ж зубчасті колеса мають в посадковому центральному отворі шліці прямокутного профілю (рис. 1.4.), центрування здійснюється за найбільшим або найменшим діаметром шліцьового з'єднання або по бічних поверхнях.



Рисунок 1.4 – Зубчасті колеса з шліцьовими посадковими отворами

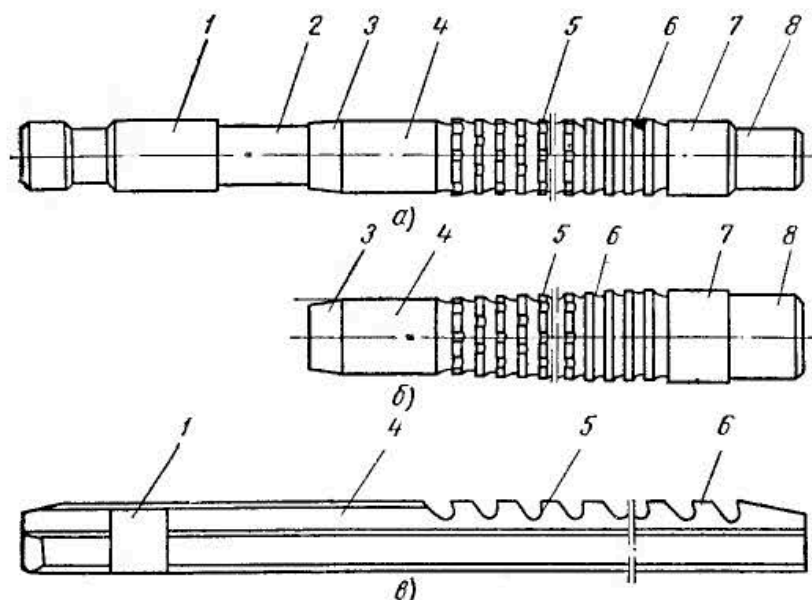
## 1.2. Конструктивні особливості внутрішніх протяжок

Залежно від операції протягування або прошивання розрізняють протяжку й прошивку. При протягуванні інструмент (протяжка), який представляє собою довгий стрижень із поступово збільшеними по розміру зубами, працює на розтягування, а при прошиванні інструмент (прошивка) проштовхується через отвір і працює на стиск і поздовжній вигин.

Внутрішні протяжки (цільні й збірні) залежно від форми отвору, що протягується, бувають круглі, багатогранні, шліцьові, шпонкові й ін.

Основні конструктивні елементи внутрішніх протяжок – загальні для всіх видів (рис. 1.5). Прошивки відрізняються відсутністю хвостової частини, тому що прошивка проштовхується тиском штока верстата на торець цапфи задньої напрямної прошивки (рис. 1.5).

Хвостовик 1 протяжки служить для з'єднання протяжки за допомогою патрона з робочою кареткою протяжного верстата. Конструкція хвостовика залежить від типу протяжки й конструкції патронів.



а) кругла протяжка; б) кругла прошивка; в) шпонкова протяжка

Рисунок 1.5 – Основні частини протяжок і прошивок

Шийка 2 і перехідний конус 3 зв'язують хвостову й напрямну частини. На шийку зазвичай наноситься маркування протяжки. Для окремих типів хвостовиків, а також для шпонкових і плоских протяжок шийка не виділяється, а виконується одним цілим із хвостовиком.

Передня напрямна частина протяжки 4 служить для встановлення оброблюваної деталі на протяжку перед протягуванням і для направлення й центрування протяжки щодо осі оброблюваної деталі. Розмір і форма поперечного перерізу передньої напрямної частини відповідають розміру й формі поперечного перерізу деталі до протягування.

Ріжуча частина 5 протяжки служить для зрізання припуску, залишеного під протягування, і складається з ряду послідовно розташованих ріжучих зубів, кожний з яких зрізує шар металу певного перетину. По величині подачі зуби можуть бути розділені на обдирні (чорнові), перехідні та чистові. Кількість ріжучих зубів залежить від величини припуску, прийнятої подачі на зуб і обраної схеми різання.

Чорнові зуби призначені для зрізання основної частини припуску. Перехідні зуби служать для поступового зменшення сил при переході від чорнових до чистових зубів та для зачищення грубої поверхні після обробки чорновими зубами. Це забезпечує зменшення спрацювання чистових зубів, а

значить покращує їх стійкість. Чистові зуби служать для остаточного оформлення обробного отвору, отримання необхідної якості (точності та шорсткості) поверхні.

Калібрувальна частина 6 протяжки складається з невеликого числа зубів, розміри й форма яких однакові й відповідають формі й розмірам готового отвору.

Задня напрямна частина 7 перешкоджає перекосу деталі на протяжці й ушкодженню обробленої поверхні й зубів у момент виходу останніх зубів калібрувальної частини 6 з отвору. Плоскі шпонкові протяжки виконуються, як правило, без задньої напрямної. Поперечні розміри задньої напрямної повинні відповідати найменшому припустимому розміру готового отвору.

У дуже довгих і важких протяжок задня напрямна має також опорну цапфу 8, за яку протяжка підтримується люнетом, що сковзає по напрямних корита протяжного верстата. Це необхідно для підтримки й центрування протяжки під час робочого ходу й для втримання протяжки при зворотному ході верстата й перед початком роботи.

Часто протяжка має задній хвостовик такої ж форми й розмірів, як і передній, що служить для захвата протяжки патроном каретки зворотного ходу верстата при роботі на верстатах з напівавтоматичним або автоматичним циклом.

Загальну довжину протяжки визначають як суму довжин її складових конструктивних елементів. Загальна довжина протяжки повинна задовольняти технічним умовам її експлуатації та технологічним умовам можливості її виготовлення. Вона не повинна перевищувати максимальної довжини ходу повзуна протяжного верстата та перевищувати максимально можливих розмірів заготовок, які можна обробити на наявному обладнанні. Граничні відношення довжини протяжки до її діаметру: 55 для протяжок малих розмірів; 40 для протяжок середніх розмірів та 30 для протяжок великих розмірів.

Особливістю шліцьових протяжок (рис. 1.6) є те, що вони призначені для обробки шліцьових отворів. Шліцьова протяжка має ті ж самі конструктивні елементи, що і кругла протяжка але її робоча частина та передні і задні напрямні відрізняється від робочої частини та передніх і задніх напрямних круглих протяжок наявністю різальних виступів та виїмок, що формують з круглого отвору заготовки перед обробкою прямобічні чи евольвентні шліці після обробки.



Рисунок 1.6 – Протяжка шпільова Д10×72×82 1 75-150 Р6М5

### 1.3. Методи нарізання зубчатих коліс

Основним методом одержання зубчастих коліс є обробка різанням. Неточні зубчасті колеса можна одержувати литвом, а профіль зубчастих коліс малого модуля – накручуванням. Одержання профілю зубів із застосуванням лезового інструмента може здійснюватися двома методами: методом копіювання і методом обкатування. При першому способі обробки профіль інструмента (пальцеві й дискові модульні фрези, рис. 1.7) визначається профілем западини нарізаного колеса.

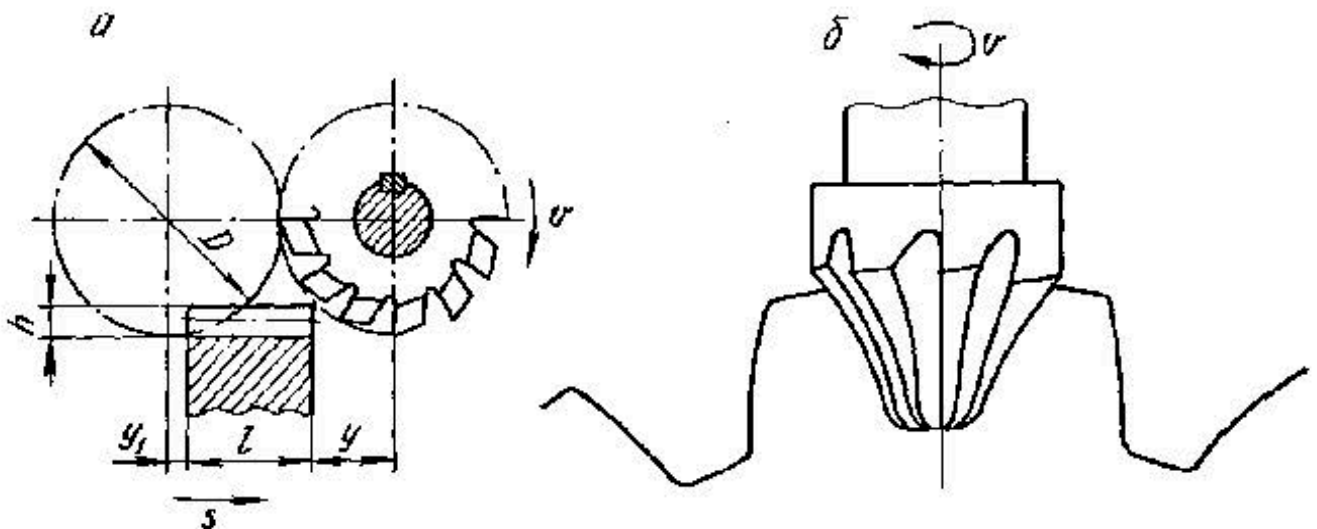


Рисунок 1.7 – Нарізання зубчатого фасонним модульними фрезами:

а) дисковою; б) пальцевою

Недоліком нарізування зубчастих коліс по методу копіювання є низька точність обробки й мала продуктивність, а також необхідність мати набори інструментів для кожного модуля, що складаються з 8, 15 або 26 фрез.

Нарізування зубчастих коліс по методу обкатування (рис. 1.8) відбувається шляхом імітування роботи зубчатих зачеплень: циліндричних зубчастих коліс – інструмент довбач; черв'ячних передач – інструмент черв'ячна модульна фрезами. Методом обкатки також нарізують зубчаті колеса стругальними й обкатними різцями і т.д.

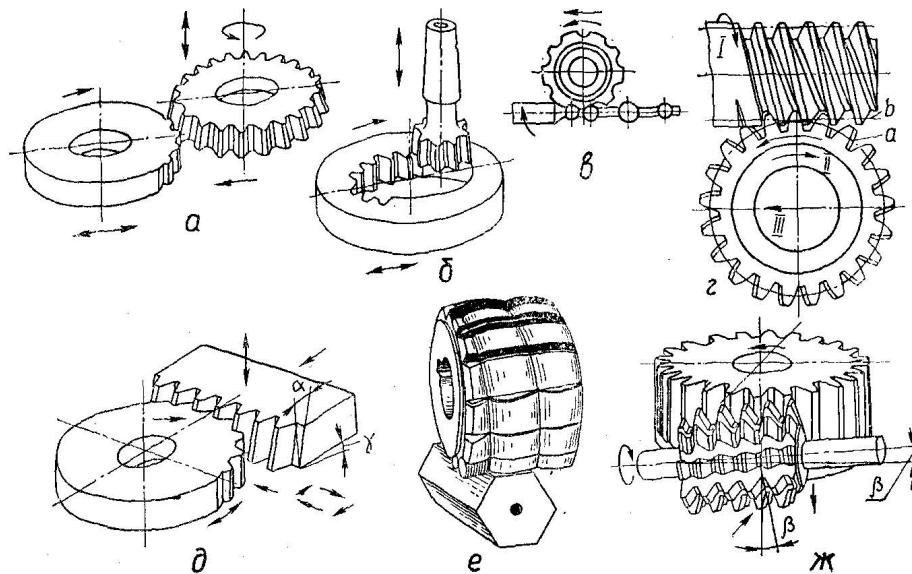


Рисунок 1.8 Схеми обробки обкаточним інструментом

Велике поширення в машинобудуванні, у силу високої продуктивності, набули черв'ячні фрези. При обробці циліндричних фасонних поверхонь, тобто деталей із прямими зубами, фреза і заготовка обертаються навколо своїх вісей і одночасно здійснюється повздовжній рух подачі фрези вздовж осі заготовки (рис. 1.8, ж, е). Обертальні рухи фрези і заготовки кінематично зв'язані один з одним. Одному оборотові однозаходної черв'ячної фрези відповідає поворот заготовки на один зуб. Черв'ячна фреза представляє собою вихідний черв'яка, перетворений у різальний інструмент шляхом прорізання стружкових канавок і затилування зубів. При обробці відбувається зачеплення вихідного черв'яка і деталі. Зубофрезерування черв'ячними фрезами представляє собою безперервний процес, чим і пояснюється його висока продуктивність.

На рис. 1.9 наведена схема роботи довбача, де зазначені рухи довбача і заготовки в процесі різання: I – врізання (подача); II – обертання довбача навколо своєї вісі; III – обертання заготовки навколо своєї вісі; IV – робочий і зворотний рух довбача; V – для запобігання зубів довбача від тертя при зворотному ході заготовка на початку зворотного ходу відсувається від довбача і наприкінці холостого ходу повертається назад.

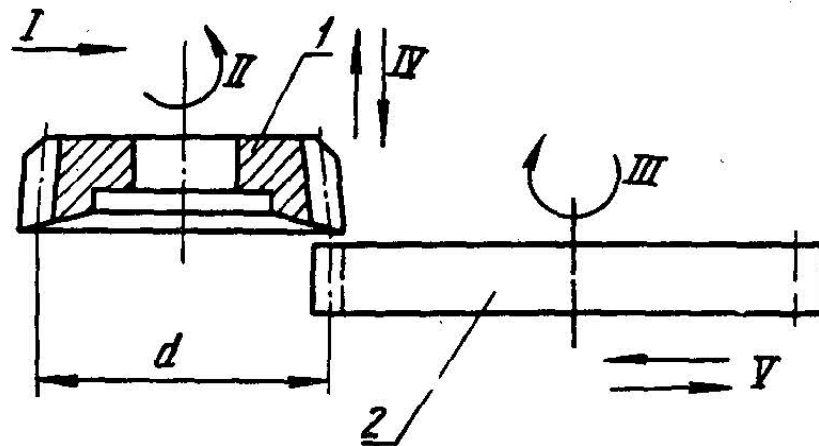


Рисунок 1.9 Схема нарізання зубчатого колеса довбачем:

1 – довбач; 2 – нарізуване колесо

#### 1.4. Інструмент для нарізання зубчатих коліс методом копіювання

Дискові й пальцеві зуборізні фрези (рис. 1.10), а також головки контурного зубодовбання відносяться до інструментів, що працюють по методу копіювання. Профіль їх зубів відповідає профілю западини зубчастого нарізованого колеса. Пальцеві модульні фрези застосовують тільки в тих випадках, коли не можна використовувати дискові модульні фрези. Пояснюється це низькою твердістю пальцевих модульних фрез, що не дозволяє працювати з більшими подачами.

Як дискові, так і пальцеві модульні фрези виготовляються в комплекті з 8 штук при модулях до 10 мм і з 15 штук при більших модулях. При цьому кожна фреза комплекту використовується для нарізування коліс одного модуля з різною кількістю зубів. Наприклад, фреза № 1 застосовується при нарізуванні коліс із  $Z_2 = 12$  і 13; № 2 – з  $Z_2 = 14...16$ ; № 3 – з  $Z_2 = 17...20$  і т.д. При нарізуванні коліс цими ж фрезами з іншою кількістю зубів виникає погрішність у профілі, що знижує точність нарізованих коліс.

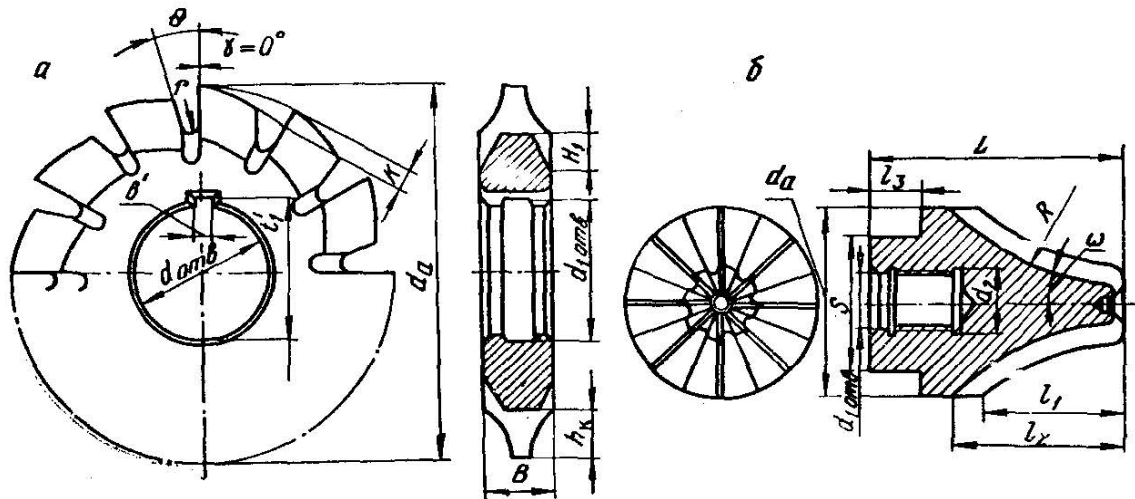


Рисунок 1.10 – Конструктивні елементи фасонних модульних фреза: а) дисковою; б) пальцевою

Для нарізування коліс із модулем  $m > 4$  вигідно користуватися обдирними модульними фрезами, у яких є прорізні, або східчасті, і зачисні зуби (рис. 1.11). З метою зменшення витрати швидкорізальної сталі дискові фрези більших розмірів рекомендується робити збірними.

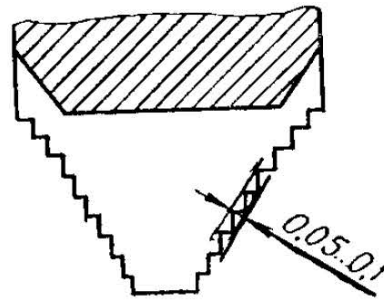


Рисунок 1.11 – Прорізний зуб дискової чорнкової модульної фрези

Східчаста форма прорізних зубів забезпечує надійне дроблення стружки. У чорнових дискових фрез рекомендують робити передній кут  $\gamma_v = 8...12^\circ$  із закругленням куточків зуба по радіусах. Для чистових модульних дискових фрез зазвичай  $\gamma_v = 0$ . Якщо  $\gamma_v \neq 0$ , необхідно проводити корегувальний розрахунок профілю, як і у звичайних фасонних фрез.

Головки контурного зубодовбання працюють по методу копіювання, але є високопродуктивними, тому що забезпечують одночасне нарізування всіх западин оброблюваного зубчастого колеса (рис. 1.12). Ріжучими елементами є фасонні різці 3, що мають форму профілю западини прямозубого циліндричного колеса. Встановлені різці в радіальних пазах корпусу або розводящого кільця 1 після

кожного робочого ходу відводяться, а потім на початку робочого ходу подаються в радіальному напрямку за допомогою звідного кільця 2 і при робочому русі заготовки 4 виконують довшання западин.

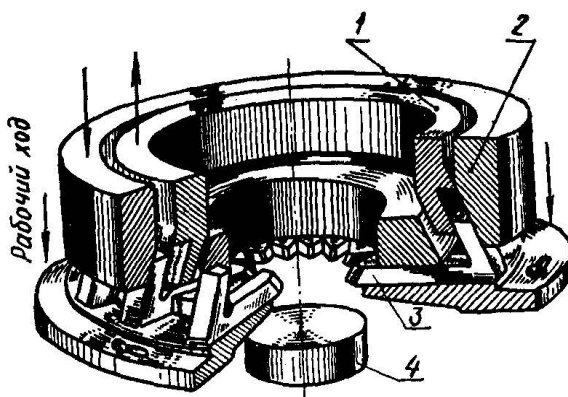


Рисунок 1.12 – Головка для контурного зубодовбання

Незважаючи на складність конструкції, головки контурного зубодовбання можуть застосовуватися в масовому виробництві в силу високої продуктивності процесу нарізування зубчастих прямозубих коліс.

### 1.5. Інструмент для нарізання зубчастих коліс методом обкатки

Зуборізні довбачі працюють по методу обкатування. В основу виготовлення довбача покладена не прямозуба рейка, а шестірня з відповідними кутами. Продуктивність обробки довбачами трохи нижче, ніж черв'ячними фрезами, але вони дозволяють нарізати такі колеса, як, наприклад, блоки коліс, шевронні колеса, внутрішнього зачеплення й інші, які не можна нарізати черв'ячними фрезами. Точність же по профілі зубчастих коліс, нарізаних довбачами, вище, ніж при зубофрезеруванні.

Залежно від характеру оброблюваних деталей довбачі діляться на три групи:

- 1) прямозубі – для нарізування прямозубих коліс;
- 2) косозубі – для нарізування коліс із гвинтовим зубом і шевронними колісьми;

3) спеціальні – для нарізування зубчастих деталей неевольвентного зачеплення (зірочки, шліцьові вали й т.д.).

По конструкції довбачі класифікуються на наступні групи (рис. 1.13):

1) дискові – застосовуються для коліс внутрішнього й зовнішнього зачеплення при більших діаметрах;

2) чашкові – для нарізування зубів в упор;

3) хвостові – для коліс внутрішнього зачеплення малого діаметра, де неприпустимі застосування й виготовлення дискового довбача;

4) втулкові є видозміненим типом хвостового довбача;

5) збірні;

6) комбіновані – для чорнкової й чистової обробок. По точності довбачі бувають класів АА, А и В. Для забезпечення різання довбачу надають трохи змінений вид в порівнянні зі звичайним зубчастим колесом.

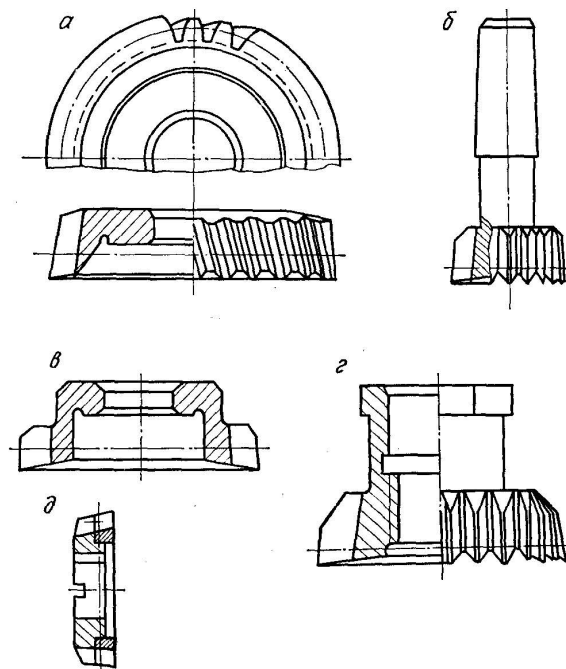


Рисунок 1.13 – Довбачі: а) дискові; б) хвостові; в) чашкові; г) втулкові; д) збірні

Черв'ячні фрези по технологічних ознаках діляться на дві основні групи: 1) для нарізування циліндричних коліс чорнові й чистові фрези, які відрізняються між собою числом заходів, геометричними параметрами й кутом нахилу стружечних канавок; 2) для нарізування черв'ячних коліс із радіальною й тангенціальною подачами.

Залежно від вимог до якості зубів нарізаних коліс, ці фрези діляться на чотири класи точності. Залежно від ступенів точності нарізаних коліс (від 6 до 10-й) застосовуються модульні черв'ячні фрези відповідно класів точності ААА, АА, А, В і С із посадковими отворами, виконаними по посадках 0,5Н6; 0,7Н6; Н6; Н6 і Н7. Для нарізання коліс 7...9 та 10-го ступенів точності служать фрези відповідно класів АА, А, В і С.

Черв'ячна фреза (рис. 1.14, а) представляє собою черв'як зі стружковими канавками, нахиленими під кутом  $\beta$  до осі фрези й утворюючих ріжучих зубів.

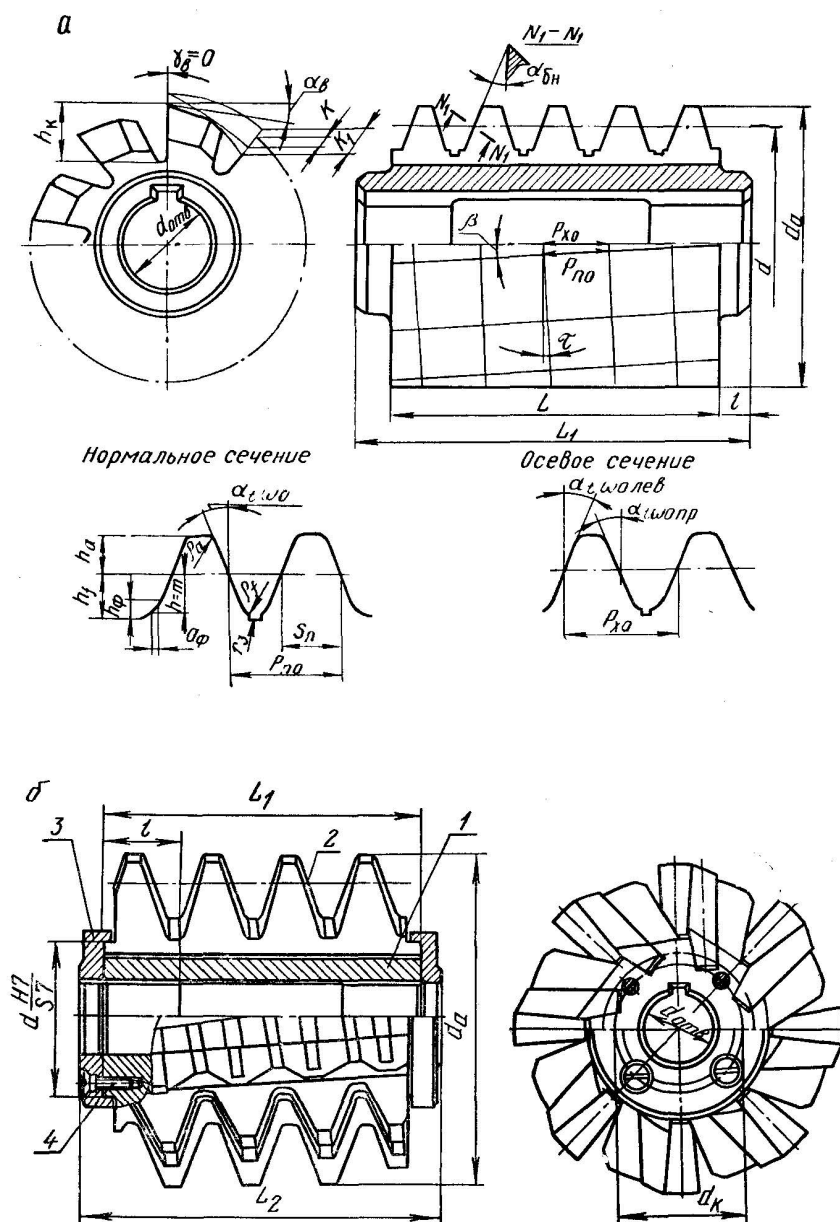


Рисунок 1.14 – Конструктивні елементи та геометричні параметри черв'ячних фрез: а) цільна; б) збірна

Зуби модульної фрези мають периферійне й два бічних ріжучі леза. Передня поверхня зуба є гвинтовою, а задні поверхні затиловані по спіралі Архімеда.

Для чистових фрез передній кут у периферійного ріжучого леза приймається рівним нулю, а для чорнових –  $\gamma = 5...10^\circ$ . Зі збільшенням кута  $\gamma$  поліпшуються умови різання, але спотворюється профіль зубів нарізаного колеса. Задні кути бічних лез  $\alpha_{б.н}$ , дорівнюють  $3...4^\circ$ .

Черв'ячні фрези для циліндричних зубчастих коліс, починаючи з модуля 10 і вище, з метою економії швидкорізальної сталі варто виготовляти тільки збірними. З іншого боку, для фрез більших розмірів неможливо одержати якісні поковки зі швидкорізальних сталей.

## 2. ПРОЕКТУВАННЯ ШЛІЦЬОВОЇ ПРОТЯЖКИ

### 2.1. Загальні позначення розрахунку протяжки

В цьому розділі проводимо розрахунок та конструювання протяжки для обробки шліцьового отвору.

Розрахунки проводимо за допомогою програми [див. додаток А].

Вихідними даними для розрахунку протяжки являються: марка і твердість матеріалу деталі, стан поверхні до протягування; форма і розміри оброблюваного отвору, точність розмірів і шорсткість поверхні; технічні характеристики верстата – тягова сила, хід штоку, діапазон швидкостей, стан верстата; характер виробництва; технологічні можливості інструментального цеху.

У даному розділі прийняті наступні позначення.

По відношення до оброблюваної деталі:

$D_o$  – діаметр отвору до протягування;

$D$  – зовнішній діаметр шліцьового отвору;

$d$  – внутрішній діаметр шліцьового отвору;

$b$  – ширина шліцьового пазу;

$Z$  – число шліців;

$f$  – величина фаски на шліцах;

$l$  – довжина оброблюваної деталі.

По відношення до протяжки:

$z$  – число зубців;

$t$  – крок зубців;

$h$  – глибина стружкової канавки;

$B$  – ширина ріжучого сектора зачисного зубця;

$B$  – ширина ріжучого сектору прорізних зубців шліцьових протяжок;

$p$  – периметр зрізу;

$s$  – підйом на зуб або секцію зубців;

$q_o$  – питома сила різання, що припадає на 1 мм периметру зрізу;

$i$  – число секцій зубців;

$K$  – коефіцієнт заповнення стружкової канавки;

$K_p$  – коефіцієнт, що враховує змінні умови роботи;

$A$  – припуск;

$l$  – довжина відповідної частини протяжки;

$P_{xв}, P_{неб}, P_{max}$  – сили, що допускаються міцністю, хвостовика, небезпечного перерізу протяжки і максимальна на інструмент;

$Q$  – тягова сила верстата;

$\sigma_{pp}$  – допустимі напруження в небезпечному перерізі;

$V$  – швидкість різання;

$\gamma, \alpha$  – передній і задній кути;

$a$  – ширина викружки;

$n$  – число викружок.

Індекси  $o, n, ч, к$  відносяться до чорнової, перехідної, чистової, калібрувальної частин протяжок;  $\Sigma$  – відноситься до всієї протяжки;  $p$  – відноситься до ріжучої частини;  $кр, ф, ш$  – відносяться до круглих, фасочних та шліцьових зубців.

## 2.2. Проектування шліцьової протяжки

Розрахунок протяжок відбувається в наступному порядку.

1. Встановлюють групу оброблюваності в залежності від марки і твердості матеріалу деталі.

2. Встановлюють групу якості оброблюваної поверхні в залежності від точності і шорсткості оброблюваної поверхні.

3. Назначають матеріал ріжучої частини протяжки в залежності від типу виробництва і властивостей матеріалу деталі.

4. Назначають спосіб з'єднання хвостовика з тілом протяжки, його тип і розміри.

Найбільший можливий діаметр хвостовика:

$$d_x = D_o - (0.5...1),$$

приймається по ГОСТ 4044-70 найближчий. В залежності від прийнятого типу і розмірів хвостовика визначається сила, що допускається міцністю хвостовика  $P_{хв}$ .

5. Назначають величини переднього  $\gamma$  і заднього  $\alpha$  кутів в залежності від групи оброблюваності, групи якості і виду зубців.

6. Назначають величину швидкості різання  $V$  з врахуванням групи оброблюваності та групи якості і коригують за верстатом. Прийнятну швидкість враховують при подальших розрахунках.

7. Вибирають параметри чистової частини протяжки  $z_q, s_q, A_q$ . Приймають число калібрувальних зубців  $z_k$ .

8. Вибирається подача чорнових зубців  $s_o$  за умови рівної стійкості. В залежності від швидкості різання визначається стійкість чистової частини протяжки. Якщо швидкість різання чистової і чорнової частин протяжки однакова, то визначається стійкість чорнової частини, що рівна або дещо більша за стійкість чистової частини, і відповідна цій стійкості подача чорнових зубців. Далі обрана подача порівнюється з максимально допустимою для даної групи оброблюваності і групи якості подачею чорнових зубців. Подача чорнових зубців не повинна перевищувати максимальних значень.

9. Визначається глибина стружкової канавки з умови розміщення зрізаного зубом шару в стружковій канавці:

$$h = 1.13 \sqrt{ls_o K} . \quad (2.1)$$

Для сталей I-III груп оброблюваності, алюмінієвих і мідних сплавів  $K = 3$ , в інших випадках  $K = 2,5$ .

Глибина канавки протяжок діаметром менше 45 мм обмежується жорсткістю інструмента і не повинна перевищувати

$$h_{\max} = (0.2 \dots 0.3) D_o . \quad (2.2)$$

З двох значень, розрахованих за формулами (2.1) і (2.2), в наступних розрахунках враховується менше. По цьому значенню  $h$  приймають стандартне значення. Якщо в розрахунках використовується значення  $h$ , знайдене по формулі (2.1), то приймають найближче більше  $h$ , яке не перевищує  $h_{\max}$ . Якщо глибина

канавки обмежується жорсткістю, то приймають найближче менше до  $h_{\max}$  значення. У цьому випадку максимальна подача, що відповідає умові розміщення стружки:

$$s_o = \pi h_{\max}^2 / (4lK). \quad (2.3)$$

10. Крок  $t_o$  чорнових зубців і профіль стружкової канавки приймають в залежності від прийнятої глибини канавки  $h$ . Кожному профілю канавки відповідає декілька значень кроку. До розрахунку приймається найменший крок.

11. Число одночасно працюючих зубців:

$$z_p = l / (t_o - 0.4).$$

Число  $z_p$  округляється до ближчого більшого цілого числа. Число  $z_p < 3$  не допускається. У цьому випадку необхідно зменшувати  $t_o$  з урахуванням виконання рівності (2.3).

12. Максимально допустима сила різання  $P_{\max}$  приймається рівною меншій з сил, що обмежуються міцністю хвостовика  $P_{хе}$ , тяговою силою верстата  $Q$  і небезпечним перерізом протяжки  $P_{неб}$ :

$$P_{ст} = (0.8...0.9)Q;$$

$$P_{неб} = F_{неб} \sigma_{pp}.$$

Значення  $\sigma_{pp}$  для швидкоріжучих сталей приймати 400...500 МПа для протяжок діаметром до 15 мм і 350...400 МПа для більших діаметрів. Для сталі ХВГ  $\sigma_{pp} = 250$  МПа.

13. Число зубців в секції визначається за формулою:

$$z_c = pq_o z_p K_{pm} K_{po} K_{pp} K_{pk} / P_{\max}, \quad (2.4)$$

де  $K_{pm}, K_{po}, K_{pp}, K_{pk}$  - поправочні коефіцієнти на змінені умови роботи в залежності від оброблюваності матеріалу, його стану і твердості, виду змащувально-охолоджуючої рідини, способу розділення стружки, групи якості протягнутої поверхні.

Периметр зрізу:

для шліцевих протяжок на фасочній частині:  $p = nb_{\phi}$ ;

на круглій частині після фасочної:  $p = nb_{\kappa}$ ;

на шліцевій частині:  $p = nb_{ш}$ .

Для шліцевих протяжок число  $z_c$  обмежується в залежності від ширини ріжучого сектора і діаметра протяжки. Якщо на фасочних і круглих зубцях розрахункове число  $z_c < 1$  і ширина ріжучого сектору не перевищує допустимих значень, для подальшого розрахунку можна приймати  $z_c = 1$ . Якщо на шліцевій частині протяжки  $z_{cш} < 1$ , то з метою підвищення якості поверхні приймають  $z_{cш} = 2$ . Якщо розрахункове число  $1 < z_{cш} < 3$ , необхідно виконати розрахунок для значень  $z_{cш}$ , округлених в більшу і меншу сторону до цілого числа.

При округленні розрахованого числа  $z_c$  до  $z_{c\max}$  сила різання при протягуванні не може перевищити максимально допустимої сили  $P_{\max}$ , тому значення  $s_o$ ,  $t_o$ ,  $z_p$ , прийняті в пп. 8, 10, 11, залишаються без змін.

Якщо розраховане число  $z_c$  округляється до  $z_{c\min}$ , то діюча сила різання перевищить допустиму. Зменшити діючу силу до величини, що не перевищує  $P_{\max}$ , можна за рахунок зміни (зменшення)  $s_o$ , і  $z_p$ . Для зменшення подачі чорнових зубців при числі  $z_p$ , що прийняте в п. 11, визначають величину

$$q_{оум} = P_{\max} z_{c\min} / (p z_p K_{рм} K_{ро} K_{рр} K_{рк}). \quad (2.5)$$

По величині  $q_{оум}$  шукаємо найближче менше  $q_o$  і відповідне йому  $s_{оум}$ .

Зменшене значення  $z_{рум}$  при  $s_o$ , яке прийняте в п. 8, визначається за формулою:

$$z_{рум} = P_{\max} z_{c\min} / (p q_o K_{рм} K_{ро} K_{рр} K_{рк}). \quad (2.6)$$

Округливши  $z_{рум}$  до найближчого меншого цілого числа, збільшений крок визначають за формулою

$$t_{оуе} = (l / z_{рум}) + 0.4$$

і приймають найближчий більший. При цьому відповідна величина  $h$  повинна задовольняти умові (2.2).

Таким чином, коли  $2 < z_c < 5$  число дробне, то отримується три варіанти протяжки. Всі наступні розрахунки виконуються для кожного варіанта.

14. Назначають число секцій перехідної частини  $i_n$ , подачі на кожну секцію, припуск  $A_n$ .

15. Розподіл припуску між зубцями протяжки.

Припуск на фасочну частину перед круглою:  $A_\phi = D_\phi - D_o$ ,

де діаметр останнього фасочного зуба:  $D_\phi = d + 2f + 0,4$ .

Припуск на круглу частину після фасочної:  $A_{кр} = d_{\max} - D_{o\min}$ .

Припуск на шліцьову частину:  $A_{ш} = D_{\max} - D_{ш1}$ ,

де діаметр першого шліцьового зуба:  $D_{ш1} = D_\phi - 0,1$ .

Припуск на чорнові зубці:  $A_o = A - A_n - A_\phi$ .

Припуск на перехідні  $A_{кн}$ ,  $A_{шн}$  і чистові  $A_{кч}$ ,  $A_{шч}$  зубці круглої і шліцьової частин приймаються з таблиць довідників. Припуск на чорнові зубці:

$$A_{ок} = A_k - A_{кн} - A_{кч};$$

$$A_{шо} = A_{ш} - A_{шн} - A_{шч}.$$

16. Число секцій чорнових зубців і розподіл остаточного припуску.

Розрахункове число секцій чорнових зубців:

$$i_{op} = A_o / (2s_o).$$

Число  $i_{op}$  зазвичай отримується дробним і округляється до ближчого меншого числа  $i_o$ . Остаточний припуск:

$$A_{ост} = A_o - 2i_o s_o.$$

Остаточний припуск відноситься до чорнової, перехідної чи чистової частин по наступному признаку: якщо  $0,5A_{ост}$  більше подачі першої перехідної секції, то до чорнових зубців додається одна секція з подачею  $0,5A_{ост}$ ; якщо  $0,5A_{ост}$  менше подачі першої перехідної секції, але більше подачі першої чистової секції, то остаточний припуск відноситься на перехідну частину, до якої додається одна секція з  $s_n = 0,5A_{ост}$ ; якщо ж  $0,5A_{ост}$  менше подачі останньої

перехідної секції, то остаточний припуск переноситься на чистову частину, число зубців якої збільшується.

17. Загальне число зубців протяжки.

Число фасочних зубців  $z_{\phi} = i_{\phi} z_{c\phi}$ ;

число круглих чорнових зубців  $z_{окр} = i_{окр} z_{ск}$ ;

число шліцьових чорнових зубців  $z_{ош} = i_{ош} z_{сош} + 1$

число перехідних, чистових і калібруючих круглих і шліцьових зубців визначається з таблиць довідників.

18. Довжина ріжучої частини протяжки:

$$l_p = l_{\phi} + l_{кр} + l_{ш};$$

для протяжок з круглими зубцями після фасочних:

$$l_{\phi} = t_o z_{\phi};$$

$$l_{кр} = t_o (z_{окр} + z_{нкр}) + t_{\kappa} (z_{\kappaкр} + z_{ккр} - 1);$$

$$l_{ш} = t_o (z_{ош} + z_{нш}) + t_{\kappa} (z_{\kappaш} + z_{кш} - 1).$$

Кроки  $t_{\kappa}$  і  $t_o$  вибираються в залежності від  $t_o$ .

Результати розрахунків за пп. 12-17 різних варіантів протяжки порівнюються і обирається оптимальний варіант. Всі інші елементи визначаються для оптимального варіанта.

19. Розміри передньої напрямної.

Діаметр передньої напрямної:

$$d_{nn} = D_{o\min}.$$

Відхилення  $d_{nn}$  приймаються по е8.

Довжина передньої напрямної при відношенні  $l/D < 1.5$

$$l_{nn} = l_{\max};$$

а при  $l/D > 1.5$

$$l_{nn} = 0.75l_{\max}.$$

20. Довжина прямого конуса приймається в залежності від діаметра протяжки.

21. Розміри зубців протяжки.

Діаметр першого фасочного зуба, якщо фасочні зубці перші:

$$D_{\phi 1} = D_o + A_{ост}.$$

Діаметри наступних фасочних зубців:

$$D_{\phi i} = D_{\phi 1} + 2s_{\phi}(i - 1).$$

Діаметр першого прорізного чорнового зуба (першого зуба при  $z_c = 1$ ) круглої частини:

$$D_{o1} = D_{o\min} + 2s_o.$$

Діаметри прорізних зубців наступних секцій круглої частини:

$$D_{oi} = D_{o1} + 2s_o(i - 1).$$

Діаметр першого чорнового пліщового зуба:

$$D_{u1} = D_{\phi\max} - 0,1.$$

Діаметри наступних чорнових пліщових зубців:

$$D_{ui} = D_{u1} + 2s_{ou}(i - 1).$$

Діаметр калібруючих зубців визначається з урахуванням верхнього відхилення обробленого отвору:

$$D_k = D + ES.$$

Допуски на виготовлення зубців протяжок призначають по ГОСТ 9126-63 і ГОСТ 20365-74.

У протяжок пліщових з першою фасочною частиною діаметр впадин фасочних і пліщових зубців приймається  $D_{\phi e} = D_{o\min}$  з відхиленнями по d11.

22. Визначають число, ширину і радіуси викружок на прорізних чорнових, перехідних і чистових зубцях протяжки.

23. Розміри задньої прямої.

Діаметр задньої напрямної для шліцьових протяжок з фасочними зубцями перед круглими:

$$d_{zn} = d_{\min}$$

з відхиленнями по  $d_{11}$ .

Довжина задньої напрямної призначається в залежності від діаметра напрямної та відношення між довжиною обробленого отвору та його діаметром.

24. Загальна довжина протяжки:

$$L = l_{зч} + l_p + l_{zn} + l_y,$$

де  $l_{зч}$  – довжина з'єднувальної частини протяжки від переднього торця до першого ріжучого зуба.

Розмір  $l_{зч}$  приймається по паспорту верстата. Загальна довжина протяжки не повинна бути більшою за хід каретки верстата, а також не перевищувати довжини, обмеженої технологічними можливостями виробника.

25. Технічні вимоги на виготовлення протяжки, допуски на виконання окремих її елементів і шорсткість поверхні призначають по ГОСТ 9126-63.

Креслення на протяжки перемінного різання оформлюють згідно вимог ГОСТ 20365-74.

### 3. РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУЮВАННЯ ЗУБОНАРІЗНОГО ДОВБАЧА

#### 3.1. Загальні відомості до розрахунку довбача

В цьому розділі проводимо розрахунок та конструювання зубонарізного довбача для обробки зубчатого колеса.

Розрахунки проводимо за допомогою програми [див. додаток Б].

Вихідні дані для розрахунку зубонарізного довбача: геометричні параметри оброблюваного колеса; вимоги до точності і якості обробки зубчатого вінця; призначення довбача.

Розрахунок довбача складається з чотирьох етапів:

- I. Розрахунок параметрів довбача в висхідному перетині.
- II. Розрахунок параметрів нового довбача.
- III. Розрахунок параметрів сточеного довбача.
- IV. Розрахунок і призначення параметрів ріжучої частини і виконавчих розмірів довбача.

Розрахунку довбача передуює розрахунок необхідних геометричних параметрів зубчатої передачі.

#### 3.2. Розрахунок параметрів евольвентної циліндричної передачі зовнішнього зачеплення

1. Вихідні дані: модуль нормальний  $m_n$ ; числа зубців шестерні і колеса  $z_1$ ,  $z_2$ ; коефіцієнти зміщення висхідного контуру  $X_1$ ,  $X_2$ ; параметри висхідного контуру; кут нахилу зубців  $\beta$ .

2. Ділильна міжосьова відстань

$$a = (z_1 + z_2)m_n / (2 \cos \beta).$$

3. Коефіцієнт зміщень

$$X_\Sigma = X_1 + X_2.$$

4. Кут профілю торцевий

$$\alpha_t = \arctg(\operatorname{tg}\alpha/\cos\beta).$$

5. Кут зачеплення передачі

$$\operatorname{inv}\alpha_{\omega} = \operatorname{inv}\alpha_t + 2X_{\Sigma}\operatorname{tg}\alpha/(z_1 + z_2).$$

6. Початкова міжосьова відстань

$$a_{\omega} = a\cos\alpha_t/\cos\alpha_{\omega}.$$

7. Ділильний діаметр:  
шестерні

$$d_1 = m_n z_1 / \cos\beta;$$

колеса

$$d_2 = m_n z_2 / \cos\beta.$$

8. Передатне число

$$u = z_2 / z_1.$$

9. Початковий діаметр:  
шестерні

$$d_{\omega 1} = 2a_{\omega} / (u + 1);$$

колеса

$$d_{\omega 2} = d_{\omega 1} u.$$

10. Коефіцієнт зрівнюючого зміщення

$$\Delta y = X_{\Sigma} - [(a_{\omega} - a) / m_n].$$

11. Діаметр вершин:  
шестерні

$$d_{a1} = d_1 + 2m_n(h_a^* + X_1 + \Delta y);$$

колеса

$$d_{a2} = d_2 + 2m_n(h_a^* + X_2 - \Delta y).$$

12. Діаметр впадин:  
шестерні

$$d_{f1} = d_1 - 2m_n(h_a^* + c^* - X_1);$$

колеса

$$d_{f2} = d_2 - 2m_n(h_a^* + c^* - X_2).$$

13. Висота зуба:  
шестерні

$$h_1 = (d_{a1} - d_{f1})/2;$$

колеса

$$h_2 = (d_{a2} - d_{f2})/2.$$

14. Основний діаметр:  
шестерні

$$d_{b1} = d_1 \cos \alpha_t;$$

колеса

$$d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t.$$

15. Кут профілю на колі вершин:  
шестерні

$$\alpha_{a1} = \arccos(d_{b1}/d_{a1});$$

колеса

$$\alpha_{a2} = \arccos(d_{b2}/d_{a2}).$$

16. Радіус кривини активного профілю в нижній точці:  
шестерні

$$\rho_{p1} = a_{\omega} \sin \alpha_{\omega} - 0.5 \cdot d_{b1} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{a1};$$

колеса

$$\rho_{p2} = a_{\omega} \sin \alpha_{\omega} - 0.5 \cdot d_{b2} \cdot \operatorname{tg} \alpha_{a2}.$$

17. Радіальний зазор в передачі

$$c_{12} = 0.5[2a_{\omega} - d_{a1} - d_{f2}].$$

### 3.3. Розрахунок параметрів довбача в висхідному перетині

1. Число зубців довбача:

$$z_0 = d_{ном} \cos \beta / m_n,$$

де  $d_{ном}$  – номінальний діаметр довбача, залежить від конструктивного виконання довбача та його модуля.

2. Ділильний діаметр довбача:

$$d_0 = m_n z_0 / \cos \beta.$$

3. Торцевий кут профілю на ділильному діаметрі:

$$\alpha_{t0} = \arctg(\operatorname{tg} \alpha / \cos \beta).$$

4. Основний діаметр довбача:

$$d_{b0} = d_0 \cos \alpha_{t0}.$$

### 3.4. Розрахунок параметрів нового довбача

5. Товщина зуба на вершині нового довбача, що допускається міцністю ріжучої крайки:

$$\text{при } d_0 < 50 \text{ мм: } S_{ta0n} = \sqrt{0.138m_n - 0.013};$$

$$\text{при } 50 \leq d_0 \leq 160 \text{ мм: } S_{ta0n} = \sqrt{0.2594m_n - 0.0375};$$

$$\text{при } d_0 > 160 \text{ мм: } S_{ta0n} = \sqrt{0.81m_n - 0.72}.$$

6. Кут профілю на поверхні вершин (перше наближення):

$$\operatorname{inv} \alpha_{ta0n} = \frac{\pi}{2z_0} + \operatorname{inv} \alpha_{t0}.$$

7. Діаметр поверхні вершин (перше наближення):

$$d_{a0n} = d_{b0} / \cos \alpha_{ta0n}.$$

8. Коефіцієнт зміщення нового довбача (перше наближення):

$$X_{0n} = z_0 S_{ta0n} / 2_{a0n} \operatorname{tg} \alpha_{ta0n}.$$

9. Кут зачеплення нового довбача з колесом:

$$\operatorname{inv} \alpha_{i0n} = \operatorname{inv} \alpha_i + 2(X_1 + X_{0n}) \operatorname{tg} \alpha / (z_1 + z_0).$$

10. Верстатна міжосьова відстань:

$$a_{w01H} = (d_{b1} + d_{b0}) / 2 \cos \alpha_{tw01H}.$$

11. Діаметр поверхні вершин нового довбача, що відповідає прийнятому значенню  $X_{0H}$ :

$$d_{a0H} = d_0 + 2m_n (h_a^* + X_{0H} + c^*).$$

12. Радіус кривини профілю на поверхні вершин довбача:

$$\rho_{a0H} = 0.5 \sqrt{d_{a0H}^2 - d_{b0}^2}.$$

13. Радіус кривини в граничній точці профілю колеса:

$$\rho_{l1} = a_{w01H} \sin \alpha_{tw01H} - \rho_{a0H}.$$

14. Перевірка. Для колеса із зовнішніми зубцями повинна виконуватися умова:

$$0 < \rho_{l1} < \rho_{p1}.$$

Якщо  $\rho_{l1} \leq 0$ , то необхідно зменшити  $X_{0H}$ , якщо  $\rho_{l1} \geq \rho_{p1}$ ,  $X_{0H}$  необхідно збільшити і повторити розрахунок, починаючи з п. 9. Якщо умова виконується, то знайдені значення  $X_{0H}$ ,  $d_{a0H}$ ,  $\alpha_{tw01H}$  задовольняють умову правильного нарізання зубців колеса.

### 3.5. Розрахунок параметрів сточеного довбача

15. Кут зачеплення сточеного довбача з колесом:

$$\alpha_{tw01c} = \arctg(2(\rho_{a1} + \rho_{p0}) / (d_{b1} + d_{b0})),$$

де  $\rho_{a1} = 0.5 \cdot d_{b1} \cdot \tg \alpha_{a1}$ ,

$$\rho_{p0} = 1 \text{ мм при } d_0 < 50 \text{ мм,}$$

$$\rho_{p0} = 2 \dots 3 \text{ мм при } 50 \leq d_0 \leq 100 \text{ мм,}$$

$$\rho_{p0} = 4 \dots 5 \text{ мм при } d_0 > 100 \text{ мм.}$$

16. Коефіцієнт зміщення сточеного довбача:

$$X_{0c} = \frac{(\operatorname{inv}\alpha_{\alpha_0 1c} - \operatorname{inv}\alpha_{\alpha_0}) (z_1 + z_0)}{2 \operatorname{tg}\alpha} - X_1.$$

17. Діаметр поверхні вершин сточеного довбача:

$$d_{a0c} = d_0 + 2m_n (h_a^* + X_{0c} + c^*).$$

Подальші розрахунки по п. 18-21 виконувати, якщо у нарізованого колеса із зовнішніми зубцями  $d_{f1} < d_{b1}$ .

18. Міжосьова верстатна відстань:

$$a_{w01c} = (d_{b1} + d_{b0}) / 2 \cos \alpha_{\alpha_0 1c}.$$

19. Радіус кривини профілю на поверхні вершин довбача:

$$\rho_{a0c} = 0.5 \sqrt{d_{a0c}^2 - d_{b0}^2}.$$

20. Радіус кривини в граничній точці профілю колеса:

$$\rho_{l1} = a_{w01c} \sin \alpha_{\alpha_0 1c} - \rho_{a0c}.$$

21. Якість нарізання перевіряють аналогічно п. 14.

3.5. Розрахунок і призначення параметрів ріжучої частини і виконавчих розмірів довбача

22. Кут нахилу гвинтової задньої поверхні довбача на основному циліндрі

$$\varepsilon = 2.5 \dots 3^\circ.$$

23. Гвинтовий параметр задньої поверхні

$$p = d_{b0} / \operatorname{tg}\varepsilon.$$

24. Висхідні відстані (можливі) довбача нового і сточеного:

$$a_{n\max} = 2pX_{0n} \operatorname{tg}\alpha / z_0,$$

$$a_{c\max} = 2pX_{0c} \operatorname{tg}\alpha / z_0.$$

25. Можлива висота сточування довбача:

$$H_{\max} = 2p(X_{0n} - X_{0c})\operatorname{tg}\alpha/z_0,$$

Висота сточування не повинна перевищувати висоту  $B_p$ , обмежену технологічними умовами виготовлення довбача. В протилежному випадку зменшуються величини  $a_n$  і  $a_c$ .

26. Коефіцієнти зміщення, відповідні прийнятим значенням  $a_n$  і  $a_c$ :

$$X_{0n} = a_n z_0 / 2 p \operatorname{tg}\alpha;$$

$$X_{0c} = a_c z_0 / 2 p \operatorname{tg}\alpha.$$

27. Діаметр поверхні вершин нового (проставляється на кресленні) і сточеного довбачів:

$$d_{a0n} = d_0 + 2m_n(h_a^* + X_{0n} + c^*),$$

$$d_{a0c} = d_0 + 2m_n(h_a^* + X_{0c} + c^*).$$

28. Задній кут на вершинній ріжучій крайці:

$$\delta_a = \operatorname{arctg}((d_{a0n} - d_{a0c})/2H).$$

29. Передній кут  $\gamma = 5^\circ$  для чистових довбачів і  $9 \dots 11^\circ$  - для чорнових.

30. Ділильна товщина зубця нового довбача:

$$S_{i0n} = (d_0(0.5\pi + 2X_{0n}\operatorname{tg}\alpha)/z_0) + \Delta S,$$

де  $\Delta S = -1.2\sqrt[3]{m_n}\operatorname{tg}\alpha$  - для чорнових довбачів,

$$\Delta S = 2E_{HS}\operatorname{tg}\alpha,$$

де  $E_{HS}$  вибирається з довідникових таблиць.

31. Висота ділильної головки зубця нового довбача:

$$h_{a0} = 0.5(d_{a0n} - d_0).$$

32. Ширина вінця довбача

$$b_0 = H + b,$$

де  $b = 3 \dots 7,5$  мм в залежності від модуля.

33. Висота довбача дискового:

$$B_0 = b_0 + (3...5) \text{ мм},$$

а для чашкових та хвостових довбачів їх розміри вздовж осі визначаються відповідно ГОСТ 9329-79 і ГОСТ 10059-80Е.

34. Висота зуба нового довбача:

$$h_0 = 2m_n(h_a^* + c^*).$$

35. Боковий задній кут на ділильному циліндрі:

$$\delta_{бок} = \arctg(d_0 \text{tg}\varepsilon / d_{b0}).$$

36. Задній кут на ділильному циліндрі в нормальній перетині бічного леза:

$$\delta_n = \arctg(\text{tg}\delta_{бок} \cos\alpha_{t0}).$$

37. Кут профілю довбача, скоригований для зменшення викривлень профілю:

$$\alpha_{ок} = \arctg(\text{tg}\alpha / (1 - \text{tg}\gamma \text{tg}\delta_a)).$$

38. Діаметр основного циліндру довбача при шліфуванні профілю:

$$d_{b0} = d_0 \cos\alpha_{ок}.$$

Інші розміри та вимоги до параметрів якості призначають за ГОСТ 9329-79 та ГОСТ 10059-80.

## 4. РОЗРАХУНОК ТА КОНСТРУЮВАННЯ МОДУЛЬНОЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ

### 4.1. Загальні відомості до розрахунку черв'ячної фрези

В цьому розділі проводимо розрахунок та конструювання модульної черв'ячної фрези для обробки зубчатого колеса.

Розрахунки проводимо за допомогою програми [див. додаток В].

Вихідні дані для розрахунку черв'ячної фрези: геометричні параметри оброблюваного колеса; вимоги до точності і якості обробки зубчатого вінця; призначення фрези.

Розрахунок фрези складається з трьох етапів:

I. Розрахунок параметрів висхідного виробного черв'яка фрези.

II. Розрахунок параметрів ріжучої частини фрези.

III. Розрахунок параметрів ріжучої частини фрези.

Для чистових фрез, що оброблюють зубчатий вінець остаточно, виконуються I та II етапи розрахунку. Розрахунку фрези передують розрахунок необхідних геометричних параметрів зубчатої передачі.

### 4.2. Евольвентна циліндрична передача зовнішнього зачеплення

3. Вихідні дані: модуль нормальний  $m_n$ ; числа зубців шестерні і колеса  $z_1$ ,  $z_2$ ; коефіцієнти зміщення висхідного контуру  $X_1$ ,  $X_2$ ; параметри висхідного контуру; кут нахилу зубців  $\beta$ .

4. Ділильна міжосьова відстань

$$a = (z_1 + z_2)m_n / \cos\beta.$$

3. Коефіцієнт зміщень

$$X_\Sigma = X_1 + X_2.$$

4. Кут профілю торцевий

$$\alpha_t = \arctg(\operatorname{tg}\alpha/\cos\beta).$$

5. Кут зачеплення передачі

$$\operatorname{inv}\alpha_{\omega} = \operatorname{inv}\alpha_t + 2X_{\Sigma}\operatorname{tg}\alpha/(z_1 + z_2).$$

6. Початкова міжосьова відстань

$$a_{\omega} = a\cos\alpha_t/\cos\alpha_{\omega}.$$

7. Ділильний діаметр:

шестерні  $d_1 = m_n z_1 / \cos\beta;$

колеса  $d_2 = m_n z_2 / \cos\beta.$

8. Передатне число

$$u = z_2/z_1.$$

9. Початковий діаметр:

шестерні  $d_{\omega 1} = 2a_{\omega}/(u + 1);$

колеса  $d_{\omega 2} = d_{\omega 1} u.$

10. Коефіцієнт зрівнюючого зміщення

$$\Delta y = X_{\Sigma} - [(a_{\omega} - a)/m_n].$$

11. Діаметр вершин:

шестерні  $d_{a1} = d_1 + 2m_n(h_a^* + X_1 - \Delta y);$

колеса  $d_{a2} = d_2 + 2m_n(h_a^* + X_2 - \Delta y).$

12. Діаметр впадин:

шестерні  $d_{f1} = d_1 - 2m_n(h_a^* + c^* - X_1);$

колеса  $d_{f2} = d_2 - 2m_n(h_a^* + c^* - X_2).$

13. Висота зуба:

шестерні  $h_1 = (d_{a1} - d_{f1})/2;$

колеса  $h_2 = (d_{a2} - d_{f2})/2.$

14. Основний діаметр:

шестерні  $d_{b1} = d_1 \cos \alpha_t;$

колеса  $d_{b2} = d_2 \cos \alpha_t.$

15. Кут профілю на колі вершин:

шестерні  $\alpha_{a1} = \arccos(d_{b1}/d_{a1});$

колеса  $\alpha_{a2} = \arccos(d_{b2}/d_{a2}).$

16. Радіус кривини активного профілю в нижній точці:

шестерні  $\rho_{p1} = a_{\omega} \sin \alpha_{t\omega} - \rho_{f2};$

колеса  $\rho_{p2} = a_{\omega} \sin \alpha_{t\omega} - \rho_{f1}.$

17. Радіальний зазор в передачі

$$c_{12} = 0.5[2a_{\omega} - (d_{a1} - d_{f2})].$$

### 4.3. Розрахунок параметрів висхідного виробного черв'яка фрези

1. Нормальний кут профілю

$$\alpha_{n0} = \alpha.$$

2. Число витків виробного черв'яка:

чистові фрези  $z_0 = 1;$

чорнові фрези  $z_0 = 2...7;$

фрези під шевінгування  $z_0 = 1...3;$

причому у фрез з  $z_0 > 1$  число витків не повинне бути кратним числу зубців оброблюваного колеса.

3. Ділильний кут підйому витків  $\gamma_0$  виробного черв'яка (попередній) для одновиткових фрез ( $z_0 = 1$ ) вибирається з таблиць довідників.

Для багатовиткових фрез  $\gamma_0$  збільшується:

$$\text{при } z_0 = 2 \quad \gamma_0 = (1.8 \dots 2)\gamma'_0;$$

$$\text{при } z_0 > 2 \quad \gamma_0 = (z_0 - 1)\gamma'_0,$$

де  $\gamma'_0$  – ділильний кут підйому одновиткової фрези відповідного модуля.

4. Висота ділильної головки витка виробного черв'яка (зуба фрези)

$$h_{a0} = m_n (h_a^* + c^*).$$

5. Висота зуба виробного черв'яка (фрези)

$$h_0 = 2m_n (h_a^* + c^*).$$

6. Ділильний діаметр виробного черв'яка (фрези) розрахунковий

$$d_{0p} = m_n z_0 / \sin \gamma_0.$$

7. Діаметр поверхні вершин виробного черв'яка (фрези) розрахунковий

$$d_{a0p} = d_{0p} + 2h_{a0}.$$

Діаметр поверхні вершин  $d_{a0}$  округляють до значення, кратного 0,5 мм.

8. Уточнений ділильний діаметр виробного черв'яка (фрези)

$$d_0 = d_{a0} - 2h_{a0}.$$

9. Ділильний кут підйому витків уточнений

$$\gamma_0 = \arcsin(m_n z_0 / d_0).$$

10. Нормальний крок висхідного виробного черв'яка (фрези)

$$p_{n0} = \pi m_n.$$

11. Осьовий крок висхідного виробного черв'яка (фрези)

$$p_{x0} = p_{n0} / \cos \gamma_0.$$

12. Хід витків виробного черв'яка (фрези)

$$P_{\Sigma 0} = P_{x0} Z_0.$$

13. Ділильна товщина зуба виробного черв'яка (фрези) нормальна

$$s_{n0} = 0.5 p_{n0} + \Delta s,$$

де  $\Delta s$  – потовщення зуба.

Потовщення визначається в залежності від допустимого найменшого зміщення висхідного контуру

$$\Delta s = 2E_{H_s} \operatorname{tg} \alpha.$$

Значення  $E_{H_s}$  вибирається по ГОСТ 1643-81.

14. Осьова ділильна товщина зуба

$$s_{x0} = s_{n0} / \cos \gamma_0.$$

#### 4.4. Розрахунок параметрів ріжучої частини фрези

15. Число зубців фрези

$$z = b\pi/\varphi,$$

де  $\varphi = \arccos[(d_{a0} - 2h_1)/d_{a0}]$ .

Для чистових суцільних фрез коефіцієнт  $b = 2,4 \dots 2,6$ .

16. Задній кут на вершині зуба

$$\alpha_e = 9 \dots 12^\circ.$$

17. Величина затилування:

першого  $K_1 = \pi d_{a0} \operatorname{tg} \alpha_e / z;$

другого (для інструментів із шліфованим профілем)

$$K_2 = 1.5K_1.$$

Значення  $K_1$  і  $K_2$  округляють до кратних 0,5 мм при  $K < 5$  мм і до цілих при  $K \geq 5$  мм.

18. Розрахунковий діаметр початковий гвинтових стружкових канавок

$$d_{pac} = d_{a0} - 2h_{a0} - 2\sigma K_1,$$

де  $\sigma = 0,1 \dots 0,15$  – для чистових фрез,  $\sigma = 0,25$  – для чорнових.

19. Кут нахилу гвинтової стружкової канавки

$$\omega = \arctg(m_n z_0 / d_{pac} \cos \gamma_0).$$

20. Крок стружкових канавок

$$T = p_{z0} / \text{tg}^2 \omega.$$

Напрямок стружкових канавок зворотній до напрямку витків висхідного виробного черв'яка.

21. Осьовий кут профілю:

для фрез з осьовими канавками

$$\alpha_{x0} = \arctg(\text{tg} \alpha_{n0} / \cos \gamma_0);$$

для фрез з гвинтовими канавками

$$\alpha_{x0L(R)} = \arctg[\text{ctg} \alpha_{x0} \pm (K_1 z / T)].$$

В останній формулі верхній знак відноситься до лівої ( $L$ ), нижній – до правої ( $R$ ) сторін профілю фрези з правим напрямком витків. Для фрез з лівим напрямком витків знаки слід поміняти місцями.

22. Радіус заокруглення вершини зуба фрези

$$\rho_{x0} = c_{12} / (1 - \sin \alpha_{n0}).$$

23. Радіус заокруглення профілю ніжки зуба фрези

$$\rho_{f0} = 0.3 m_n.$$

24. Глибина стружкової канавки

$$H = h_0 + r + 0.5(K_1 + K_2),$$

де  $r$  – радіус заокруглення впадини зуба,  $r = 2 \dots 5$  мм.

25. Діаметр посадочного отвору фрези

$$d_{ome} = d_{a0} - 2H - 2t,$$

де  $t$  – товщина тіла фрези,  $t = 2.5m_n$  для фрез з торцевим шпонковим пазом,  $t = (3...4)m_n$  – для фрез з осьовим шпонковим пазом. Діаметр отвору під оправку приймається із стандартного ряду.

26. Діаметр буртиків фрези

$$D_6 = d_{a0} - 2H - (2...5)$$

(округляється до значення, кратного 0,5 мм).

27. Довжина нарізаної частини фрези

$$l = \frac{h_1/2\operatorname{tg}\alpha_0 + \sqrt{(d_{a1} - h_1)h_1}}{\cos(\beta - \gamma_0)} + (n + 2)\rho_{x0},$$

де  $n$  – число перестановок фрези,  $n = 6...8$  – для  $m < 3$  мм;  $n = 4...6$  – для  $m = 3...6$  мм;  $n = 2...4$  – для  $m > 6$  мм.

28. Передній кут  $\gamma = 0$ .

29. Кут стружкової канавки  $\Theta$  призначають із стандартного ряду, причому чим більший об'єм зрізуваної стружки, тим більший кут  $\Theta$ .

## ВИСНОВКИ

Аналіз технологічності деталі типу циліндричне зубчасте колесо зовнішнього круглого зачеплення показав, що така деталь є плоским тілом у формі колеса з замкнутою системою зубів по зовнішній циліндричній поверхні. Зубчасте колесо складається з наступних основних конструктивних елементів корпусу, зубчастого вінця та посадкового центрального отвору, який, як правило виступає у якості базового.

Тож вирішення виробничого завдання виготовлення зубчастого колеса полягає саме у виборі способів обробки двох основних елементів це посадковий центрувальний отвір та зубчастий вінець

На вибір бази зубчастого колеса впливає характер посадкового центрального отвору – гладкий циліндричний отвір або шліцьовий.

Якщо зубчасті колеса мають гладкий циліндричний посадковий центральний отвір, то при базуванні, заготовку встановлюють на точну оправку. Якщо ж зубчасті колеса мають в посадковому центральному отворі шліці прямокутного профілю, центрування здійснюється за найбільшим або найменшим діаметром шліцьового з'єднання або по бічних поверхнях.

За експлуатаційними властивостями переважають шліцьові центральні отвори переважають. Для обробки шліцьових отворів призначені шліцьові протяжки.

Розрахована та спроектована у роботі конструкція шліцьової протяжки дозволить виконувати шліцьові центрувальні отвори у зубчастих колесах в процесі виготовлення.

Другим важливим конструктивним елементом зубчатого колеса є зубчатий вінець. Для нарізування зубів на зубчастих колесах існує цілий ряд інструментів, але перевагу віддають інструментам, що працюють за методом обкатування імітуючи зубчасті зачеплення це довбач, що імітує циліндричне зубчасте зачеплення колесо – колесо та черв'ячна модульна фреза, що імітує черв'ячне зачеплення черв'як – зубчасте колесо.

Розраховані та спроектовані у роботі конструкції модульного дискового довбача та модульної черв'ячної фрези забезпечать нарізання зубів зубчатих коліс евольвентного профілю.

Таким чином, спроектоване інструментальне забезпечення, а саме пліщова протяжка для обробки посадкового центрального отвору та довбач і черв'ячна фреза для обробки зубчастого вінця методом обкатування дозволить виконати виробничу задачу виготовлення зубчатого колеса необхідної якості профілю та порівняно високою продуктивністю.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбацевич, А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения / А.Ф. Горбацевич, В.А. Шкред. – М.: Высшая школа, 1983. – 256 с.
2. Зубовецька Н. Т. Проектування та технологія виготовлення металорізальних інструментів [Електронний ресурс] : Посібник / Н. Т. Зубовецька.– Луцьк, 2018 р.
3. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов: Учебное пособие для вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты».– М.: "Машиностроение", 1984.– 272 с.
4. Инструменты из сверхтвердых материалов. Под ред. Новикова Н.В. Киев, 2001.– 258 с.
5. Кирсанов Г.Н. Руководство по курсовому проектированию металлорежущих инструментов / Г.Н. Кирсанов и др. – М.: Машиностроение, 1986.– 288 с.
6. Металлорежущие инструменты: Учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты» / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др.– М.: "Машиностроение", 1989.– 328 с.
7. Металорізальні інструменти: навчальний посібник / С. В. Швець. – Суми: Сумський державний університет, 2019. – 272 с.
8. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ : Учеб.пособие для вузов / О.В.Таратынов, Г.Г.Земсков, Ю.П.Тарамыкин и др.; Под ред. О.В.Таратынова, Ю.П.Тарамыкина. – М.: Высш.шк., 1991.– 423 с.
9. Протяжки для обработки отверстий / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин и др.– М.: "Машиностроение", 1986.– 232 с.
10. Расчет зуборезных долбяков для эвольвентных колес: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию / Сост. В.С. Надеин, В.Н. Бабич, А.Г. Красовская.. – Кировоград: КИСМ, 1989. – 24 с.

11. Расчет червячных фрез для эвольвентных колес: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию / Сост. В.С. Надеин, В.Н. Бабич. – Кировоград: КИСМ, 1989. – 23 с.

12. Різальний інструмент [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Л.М. Данилова, С.В. Лапковський, В.П. Приходько –Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 147 с.

13. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты. – К.: Вища школа, 1986. – 656 с.

14. Родін П.Р., Бугай Ю.М., Равська Н.С. Солодкий В.І. Металорізальні інструмента, Частина 2. – Київ, 1993.– 178 с.

15. Родін П.Р., Бугай Ю.М., Равська Н.С. Солодкий В.І.. Металорізальні інструмента, Частина 1.– Київ,1992. – 226 с.

16. Справочник технолога – машиностроителя: В 2 т. / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М: Машиностроение, 1985. – Т.1 – 496 с.; Т.2 – 496 с.

17. Справочник технолога-машиностроителя. В 2. Том 2. Под ред. д-ра техн. наук проф. А.Н. Малова. – М.: Машиностроение, 1972. – 568 с.

18. Технологія оброблення зубчастих коліс : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», галузі знань 13 «Механічна інженерія» / Ю.Є. Паливода, Ю.Б. Капаціла, І.Г. Ткаченко. –Тернопіль : ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2016. – 136 с.

19. Филиппов, Г.В. Режущий инструмент / Г.В. Филиппов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд.-е, 1981. – 392 с.

20. Фрумин, Ю.А. Комплексное проектирование инструментальной оснастки / Ю.А. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1987. – 344 с.

# ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

### Розрахунок внутрішньої протяжки для обробки шліцевого отвору за допомогою спеціалізованого математичного пакету MathCAD

Вихідні дані:

Діаметр отвору до протягування	$D_o := 18$	$D_{\text{омак}} := D_o + 0.52$
Зовнішній діаметр шліцевого отвору	$D := 25$	$D_{\text{мак}} := D + 0.021$
Внутрішній діаметр шліцевого отвору	$d := 21$	$d_{\text{мак}} := d + 0.13$
Ширина шліцевого пазу	$b := 5.03$	$b_{\text{мак}} := b + 0.03$
Число шліців	$Z := 6$	
Ширина фаски на шліцах	$f := 0.3$	
Довжина отвору	$l := 60$	
Тягова сила верстата	$Q := 9.8 \cdot 40000$	
Мінімальна довжина з'єднувальної частини протяжки		$l_{\text{зв}} := 210$
Найбільший хід каретки чи повзуна		$l_{\text{хід}} := 1600$
Діаметр хвостовика		
$d_{\text{хв}} := D_o - 0.5$	$d_{\text{хв}} = 17.5$	
Приймаємо	$d_{\text{мак}} := 18$	$F_{\text{хв}} := 132.7$
Параметри чистової частини		
Число зубців	$z_{\text{чкр}} := 6$	$z_{\text{чшт}} := 6$
Припуск	$A_{\text{чкр}} := 0.1$	$A_{\text{чшт}} := 0.08$
Число секцій	$i_{\text{чкр}} := 3$	$i_{\text{чшт}} := 3$
Подача	$s_{\text{чкр}_1} := 0.02$	$s_{\text{чшт}_1} := 0.02$
	$s_{\text{чкр}_2} := 0.02$	$s_{\text{чшт}_2} := 0.01$
	$s_{\text{чкр}_3} := 0.01$	$s_{\text{чшт}_3} := 0.01$
Подача чорнової частини	$s_o := 0.21$	
Глибина стружкової канавки		
$K_{\text{шт}} := 3$		
з умови розміщення стружки	$h := 1.13 \cdot \sqrt{1 \cdot s_o \cdot K}$	$h = 6.947$
з умови жорсткості	$h_{\text{мак}} := 0.3 \cdot D_o$	$h_{\text{мак}} = 5.4$
Приймаємо	$h_{\text{шт}} := 5.0$	
Перевіримо і коригуємо подачу чорнової частини		
$s_{\text{омак}} := \text{round}\left(\frac{\pi \cdot h^2}{4 \cdot 1 \cdot K}, 2\right)$	$s_{\text{омак}} = 0.11$	
$s_{\text{шт}} := \min(s_o, s_{\text{омак}})$	$s_o = 0.11$	
Крок чорнових зубців		
$t_o := 12$		
Число одночасно працюючих зубців		
$z_p := \frac{1}{t_o - 0.4}$	$z_p = 5.172$	
$z_{\text{шт}} := \text{round}(z_p, 0)$	$z_p = 5$	
Робоча сила верстата		
$P_{\text{ст}} := 0.9 \cdot Q$	$P_{\text{ст}} = 352800$	

Сила, що допускається міцністю хвостовика

$$\sigma_{\text{хв}} := 300$$

$$P_{\text{хв}} := F_{\text{хв}} \cdot \sigma_{\text{хв}} \quad P_{\text{хв}} = 39810$$

Сила, що допускається небезпечним перерізом протяжки

$$\sigma_{\text{пр}} := 400$$

$$P_{\text{пр}} := \text{round}\left[\frac{\pi \cdot (D_o - h)^2}{4} \cdot \sigma_{\text{пр}}, 0\right] \quad P_{\text{пр}} = 53093$$

Сила різання

$$P_{\text{max}} := \min(P_{\text{ст}}, P_{\text{хв}}, P_{\text{пр}}) \quad P_{\text{max}} = 39810$$

Периметр різку

$$\begin{aligned} b_{\Phi} &:= b + 2 \cdot f & b_{\Phi} &= 5.63 & p_{\Phi} &:= Z \cdot b_{\Phi} & p_{\Phi} &= 33.78 \\ b_{\text{кр}} &:= \frac{\pi \cdot d}{Z} - (b + 2 \cdot f) & b_{\text{кр}} &= 5.366 & p_{\text{кр}} &:= Z \cdot b_{\text{кр}} & p_{\text{кр}} &= 32.193 \\ b_{\text{ш}} &:= b_{\text{max}} & b_{\text{ш}} &= 5.06 & p_{\text{ш}} &:= Z \cdot b_{\text{ш}} & p_{\text{ш}} &= 30.36 \end{aligned}$$

Коефіцієнти, що враховують змінені умови роботи

$$\begin{aligned} &\text{в залежності від оброблюваного матеріалу} & K_{\text{рм}} &:= 1 \\ &\text{в залежності від виду ЗОР} & K_{\text{ро}} &:= 1 \\ &\text{в залежності від способу розділення стружки} & K_{\text{рр}} &:= 1 \\ &\text{в залежності від якості оброблюваної поверхні} & K_{\text{рк}} &:= 1 \end{aligned}$$

Питома осьова сила різання

$$q_o := 258$$

Число зубців в секції

$$\begin{aligned} z_{\text{сф}o} &:= \frac{p_{\Phi} \cdot q_o \cdot z_p \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}}{P_{\text{max}}} & z_{\text{сф}o} &= 1.095 \\ z_{\text{скр}o} &:= \frac{p_{\text{кр}} \cdot q_o \cdot z_p \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}}{P_{\text{max}}} & z_{\text{скр}o} &= 1.043 \\ z_{\text{сш}o} &:= \frac{p_{\text{ш}} \cdot q_o \cdot z_p \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}}{P_{\text{max}}} & z_{\text{сш}o} &= 0.984 \end{aligned}$$

Приймаємо

$$\begin{aligned} z_{\text{сф}1} &:= \text{if}(z_{\text{сф}o} < 1, 1, \text{floor}(z_{\text{сф}o})) & z_{\text{сф}2} &:= z_{\text{сф}1} & z_{\text{сф}3} &:= \text{ceil}(z_{\text{сф}o}) \\ z_{\text{скр}1} &:= \text{if}(z_{\text{скр}o} < 2, 2, \text{floor}(z_{\text{скр}o})) & z_{\text{скр}2} &:= z_{\text{скр}1} & z_{\text{скр}3} &:= \text{ceil}(z_{\text{скр}o}) \\ z_{\text{сш}1} &:= \text{if}(z_{\text{сш}o} < 1, 1, \text{floor}(z_{\text{сш}o})) & z_{\text{сш}2} &:= z_{\text{сш}1} & z_{\text{сш}3} &:= \text{ceil}(z_{\text{сш}o}) \end{aligned}$$

$$q_{o\Phi} := \frac{P_{\text{max}} \cdot z_{\text{сф}1}}{p_{\Phi} \cdot z_p \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}} \quad q_{o\Phi} = 235.702 \quad \text{Приймаємо} \quad s_{o\Phi1} := 0.1$$

$$q_{o\text{кр}} := \frac{P_{\text{max}} \cdot z_{\text{скр}1}}{p_{\text{кр}} \cdot z_p \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}} \quad q_{o\text{кр}} = 494.635 \quad \text{Приймаємо} \quad s_{o\text{кр}1} := 0.22$$

$$q_{o\text{ш}} := \frac{P_{\text{max}} \cdot z_{\text{сш}1}}{p_{\text{ш}} \cdot z_p \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}} \quad q_{o\text{ш}} = 262.253 \quad \text{Приймаємо} \quad s_{o\text{ш}1} := 0.11$$

$$s_{o\Phi2} := s_o \quad s_{o\text{кр}2} := s_o \quad s_{o\text{ш}2} := s_o$$

$$s_{o\Phi3} := s_o \quad s_{o\text{кр}3} := s_o \quad s_{o\text{ш}3} := s_o$$

$$z_{\text{рф}} := \frac{P_{\text{max}} \cdot z_{\text{ф}_2}}{P_{\text{ф}} \cdot d_0 \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}} \quad z_{\text{рф}_k} := \text{floor}(z_{\text{рф}})$$

$$t_{\text{оф}_2} := \text{ceil}\left(\frac{1}{z_{\text{рф}}} + 0.4\right) \quad t_{\text{оф}_2} = 16$$

$$z_{\text{ркр}} := \frac{P_{\text{max}} \cdot z_{\text{кр}_2}}{P_{\text{кр}} \cdot d_0 \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}} \quad z_{\text{ркр}_k} := \text{floor}(z_{\text{ркр}})$$

$$t_{\text{окр}_2} := \text{if}\left(z_{\text{кр}_2} \leq 2, t_0, \text{ceil}\left(\frac{1}{z_{\text{ркр}}} + 0.4\right)\right) \quad t_{\text{окр}_2} = 12$$

$$z_{\text{рш}} := \frac{P_{\text{max}} \cdot z_{\text{ш}_2}}{P_{\text{ш}} \cdot d_0 \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}} \quad z_{\text{рш}_k} := \text{floor}(z_{\text{рш}})$$

$$t_{\text{ош}_2} := \text{ceil}\left(\frac{1}{z_{\text{рш}}} + 0.4\right) \quad t_{\text{ош}_2} = 13$$

$$t_{\text{оф}_1} := t_0 \quad t_{\text{окр}_1} := t_0 \quad t_{\text{ош}_1} := t_0$$

$$t_{\text{оф}_3} := t_0 \quad t_{\text{окр}_3} := t_0 \quad t_{\text{ош}_3} := t_0$$

Кількість варіантів розрахунку

 $k := 1..3$ 

Параметри перехідної частини

Число зубців	$z_{\text{ткр}} := 4$	$z_{\text{тш}} := 4$
Припуск	$A_{\text{ткр}} := 0.24$	$A_{\text{тш}} := 0.24$
Число секцій	$i_{\text{ткр}} := 2$	$i_{\text{тш}} := 2$
Подача	$s_{\text{ткр}_1} := 0.08$ $s_{\text{ткр}_2} := 0.04$	$s_{\text{тш}_1} := 0.08$ $s_{\text{тш}_2} := 0.04$

Діаметр останнього фасочного зуба

$$\lambda := \text{asin}\left(\frac{b_{\text{max}} + 2 \cdot f}{d}\right) \quad \lambda_E := \text{acot}\left[\frac{(b_{\text{max}} + 2 \cdot f) \cdot \cot(\lambda) + 2 \cdot f \cdot \cot\left(\frac{\pi}{4}\right)}{b_{\text{max}}}\right] \quad D_E := \frac{b_{\text{max}}}{\sin(\lambda_E)}$$

$$D_{\text{ф}} := D_E + 0.4 \quad D_{\text{ф}} = 21.829$$

Припуск на фасочну частину

$$A_{\text{ф}} := D_{\text{ф}} - d_{\text{max}} + A_{\text{ткр}} \quad A_{\text{ф}} = 0.799$$

Припуск на круглу частину

$$A_{\text{кр}} := d_{\text{max}} - D_0 \quad A_{\text{кр}} = 3.13$$

Діаметр першого шпівового зуба

$$D_{\text{ш}_1} := D_{\text{ф}} - 0.1 \quad D_{\text{ш}_1} = 21.729$$

Припуск на шпівову частину

$$A_{\text{ш}} := D_{\text{max}} - D_{\text{ш}_1} \quad A_{\text{ш}} = 3.292$$

Припуск на чорнові зубці

$$A_{\text{окр}} := A_{\text{кр}} - A_{\text{ткр}} - A_{\text{фр}} \quad A_{\text{окр}} = 2.79$$

$$A_{\text{ош}} := A_{\text{ш}} - A_{\text{тш}} - A_{\text{фр}} \quad A_{\text{ош}} = 2.972$$

Число секцій чорнових зубців

$$i_{\text{ф}_k} := \text{floor}\left(\frac{A_{\text{ф}}}{2 \cdot s_{\text{оф}_k}}\right) \quad i_{\text{ф}} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$i_{\text{окр}_k} := \text{floor}\left(\frac{A_{\text{окр}}}{2 \cdot s_{\text{окр}_k}}\right) \quad i_{\text{окр}} = \begin{pmatrix} 6 \\ 12 \\ 12 \end{pmatrix}$$

$$i_{\text{ощ}_k} := \text{floor}\left(\frac{A_{\text{ощ}}}{2 \cdot s_{\text{ощ}_k}}\right) \quad i_{\text{ощ}} = \begin{pmatrix} 13 \\ 13 \\ 13 \end{pmatrix}$$

Остаточный припуск

$$A_{\text{остф}_k} := A_{\text{ф}} - 2 \cdot s_{\text{остф}_k} \cdot i_{\text{ф}_k} \quad A_{\text{остф}} = \begin{pmatrix} 0.199 \\ 0.139 \\ 0.139 \end{pmatrix}$$

$$A_{\text{осткр}_k} := A_{\text{окр}} - 2 \cdot i_{\text{окр}_k} \cdot s_{\text{окр}_k} \quad A_{\text{осткр}} = \begin{pmatrix} 0.15 \\ 0.15 \\ 0.15 \end{pmatrix}$$

$$A_{\text{остш}_k} := A_{\text{ощ}} - 2 \cdot i_{\text{ощ}_k} \cdot s_{\text{ощ}_k} \quad A_{\text{остш}} = \begin{pmatrix} 0.1122 \\ 0.1122 \\ 0.1122 \end{pmatrix}$$

Розподіл остаточного припуска

$$A_{\text{кр}_k} := A_{\text{осткр}_k}$$

$$i_{\text{окр}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{кр}_k} > s_{\text{ткр}_1}, i_{\text{окр}_k} + 1, i_{\text{окр}_k}) \quad i_{\text{окр}} = \begin{pmatrix} 6 \\ 12 \\ 12 \end{pmatrix}$$

$$i_{\text{ткр}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{кр}_k} > s_{\text{ткр}_1}, i_{\text{ткр}}, \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{кр}_k} > s_{\text{окр}_1}, i_{\text{ткр}} + 1, i_{\text{ткр}})) \quad i_{\text{ткр}} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$i_{\text{окр}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{кр}_k} \leq s_{\text{окр}_1}, i_{\text{окр}} + 1, i_{\text{окр}}) \quad i_{\text{окр}} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{чокр}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{кр}_k} > s_{\text{ткр}_1}, 0.5 \cdot A_{\text{кр}_k}, s_{\text{окр}_1}) \quad s_{\text{чокр}} = \begin{pmatrix} 0.22 \\ 0.22 \\ 0.22 \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{чткр}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{кр}_k} \leq s_{\text{чкр}_1}, 0.5 \cdot A_{\text{кр}_k}, s_{\text{чкр}_1}) \quad s_{\text{чткр}} = \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.02 \\ 0.02 \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{ткр}_k} := \text{if}(s_{\text{чокр}_k} \neq s_{\text{окр}_1}, s_{\text{ткр}_1}, \text{if}(s_{\text{чткр}_k} \neq s_{\text{чкр}_1}, s_{\text{окр}_1}, 0.5 \cdot A_{\text{кр}_k})) \quad s_{\text{ткр}} = \begin{pmatrix} 0.075 \\ 0.075 \\ 0.075 \end{pmatrix}$$

$$A_{\text{ш}_k} := A_{\text{остш}_k}$$

$$i_{\text{ощ}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{ш}_k} > s_{\text{тш}_1}, i_{\text{ощ}_k} + 1, i_{\text{ощ}_k}) \quad i_{\text{ощ}} = \begin{pmatrix} 13 \\ 13 \\ 13 \end{pmatrix}$$

$$i_{\text{тш}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{ш}_k} > s_{\text{тш}_1}, i_{\text{тш}}, \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{ш}_k} > s_{\text{ощ}_1}, i_{\text{тш}} + 1, i_{\text{тш}})) \quad i_{\text{тш}} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$i_{\text{шш}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{шш}_k} \leq s_{\text{шш}_1}, i_{\text{шш}} + 1, i_{\text{шш}}) \quad i_{\text{шш}} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{шорш}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{шш}_k} > s_{\text{шш}_1}, 0.5 \cdot A_{\text{шш}_k}, s_{\text{шш}_1}) \quad s_{\text{шорш}} = \begin{pmatrix} 0.11 \\ 0.11 \\ 0.11 \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{шшш}_k} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{шш}_k} \leq s_{\text{шш}_1}, 0.5 \cdot A_{\text{шш}_k}, s_{\text{шш}_1}) \quad s_{\text{шшш}} = \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.02 \\ 0.02 \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{шпшш}_k} := \text{if}(s_{\text{шорш}_k} \neq s_{\text{шш}_1}, s_{\text{шш}_1}, \text{if}(s_{\text{шшш}_k} \neq s_{\text{шш}_1}, s_{\text{шш}_1}, 0.5 \cdot A_{\text{шш}_k})) \quad s_{\text{шпшш}} = \begin{pmatrix} 0.056 \\ 0.056 \\ 0.056 \end{pmatrix}$$

Число камбруючих зубців

$$z_{\text{шшр}} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \quad z_{\text{шшш}} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Перевірка

$$\frac{i_{\text{шшр}} \cdot 2 + z_{\text{шшр}}}{3} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \quad - \text{цілі числа}$$

$$\frac{i_{\text{шшш}} \cdot 2 + z_{\text{шшш}}}{3} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 4 \end{pmatrix} \quad - \text{цілі числа}$$

Середній крок чистових і камбруючих зубців

$$t_{\text{шшр}} = \begin{pmatrix} 12 \\ 12 \\ 12 \end{pmatrix} \quad t_{\text{шшр}} = \begin{pmatrix} 9 \\ 9 \\ 9 \end{pmatrix} \quad t_{\text{шшш}} = \begin{pmatrix} 12 \\ 13 \\ 12 \end{pmatrix} \quad t_{\text{шшш}} = \begin{pmatrix} 9 \\ 11 \\ 9 \end{pmatrix}$$

Кількість фасочних зубців

$$z_{\text{шф}_k} := (i_{\text{шф}_k} + 1) \cdot z_{\text{шф}_k} \quad z_{\text{шф}} = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 8 \end{pmatrix}$$

так як додається одна секція для зняття  
остаточного припуску

Кількість круглих зубців

$$z_{\text{шкр}_k} := i_{\text{шкр}_k} \cdot z_{\text{шкр}_k} \quad z_{\text{шкр}} = \begin{pmatrix} 12 \\ 24 \\ 24 \end{pmatrix}$$

$$z_{\text{шшкр}_k} := i_{\text{шшкр}_k} \cdot 2 \quad z_{\text{шшкр}} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

$$z_{\text{шшкр}_k} := i_{\text{шшкр}_k} \cdot 2 \quad z_{\text{шшкр}} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Кількість шпінцевих зубців

$$z_{\text{шшш}_k} := i_{\text{шшш}_k} \cdot z_{\text{шшш}_k} + 1 \quad z_{\text{шшш}} = \begin{pmatrix} 14 \\ 14 \\ 14 \end{pmatrix}$$

$$z_{\text{шц}_k} := i_{\text{шц}_k} \cdot 2 \quad z_{\text{шц}} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

$$z_{\text{шц}_k} := i_{\text{шц}_k} \cdot 2 \quad z_{\text{шц}} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Довжина ріжучої частини протяжки

$$l_{\text{ф}_k} := t_{\text{оф}_k} \cdot z_{\text{ф}_k}$$

$$l_{\text{кр}_k} := t_{\text{окр}_k} \cdot (z_{\text{окр}_k} + z_{\text{ткр}_k}) + t_{\text{акр}_k} \cdot (z_{\text{окр}_k} + z_{\text{акр}_k} - 1) \quad l_{\text{кр}} = \begin{pmatrix} 288 \\ 432 \\ 432 \end{pmatrix}$$

Чорнові і перехідні круглі зубці розміщуємо перед фасочними зубцями, так як довжина круглої частини протяжки значно перевищує довжину отвору

$$l_{\text{шц}_k} := t_{\text{ошц}_k} \cdot (z_{\text{ошц}_k} + z_{\text{тшц}_k}) + t_{\text{ашц}_k} \cdot (z_{\text{ошц}_k} + z_{\text{ашц}_k} - 1)$$

$$l_{\text{р}} := l_{\text{ф}} + l_{\text{кр}} + l_{\text{шц}}$$

$$l_{\text{р}} = \begin{pmatrix} 675 \\ 877 \\ 867 \end{pmatrix} \quad \text{Приймаємо перший варіант протяжки}$$

k := 1

Діаметр передньої напрямної

$$d_{\text{пн}} := D_0 \quad d_{\text{пн}} = 18$$

Довжина передньої напрямної

$$l_{\text{пн}} := 0.75 \cdot 1 \quad l_{\text{пн}} = 45 \quad l_{\text{пн}} := 45$$

Довжина прямого конуса

$$l_{\text{кк}} := 15$$

Діаметр першого прорізного круглого зуба

$$D_{\text{д1}} := D_0 + 2 \cdot s_{\text{окр}_k}$$

$$x := 1 \quad y := z_{\text{окр}_k} - z_{\text{акр}_k} \quad m := x, x + z_{\text{окр}_k} \cdot y$$

$$s_{\text{ом}} := s_{\text{окр}_k}$$

$$D_{\text{m}} := D_1 + 2 \cdot s_{\text{ом}} \cdot \left( \text{ceil} \left( \frac{m}{z_{\text{окр}_k}} \right) - 1 \right)$$

$$D_{\text{m}+1} := \text{if} (z_{\text{окр}_k} > 1, D_{\text{m}} - 0.02, D_{\text{m}} + 2 \cdot s_{\text{ом}})$$

$$s_{\text{oy}+z_{\text{окр}_k}} := \text{if} (s_{\text{окр}_k} < s_{\text{окр}_1}, s_{\text{окр}_k}, s_{\text{окр}_k})$$

$$D_{\text{y}+1} := D_{\text{y}-z_{\text{окр}_k}+1} + 2 \cdot s_{\text{oy}+z_{\text{окр}_k}}$$

$$D_{\text{y}+1} = 20.64$$

$$D_{\text{y}+z_{\text{окр}_k}} := \text{if} (z_{\text{окр}_k} > 1, D_{\text{y}+1} - 0.02, D_{\text{y}+1})$$

$$x := z_{\text{окр}_k} + 1$$

$$y := z_{\text{окр}_k} + z_{\text{ткр}_k}$$

$$m := x + 2, x + 4, \dots, y$$

$$s_0 := \text{if} (s_{\text{ткр}_k} < s_{\text{ткр}_1}, s_{\text{ткр}_k}, 0)$$

$$s_{\text{ткр}_3} := s_0$$

$$s_{\text{ткр}} := \text{sort}(s_{\text{ткр}})$$

$$s_{\text{ткр}_k} := \text{reverse}(s_{\text{ткр}})$$

$$D_{\text{x}} := D_{\text{x}-z_{\text{окр}_k}} + 2 \cdot s_{\text{ткр}_1}$$

$$D_{\text{x}+1} := D_{\text{x}} - 0.02$$

$$\begin{aligned}
D_m &:= D_{m-2} + 2 \cdot s_{\text{exp}} \cdot \text{ceil}\left(\frac{m-x+2}{2}\right) & D_{m+1} &:= D_m - 0.02 \\
x &:= y + 1 & y &:= x + z_{\Phi_k} - 2 & m &:= x + z_{\Phi_k}, x + z_{\Phi_k} \cdot 2..y \\
D_x &:= d_{\text{max}} - A_{\text{exp}} + A_{\text{oc}\Phi_k} \\
D_m &:= D_{m-z_{\Phi_k}} + 2 \cdot s_{\text{oc}\Phi_k} \\
D_{x+1} &:= \text{if}(z_{\Phi_k} > 1, D_x - 0.02, D_{x+1}) \\
D_{m+1} &:= \text{if}(z_{\Phi_k} > 1, D_x - 0.02, D_m + 2 \cdot s_{\text{oc}\Phi_k}) \\
x &:= y + 2 & y &:= x + z_{\text{exp}_k} - 2 & m &:= x + 2, x + 4..y \\
s_o &:= \text{if}(s_{\text{exp}_k} < s_{\text{exp}_1}, s_{\text{exp}_k}, 0) & s_{\text{exp}_4} &:= s_o \\
s_{\text{exp}} &:= \text{sort}(s_{\text{exp}}) & s_{\text{exp}_3} &:= \text{reverse}(s_{\text{exp}}) \\
D_x &:= D_{x-2-z_{\Phi_k}} + 2 \cdot s_{\text{exp}_1} & D_{x+1} &:= D_x \\
D_m &:= D_{m-2} + 2 \cdot s_{\text{exp}} \cdot \text{ceil}\left(\frac{m-x+2}{2}\right) & D_{m+1} &:= D_m \\
x &:= y + 2 & y &:= x + z_{\text{exp}_k} - 1 & m &:= x, x + 1..y \\
D_m &:= d_{\text{max}} \\
x &:= y + 1 & y &:= x + z_{\text{out}_k} - z_{\text{in}_k} - 1 & m &:= x + 1, x + z_{\text{in}_k} + 1..y \\
D_x &:= D_{\text{in}_1} & s_{\text{out}_m} &:= s_{\text{out}_k} & D_{x+1} &:= D_x + 2 \cdot s_{\text{out}_k} \\
D_m &:= D_{x+1} + 2 \cdot s_{\text{out}_m} \cdot \text{ceil}\left(\frac{m-x-1}{z_{\text{in}_k}}\right) \\
D_{m+1} &:= \text{if}(z_{\text{in}_k} > 1, D_m - 0.02, D_m + 2 \cdot s_{\text{out}_m}) \\
s_{\text{oy}+z_{\text{in}_k}} &:= \text{if}(s_{\text{out}_k} < s_{\text{out}_1}, s_{\text{out}_k}, s_{\text{out}_k}) \\
D_{y+1} &:= D_{\text{ceil}\left(\frac{y}{z_{\text{in}_k}}\right)} + 2 \cdot s_{\text{oy}+z_{\text{in}_k}} \\
D_{y+z_{\text{in}_k}} &:= \text{if}(z_{\text{in}_k} > 1, D_{y+1} - 0.02, D_{y+1}) \\
x &:= y + 2 & y &:= x + z_{\text{in}_k} - 2 & m &:= x + 2, x + 4..y \\
s_o &:= \text{if}(s_{\text{in}_k} < s_{\text{in}_1}, s_{\text{in}_k}, 0) & s_{\text{in}_3} &:= s_o \\
s_{\text{in}} &:= \text{sort}(s_{\text{in}}) & s_{\text{in}_4} &:= \text{reverse}(s_{\text{in}}) \\
D_x &:= D_{x-z_{\text{in}_k}} + 2 \cdot s_{\text{in}_1} & D_{x+1} &:= D_x - 0.02 \\
D_m &:= D_{m-2} + 2 \cdot s_{\text{in}} \cdot \text{ceil}\left(\frac{m-x+2}{2}\right) & D_{m+1} &:= D_m - 0.02 \\
x &:= y + 2 & y &:= x + z_{\text{in}_k} - 2 & m &:= x + 2, x + 4..y \\
s_o &:= \text{if}(s_{\text{in}_k} < s_{\text{in}_1}, s_{\text{in}_k}, 0) & s_{\text{in}_4} &:= s_o \\
s_{\text{in}} &:= \text{sort}(s_{\text{in}}) & s_{\text{in}_3} &:= \text{reverse}(s_{\text{in}})
\end{aligned}$$

$$D_x := D_{x-2} + 2 \cdot s_{\text{шир}_1}$$

$$D_{x+1} := D_x$$

$$D_m := D_{m-2} + 2 \cdot s_{\text{шир}} \cdot \text{ceil}\left(\frac{m-x+2}{2}\right)$$

$$D_{m+1} := D_m$$

$$x := y + 1$$

$$y := x + z_{\text{шир}_k}$$

$$m := x, x + 1 \dots y$$

$$D_m := D_{\text{max}}$$

Діаметр впадин фасочних і шлицевих зубців

$$D_{\text{фз}} := D_o \quad D_{\text{шлз}} := D_o$$

$$D_{\text{фз}} = 18 \quad D_{\text{шлз}} = 18$$

Ширина ріжучого сектора прорізного круглого зуба

$$B_{\text{кр}} := 1.3 \cdot \sqrt{d_{\text{max}}} \quad B_{\text{кр}} = 5.976$$

Число викружок

$$n_{\text{окр}} := \text{round}\left(\frac{\pi \cdot d_{\text{max}}}{B_{\text{кр}} \cdot z_{\text{окр}_k}}, 0\right) \quad n_{\text{окр}} = 6$$

$$n_{\text{твр}} := \text{round}\left(\frac{\pi \cdot d_{\text{max}}}{B_{\text{кр}} \cdot 2}, 0\right) \quad n_{\text{твр}} = 6$$

Ширина викружок

$$a_{\text{окр}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{max}} \cdot (z_{\text{окр}_k} - 1)}{n_{\text{окр}} \cdot z_{\text{окр}_k}} \quad a_{\text{окр}} = 5.532$$

Приймаємо  $a_{\text{окр}} := \frac{\text{round}(a_{\text{окр}} \cdot 2, 0)}{2}$

$$a_{\text{окр}} = 5.5$$

$$a_{\text{твр}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{max}} \cdot (2 - 1)}{n_{\text{твр}} \cdot 2}$$

$$a_{\text{твр}} = 5.532$$

Приймаємо  $a_{\text{твр}} := \frac{\text{round}(a_{\text{твр}} \cdot 2, 0)}{2}$

$$a_{\text{твр}} = 5.5$$

$$B_{\text{ф}} := b + 2 \cdot f$$

$$B_{\text{ф}} = 5.63$$

$$B_{\text{вкр}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{max}}}{Z} - (b + 2 \cdot f)$$

$$B_{\text{вкр}} = 5.434$$

$$B_{\text{ши}} := b_{\text{max}}$$

$$B_{\text{ши}} = 5.06$$

Розмір фаски на прорізних зубцях

$$f_{\text{п}} := 1$$

Ширина ріжучого сектора

$$B_{\text{сф}} := b - 2 \cdot f_{\text{п}}$$

$$B_{\text{сф}} = 3.03$$

$$B_{\text{сши}} := b - 2 \cdot f_{\text{п}}$$

$$B_{\text{сши}} := 0.7 \cdot B_{\text{ши}}$$

Ширина викружок

$$a_{\text{ф}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{max}}}{Z} - B_{\text{сф}} \quad a_{\text{ф}} := \frac{\text{round}(a_{\text{ф}} \cdot 2, 0)}{2} \quad a_{\text{ф}} = 8$$

$$a_{\text{ши}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{max}}}{Z} - B_{\text{сши}} \quad a_{\text{ши}} := \frac{\text{round}(a_{\text{ши}} \cdot 2, 0)}{2} \quad a_{\text{ши}} = 8$$

$$a_{\text{нр}} := 1.2 \cdot B_{\text{нр}} \quad a_{\text{нр}} := \frac{\text{round}(a_{\text{нр}} \cdot 2, 0)}{2} \quad a_{\text{нр}} = 6.5$$

$$a_{\text{шт}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{шт}}}{2} - B_{\text{шт}} \quad a_{\text{шт}} := \frac{\text{round}(a_{\text{шт}} \cdot 2, 0)}{2} \quad a_{\text{шт}} = 7.5$$

Довжина задньої напрямної

$$l_{\text{н}} := 25$$

Довжина заднього хвостовика

$$l_{\text{х}} := 125$$

Загальна довжина протяжки

$$L := l_{\text{н}} + l_{\text{р}} + l_{\text{н}} + l_{\text{х}} \quad L = \begin{pmatrix} 1035 \\ 1237 \\ 1227 \end{pmatrix}$$

## ДОДАТОК Б

## Розрахунок зубонарізного довбача за допомогою спеціалізованого математичного пакету MathCAD

*Евольвентна циліндрична передача зовнішнього зачеплення*

Вихідні дані:

$m_n := 8.0$	- модуль нормальний		
$z_1 := 34$	- число зубців шестерні		
$z_2 := 50$	- число зубців колеса		
$X_1 := 0.0$	- коефіцієнт зміщення висхідного контуру шестерні		
$X_2 := 0.0$	- коефіцієнт зміщення висхідного контуру колеса		
$h_a := 1$	- коефіцієнт висоти головки		
$c_{\alpha} := 0.397$	- коефіцієнт радіального зазору		
$r_f := 0.535$	- коефіцієнт радіуса кривини перехідної кривої		
$\alpha := 15 \cdot \frac{\pi}{180}$	- кут головного профілю		
$\beta := 0$	- кут нахилу зубців		
$a := \frac{(z_2 + z_1) \cdot m_n}{2 \cdot \cos(\beta)}$	$a = 336$	- діляльна міжосьова відстань	
$X_{\Sigma} := X_1 + X_2$	$X_{\Sigma} = 0$	- коефіцієнт зміщень	
$\alpha_f := \operatorname{atan}\left(\frac{\tan(\alpha)}{\cos(\beta)}\right)$	$\alpha_f \cdot \frac{180}{\pi} = 15$	- кут профілю торцевий	
$\operatorname{alf} := 1$	Given		
	$\tan(\operatorname{alf}) - \operatorname{alf} - \tan(\alpha_f) + \alpha_f - \frac{2 \cdot X_{\Sigma} \cdot \tan(\alpha)}{z_2 + z_1} = 0$		
$\alpha_{fw} := \operatorname{Find}(\operatorname{alf})$	$\alpha_{fw} \cdot \frac{180}{\pi} = 15$	- кут зачеплення передачі	
$a_w := a \cdot \frac{\cos(\alpha_f)}{\cos(\alpha_{fw})}$	$a_w = 336$	- початкова міжосьова відстань	
$d_1 := \frac{m_n \cdot z_1}{\cos(\beta)}$	$d_1 = 272$	- діляльний діаметр шестерні	
$d_2 := \frac{m_n \cdot z_2}{\cos(\beta)}$	$d_2 = 400$	- діляльний діаметр колеса	
$u := \frac{z_2}{z_1}$	$u = 1.471$	- передатне число	
$d_{w1} := \frac{2 \cdot a_w}{u + 1}$	$d_{w1} = 272$	- початковий діаметр шестерні	
$d_{w2} := d_{w1} \cdot u$	$d_{w2} = 400$	- початковий діаметр колеса	
$\Delta y := X_{\Sigma} - \frac{a_w - a}{m_n}$	$\Delta y = -7.105 \times 10^{-15}$	- коефіцієнт зрівнюючого зміщення	
$d_{a1} := d_1 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_1 + \Delta y)$	$d_{a1} = 288$	- діаметр вершин шестерні	
$d_{a2} := d_2 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_2 - \Delta y)$	$d_{a2} = 416$	- діаметр вершин колеса	
$d_f1 := d_1 - 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c - X_1)$	$d_f1 = 249.648$	- діаметр впадин шестерні	
$d_f2 := d_2 - 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c - X_2)$	$d_f2 = 377.648$	- діаметр впадин колеса	
$h_1 := \frac{d_{a1} - d_f1}{2}$	$h_1 = 19.176$	- висота зуба шестерні	

$$h_2 := \frac{d_{a2} - d_2}{2} \quad h_2 = 19.176 \quad - \text{ висота зуба колеса}$$

$$d_{b1} := d_1 \cdot \cos(\alpha_f) \quad d_{b1} = 262.732 \quad - \text{ основний діаметр шестерні}$$

$$d_{b2} := d_2 \cdot \cos(\alpha_f) \quad d_{b2} = 386.37 \quad - \text{ основний діаметр колеса}$$

$$\alpha_{a1} := \arccos\left(\frac{d_{b1}}{d_{a1}}\right) \quad \alpha_{a1} \cdot \frac{180}{\pi} = 24.18 \quad - \text{ кут профілю на колі вершин шестерні}$$

$$\alpha_{a2} := \arccos\left(\frac{d_{b2}}{d_{a2}}\right) \quad \alpha_{a2} \cdot \frac{180}{\pi} = 21.755 \quad - \text{ кут профілю на колі вершин шестерні}$$

$$\rho_{a1} := 0.5 \cdot d_{b1} \cdot \tan(\alpha_{a1}) \quad \rho_{a1} = 58.983 \quad - \text{ радіус кривини активного профілю в точці вершин зубців шестерні}$$

$$\rho_{p1} := a_w \cdot \sin(\alpha_{t_w}) - \rho_{a1} \quad \rho_{p1} = 27.98 \quad - \text{ радіус кривини активного профілю в нижній точці шестерні}$$

$$\rho_{a2} := 0.5 \cdot d_{b2} \cdot \tan(\alpha_{a2}) \quad \rho_{a2} = 77.094 \quad - \text{ радіус кривини активного профілю в точці вершин зубців колеса}$$

$$\rho_{p2} := a_w \cdot \sin(\alpha_{t_w}) - \rho_{a2} \quad \rho_{p2} = 9.869 \quad - \text{ радіус кривини активного профілю в нижній точці колеса}$$

$$c_{12} := 0.5 \cdot [2 \cdot a_w - (d_{a1} + d_{a2})] \quad c_{12} = 3.176 \quad - \text{ радіальний зазор в передачі}$$

### Розрахунок параметрів довбача в висхідному перетині

$$d_{\text{ном}} := 200 \quad - \text{ номінальний діаметр довбача}$$

$$z_0 := \text{round}\left(\frac{d_{\text{ном}} \cdot \cos(\beta)}{m_n}, 0\right) \quad z_0 = 25 \quad - \text{ число зубців довбача}$$

$$d_0 := \frac{m_n \cdot z_0}{\cos(\beta)} \quad d_0 = 200 \quad - \text{ діляльний діаметр довбача}$$

$$\alpha_{t0} := \text{atan}\left(\frac{\tan(\alpha)}{\cos(\beta)}\right) \quad \alpha_{t0} \cdot \frac{180}{\pi} = 15 \quad - \text{ торцевий кут профілю на діляльному діаметрі}$$

$$d_{b0} := d_0 \cdot \cos(\alpha_{t0}) \quad d_{b0} = 193.185 \quad - \text{ основний діаметр довбача}$$

### Розрахунок параметрів нового довбача

$$S_{ta0n} := \text{if}(d_0 < 50, \sqrt{0.138 \cdot m_n - 0.013}, \text{if}(d_0 > 160, \sqrt{0.81 \cdot m_n - 0.72}, \sqrt{0.2594 \cdot m_n - 0.0375}))$$

$$S_{ta0n} = 2.4 \quad - \text{ товщина зуба на вершині нового довбача}$$

$$\text{inv}(x) := \tan(x) - x \quad - \text{ функція інволюти кута}$$

$$\underline{\text{alf}} := 1 \quad \text{Given}$$

$$\tan(\text{alf}) - \text{alf} - \text{inv}(\alpha_{t0}) - \frac{\pi}{2 \cdot z_0} = 0$$

$$\alpha_{ta0n} := \text{Find}(\text{alf}) \quad \alpha_{ta0n} \cdot \frac{180}{\pi} = 32.379 \quad - \text{ кут профілю на поверхні вершин (1-е наближення)}$$

$$d_{a0n} := \frac{d_{b0}}{\cos(\alpha_{ta0n})} \quad d_{a0n} = 228.749 \quad - \text{ діаметр поверхні вершин (1-е наближення)}$$

$$X_{0n} := \frac{z_0 \cdot S_{ta0n}}{2 \cdot d_{a0n} \cdot \tan(\alpha_{ta0n})} \quad X_{0n} = 0.207 \quad - \text{ коефіцієнт зміщення нового довбача (1-е наближення)}$$

$$\underline{\text{alf}} := 1 \quad \text{Given}$$

$$\tan(\text{alf}) - \text{alf} - \text{inv}(\alpha_{t0}) - \frac{2 \cdot (X_1 + X_{0n}) \cdot \tan(\alpha)}{z_1 + z_0} = 0$$

$$\alpha_{tw0ln} := \text{Find}(\text{alf}) \quad \alpha_{tw0ln} \cdot \frac{180}{\pi} = 16.364 \quad - \text{ кут зачеплення нового довбача з колесом}$$

$$a_{w0ln} := \frac{d_{b1} + d_{b0}}{2 \cdot \cos(\alpha_{tw0ln})} \quad a_{w0ln} = 237.583 \quad - \text{верстатна міжосьова відстань}$$

$$d_{a0ln} := d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0ln} + c) \quad d_{a0ln} = 225.661 \quad - \text{діаметр поверхні вершин при прийнятому коефіцієнті зміщення}$$

$$r_{a0ln} := 0.5 \cdot \sqrt{d_{a0ln}^2 - d_{b0}^2} \quad r_{a0ln} = 58.315 \quad - \text{радіус кривини профілю на поверхні вершин}$$

$$r_{11} := a_{w0ln} \cdot \sin(\alpha_{tw0ln}) - r_{a0ln} \quad r_{11} = 8.623 \quad - \text{радіус кривини в граничній точці профілю колеса}$$

Перевірка

$$per1 := \text{if}(r_{11} > 0, \text{"Умова виконується"}, \text{"Умова не виконується"}) \quad per1 = \text{"Умова виконується"}$$

$$per2 := \text{if}(r_{11} < r_{p1}, \text{"Умова виконується"}, \text{"Умова не виконується"}) \quad per2 = \text{"Умова виконується"}$$

Обидві умови виконуються.

*Розрахунок параметрів сточеного довбача*

$$r_{p0} := \text{if}(d_0 < 50, 1, \text{if}(d_0 > 100, 5, 3))$$

$$\alpha_{tw01c} := \text{atan}\left[\frac{2 \cdot (r_{a1} + r_{p0})}{d_{b1} + d_{b0}}\right] \quad \alpha_{tw01c} \cdot \frac{180}{\pi} = 15.678 \quad - \text{кут зачеплення сточеного довбача з колесом}$$

$$X_{0c} := \frac{(\text{inv}(\alpha_{tw01c}) - \text{inv}(\alpha_0)) \cdot (z_1 + z_0)}{2 \cdot \tan(\alpha)} - X_1 \quad X_{0c} = 0.098 \quad - \text{коефіцієнт зміщення сточеного довбача (1-е наближення)}$$

$$d_{a0c} := d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0c} + c) \quad d_{a0c} = 223.921 \quad - \text{діаметр поверхні вершин при прийнятому коефіцієнті зміщення}$$

$$a_{w01c} := \frac{d_{b1} + d_{b0}}{2 \cdot \cos(\alpha_{tw01c})} \quad a_{w01c} = 236.768 \quad - \text{верстатна міжосьова відстань}$$

$$r_{a0c} := 0.5 \cdot \sqrt{d_{a0c}^2 - d_{b0}^2} \quad r_{a0c} = 56.613 \quad - \text{радіус кривини профілю на поверхні вершин}$$

$$r_{11} := a_{w01c} \cdot \sin(\alpha_{tw01c}) - r_{a0c} \quad r_{11} = 7.37 \quad - \text{радіус кривини в граничній точці профілю колеса}$$

Перевірка

$$per1 := \text{if}(r_{11} > 0, \text{"Умова виконується"}, \text{"Умова не виконується"}) \quad per1 = \text{"Умова виконується"}$$

$$per2 := \text{if}(r_{11} < r_{p1}, \text{"Умова виконується"}, \text{"Умова не виконується"}) \quad per2 = \text{"Умова виконується"}$$

Обидві умови виконуються.

*Розрахунок і призначення параметрів різучої частини і виконавчих розмірів довбача*

$$\epsilon_{\text{вв}} := 3 \cdot \frac{\pi}{180} \quad - \text{кут нахилу гвинтової лінії задньої поверхні довбача на основному циліндрі}$$

$$p := \frac{d_{b0}}{\tan(\epsilon)} \quad p = 3.686 \times 10^3 \quad - \text{гвинтовий параметр задньої поверхні}$$

$$a_{\text{max}} := \frac{2 \cdot p \cdot X_{0n} \cdot \tan(\alpha)}{z_0} \quad a_{\text{max}} = 16.343 \quad - \text{можлива висхідна відстань нового довбача}$$

$$a_{\text{стmax}} := \frac{2 \cdot p \cdot X_{0c} \cdot \tan(\alpha)}{z_0} \quad a_{\text{стmax}} = 7.751 \quad - \text{можлива висхідна відстань сточеного довбача}$$

$$H_{\text{max}} := \frac{2 \cdot p \cdot (X_{0n} - X_{0c}) \cdot \tan(\alpha)}{z_0} \quad H_{\text{max}} = 8.592 \quad - \text{можлива висота сточування довбача}$$

$$E_p := 32 \quad - \text{висота сточування, обмежена технологічними умовами виготовлення довбача}$$

$$per3 := \text{if}(E_p \geq H_{\text{max}}, \text{"Умова виконується"}, \text{"Умова не виконується"}) \quad per3 = \text{"Умова виконується"}$$

Коригуємо висхідні відстані

$a_n = 16$  - висхідна відстань нового довбача

$a_c = -16$  - висхідна відстань сточеного довбача

$H = a_n - a_c$      $H = 32$     - висота сточування довбача

$X_{0n} = \frac{a_n \cdot z_0}{2 \cdot p \cdot \tan(\alpha)}$      $X_{0n} = 0.202$     - коефіцієнт зміщення нового довбача

$X_{0c} = \frac{a_c \cdot z_0}{2 \cdot p \cdot \tan(\alpha)}$      $X_{0c} = -0.202$     - коефіцієнт зміщення сточеного довбача

$d_{a0n} = d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0n} + c)$      $d_{a0n} = 225.592$     - діаметр поверхні вершин нового довбача при прийнятому коефіцієнті зміщення

$d_{a0c} = d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0c} + c)$      $d_{a0c} = 219.112$     - діаметр поверхні вершин сточеного довбача при прийнятому коефіцієнті зміщення

$\delta_a = \text{atan}\left(\frac{d_{a0n} - d_{a0c}}{2 \cdot H}\right)$      $\delta_a \cdot \frac{180}{\pi} = 5.781$     - задній кут на вершинній ріжучій країці

$\gamma = 5 \cdot \frac{\pi}{180}$     - передній кут

$E_{HS} = 0.22$     - найменше додаткове зміщення висхідного контуру

$\Delta S = 2 \cdot E_{HS} \cdot \tan(\alpha)$      $\Delta S = 0.118$     - допустиме найменше зміщення висхідного контура

$S_{t0n} = \frac{d_0 \cdot (0.5 \cdot \pi + 2 \cdot X_{0n} \cdot \tan(\alpha))}{z_0} + \Delta S$      $S_{t0n} = 13.552$     - довжина товщина зуба нового довбача

$h_{a0} = 0.5 \cdot (d_{a0n} - d_0)$      $h_{a0} = 12.796$     - висота довільної головки зуба нового довбача

$b_0 = H + 6$      $b_0 = 38$     - ширина вінця довбача

$B_0 = b_0 + 5$      $B_0 = 43$     - висота довбача дискового

$h_0 = 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c)$      $h_0 = 22.352$     - висота зуба нового довбача

$\delta_{бок} = \text{atan}\left(\frac{d_0 \cdot \tan(\varepsilon)}{d_{b0}}\right)$      $\delta_{бок} \cdot \frac{180}{\pi} = 3.106$     - боковий задній кут на довільному циліндрі

$\delta_n = \text{atan}(\tan(\delta_{бок}) \cdot \cos(\alpha_0))$      $\delta_n \cdot \frac{180}{\pi} = 3$     - боковий задній кут на довільному циліндрі в нормальному перетині бокового леза

$\alpha_{ок} = \text{atan}\left(\frac{\tan(\alpha)}{1 - \tan(\gamma) \cdot \tan(\delta_a)}\right)$      $\alpha_{ок} \cdot \frac{180}{\pi} = 15.128$     - скоригований кут профілю довбача

$d_{b0} = d_0 \cdot \cos(\alpha_{ок})$      $d_{b0} = 193.069$     - діаметр основного циліндру довбача при шифуванні профілю

## ДОДАТОК В

### Розрахунок модульної черв'ячної фрези за допомогою спеціалізованого математичного пакету MathCAD

*Евольвентна циліндрична передача зовнішнього зачеплення*

Вихідні дані:

$m_n := 4$	- модуль нормальний		
$z_1 := 32$	- число зубців шестерні		
$z_2 := 93$	- число зубців колеса		
$X_1 := 0.456$	- коефіцієнт зміщення висхідного контуру шестерні		
$X_2 := -0.456$	- коефіцієнт зміщення висхідного контуру колеса		
$h_a := 1.0$	- коефіцієнт висоти головки		
$c := 0.25$	- коефіцієнт радіального зазору		
$\rho_f := 0.38$	- коефіцієнт радіуса кривини перехідної кривої		
$\alpha := 20 \cdot \frac{\pi}{180}$	- кут головного профілю		
$\beta := 0$	- кут нахилу зубців		
$a := \frac{(z_2 + z_1) \cdot m_n}{2 \cdot \cos(\beta)}$	$a = 250$	- ділильна міжосьова відстань	
$X_{\Sigma} := X_1 + X_2$	$X_{\Sigma} = 0$	- коефіцієнт зміщень	
$\alpha_f := \text{atan}\left(\frac{\tan(\alpha)}{\cos(\beta)}\right)$	$\alpha_f \cdot \frac{180}{\pi} = 20$	- кут профілю торцевий	
$\text{alf} := 1$	Given		
	$\tan(\text{alf}) - \text{alf} - \tan(\alpha_f) + \alpha_f - \frac{2 \cdot X_{\Sigma} \cdot \tan(\alpha)}{z_2 + z_1} = 0$		
$\alpha_{fw} := \text{Find}(\text{alf})$	$\alpha_{fw} \cdot \frac{180}{\pi} = 20$	- кут зачеплення передачі	
$a_w := a \cdot \frac{\cos(\alpha_f)}{\cos(\alpha_{fw})}$	$a_w = 250$	- початкова міжосьова відстань	
$d_1 := \frac{m_n \cdot z_1}{\cos(\beta)}$	$d_1 = 128$	- ділильний діаметр шестерні	
$d_2 := \frac{m_n \cdot z_2}{\cos(\beta)}$	$d_2 = 372$	- ділильний діаметр колеса	
$u := \frac{z_2}{z_1}$	$u = 2.906$	- передатне число	
$d_{w1} := \frac{2 \cdot a_w}{u + 1}$	$d_{w1} = 128$	- початковий діаметр шестерні	
$d_{w2} := d_{w1} \cdot u$	$d_{w2} = 372$	- початковий діаметр колеса	
$\Delta y := X_{\Sigma} - \frac{a_w - a}{m_n}$	$\Delta y = 0$	- коефіцієнт зрівнюючого зміщення	
$d_{a1} := d_1 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_1 - \Delta y)$	$d_{a1} = 139.648$	- діаметр вершин шестерні	

$d_{a2} := d_2 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_2 - \Delta y)$	$d_{a2} = 376.352$	- діаметр вершин колеса
$d_{f1} := d_1 - 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c - X_1)$	$d_{f1} = 121.648$	- діаметр впадин шестерні
$d_{f2} := d_2 - 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c - X_2)$	$d_{f2} = 358.352$	- діаметр впадин колеса
$h_1 := \frac{d_{a1} - d_{f1}}{2}$	$h_1 = 9$	- висота зуба шестерні
$h_2 := \frac{d_{a2} - d_{f2}}{2}$	$h_2 = 9$	- висота зуба колеса
$d_{b1} := d_1 \cdot \cos(\alpha_f)$	$d_{b1} = 120.281$	- основний діаметр шестерні
$d_{b2} := d_2 \cdot \cos(\alpha_f)$	$d_{b2} = 349.566$	- основний діаметр колеса
$\alpha_{a1} := \arccos\left(\frac{d_{b1}}{d_{a1}}\right)$	$\alpha_{a1} \cdot \frac{180}{\pi} = 30.536$	- кут профілю на колі вершин шестерні
$\alpha_{a2} := \arccos\left(\frac{d_{b2}}{d_{a2}}\right)$	$\alpha_{a2} \cdot \frac{180}{\pi} = 21.747$	- кут профілю на колі вершин шестерні
$r_{p1} := a_w \cdot \sin(\alpha_{t,w}) - r_f \cdot m_n$	$r_{p1} = 83.985$	- радіус кривини активного профілю в нижній точці шестерні
$r_{p2} := a_w \cdot \sin(\alpha_{t,w}) - r_f \cdot m_n$	$r_{p2} = 83.985$	- радіус кривини активного профілю в нижній точці колеса
$c_{12} := 0.5 \cdot [2 \cdot a_w - (d_{a1} + d_{a2})]$	$c_{12} = 1$	- радіальний зазор в передачі

### Розрахунок параметрів висхідного виробного черв'яка фрези

$\alpha_{n0} := \alpha$	$\alpha_{n0} \cdot \frac{180}{\pi} = 20$	- нормальний кут профілю
$z_0 := 1$		- число витків виробного черв'яка
$\gamma_0 := 1.7 \cdot \frac{\pi}{180}$		- дільний кут підйому витків виробного черв'яка (попередній)
$h_{a0} := m_n \cdot (h_a + c)$	$h_{a0} = 5$	- висота дільної головки витка виробного черв'яка (зуба фрези)
$h_0 := 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c)$	$h_0 = 10$	- висота зуба виробного черв'яка (фрези)
$d_{0p} := \frac{m_n \cdot z_0}{\sin(\gamma_0)}$	$d_{0p} = 134.833$	- дільний діаметр виробного черв'яка (фрези) розрахунковий
$d_{a0p} := d_{0p} + 2 \cdot h_{a0}$	$d_{a0p} := \frac{\text{round}(d_{a0p} \cdot 2, 0)}{2}$	
$d_{a0} = 145$		- діаметр поверхні вершин виробного черв'яка (фрези)
$d_0 := d_{a0} - 2 \cdot h_{a0}$	$d_0 = 135$	- уточнений дільний діаметр виробного черв'яка (фрези)
$\gamma_{0w} := \arcsin\left(\frac{m_n \cdot z_0}{d_0}\right)$	$\gamma_0 \cdot \frac{180}{\pi} = 1.698$	- дільний кут підйому витків уточнений
$p_{n0} := \pi \cdot m_n$	$p_{n0} = 12.566$	- нормальний крок висхідного виробного черв'яка (фрези)
$p_{x0} := \frac{p_{n0}}{\cos(\gamma_0)}$	$p_{x0} = 12.572$	- осьовий крок висхідного виробного черв'яка (фрези)
$p_{x0} := p_{x0} \cdot z_0$	$p_{x0} = 12.572$	- хід витків виробного черв'яка (фрези)

$$E_{H\alpha} := 0.3 \quad - \text{найменше додаткове зміщення висхідного контуру}$$

$$\Delta s := 2 \cdot E_{H\alpha} \cdot \tan(\alpha) \quad \Delta s = 0.218 \quad - \text{допустиме найменше зміщення висхідного контура}$$

$$s_{n0} := 0.5 \cdot p_{n0} + \Delta s \quad s_{n0} = 6.502 \quad - \text{дільна товщина зуба виробного черв'яка (фрези) нормальна}$$

$$s_{x0} := \frac{s_{n0}}{\cos(\gamma_0)} \quad s_{x0} = 6.504 \quad - \text{осьова дільна товщина зуба}$$

### Розрахунок параметрів ріжучої частини фрези

$$b := 2.4 \quad \varphi := \arccos\left(\frac{d_{a0} - 2 \cdot h_1}{d_{a0}}\right)$$

$$z := b \cdot \frac{\pi}{\varphi} \quad \underline{z} := \text{round}(z, 0) \quad z = 15 \quad - \text{число зубців фрези}$$

$$\alpha_z := 12 \cdot \frac{\pi}{180} \quad - \text{задній кут на вершині зуба}$$

$$K_1 := \frac{\pi \cdot d_{a0} \cdot \tan(\alpha_z)}{z} \quad \underline{K_1} := \text{if}\left(K_1 < 5, \frac{\text{round}(K_1 \cdot 2, 0)}{2}, \text{round}(K_1, 0)\right)$$

$$K_1 = 6 \quad - \text{величина першого затупування}$$

$$K_2 := 1.5 \cdot K_1 \quad \underline{K_2} := \text{if}\left(K_2 < 5, \frac{\text{round}(K_2 \cdot 2, 0)}{2}, \text{round}(K_2, 0)\right)$$

$$K_2 = 9 \quad - \text{величина другого затупування}$$

$$\sigma := 0.125$$

$$d_{pac} := d_{a0} - 2 \cdot h_{a0} - 2 \cdot \sigma \cdot K_1$$

$$d_{pac} = 133.5 \quad - \text{розрахунковий діаметр початковий гвинтових стружкових канавок}$$

$$\omega := \text{atan}\left(\frac{m_n \cdot z_0}{d_{pac} \cdot \cos(\gamma_0)}\right) \quad \omega \cdot \frac{180}{\pi} = 1.717 \quad - \text{кут нахилу гвинтові стружкової канавки}$$

$$\underline{T} := \frac{p_{x0}}{\tan(\omega)^2} \quad \underline{T} := \text{round}(T, 0) \quad T = 13991 \quad - \text{крок стружкових канавок}$$

$$\alpha_{x0} := \text{atan}\left(\frac{\tan(\alpha_{n0})}{\cos(\gamma_0)}\right) \quad \alpha_{x0} \cdot \frac{180}{\pi} = 20.008 \quad - \text{осьовий кут профілю для фрез з осьовими канавками}$$

$$\alpha_{x0L} := \text{atan}\left(\tan(\alpha_{x0}) + \frac{K_1 \cdot z}{T}\right)$$

$$\alpha_{x0L} \cdot \frac{180}{\pi} = 20.333 \quad - \text{осьовий кут профілю для лівої сторони фрез з осьовими канавками з правим напрямком витків}$$

$$\alpha_{x0R} := \text{atan}\left(\tan(\alpha_{x0}) - \frac{K_1 \cdot z}{T}\right)$$

$$\alpha_{x0R} \cdot \frac{180}{\pi} = 19.682 \quad - \text{осьовий кут профілю для правої сторони фрез з осьовими канавками з правим напрямком витків}$$

$$r_{x0} := \frac{c_{12}}{1 - \sin(\alpha_{n0})} \quad r_{x0} = 1.52 \quad - \text{радіус заокруглення вершини зуба фрези}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{ф}} &:= 0.3 \cdot m_{\text{н}} & \rho_{\text{ф}} &= 1.2 & - \text{радіус заокруглення профілю ніжки зуба} \\
 & & & & & \text{фрези} \\
 r &:= 5 & - \text{радіус заокруглення впадини} \\
 H &:= h_0 + r + 0.5 \cdot (K_1 + K_2) & H &= 22.5 \\
 \text{Приймаємо} & & H &:= 22.5 & - \text{глибина стружкової} \\
 & & & & & \text{канавки} \\
 t &:= 4 \cdot m_{\text{н}} & t &= 16 & - \text{товщина тіла фрези} \\
 d_{\text{отв}} &:= d_{\text{з0}} - 2 \cdot H - 2 \cdot t & d_{\text{отв}} &= 68 \\
 \text{Приймаємо} & & d_{\text{отв}} &:= 70 & - \text{діаметр посадочного отвору фрези} \\
 D_6 &:= d_{\text{з0}} - 2 \cdot H - 5 & D_6 &= 95 & - \text{діаметр буртиків фрези} \\
 n &:= 6 & - \text{число осьових перестановок фрези} \\
 l &:= \frac{h_1}{2 \cdot \tan(\alpha_{\text{н0}})} + \sqrt{(d_{\text{з1}} - h_1) \cdot h_1} + (n + 2) \cdot \rho_{\text{з0}} & l &:= \text{round}(l, 0) \\
 l &= 147 & - \text{довжина нарізаної частини фрези} \\
 \gamma &:= 0 & - \text{передній кут фрези} \\
 \Theta &:= 18 \cdot \frac{\pi}{180} & - \text{кут стружкової канавки}
 \end{aligned}$$