

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»

Завідувач кафедри

Машинобудування, мехатроніки і
робототехніки

канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

« _____ » _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти

на тему:

**Забезпечення зубообробки необхідної якості з розрахунком та
конструюванням черв'ячної фрези**

Виконав здобувач вищої освіти

4 курсу групи ПМ(ТМ)-21

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

спеціальності 131 «Прикладна механіка»

_____ Вячеслав КОВАЛЬОВ

Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр ЛИСЕНКО

Рецензент: канд. техн. наук, доцент

_____ Олег БЕВЗ

Кропивницький 2025

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри машинобудування,
мехатроніки і робототехніки
канд. техн. наук, доцент

_____ Андрій ГРЕЧКА

«___» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
За першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
Ковальову Вячеславу Павловичу

Тема роботи:

Забезпечення зубообробки необхідної якості з розрахунком та конструюванням черв'ячної фрези

Керівник роботи:

канд. техн. наук, доцент Олександр Лисенко

Затверджено наказом ЦНТУ від 20 січня 2025 року № 237-02.

Строк подання роботи до захисту:

12 червня 2025 р.

Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Мета: аналіз способів обробки евольвентних зубчастих коліс з розробкою та проектуванням конструкції інструменту черв'ячна фреза

Завдання:

- проаналізувати технологічність деталі типу зубчасте колесо;
- проаналізувати способи обробки евольвентних зубчастих коліс;
- спроектувати та розрахувати конструкцію внутрішньої шліцьової протяжки;
- спроектувати та розрахувати конструкцію черв'ячної фрези;
- виконати креслення внутрішньої шліцьової протяжки та черв'ячної фрези.

Календарний план

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

Дата видачі завдання: «22» січня 2025р.

Здобувач вищої освіти _____

Вячеслав КОВАЛЬОВ

Керівник роботи _____

Олександр ЛИСЕНКО

АНОТАЦІЯ

Ковальов, В.П. Забезпечення зубообробки необхідної якості з розрахунком та конструюванням черв'ячної фрези: кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 131 Прикладна механіка / наук. кер. О. В. Лисенко; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2025.– 56 с.

Креслеників – разом 3 аркуші формату А1.

Метою роботи є аналіз способів обробки евольвентних зубчастих коліс з розробкою та проектуванням конструкції інструменту черв'ячна фреза.

Актуальність роботи полягає у забезпеченні вирішення виробничої задачі розрахунку та проектування інструментального забезпечення обробки зубчастих коліс евольвентного профілю.

Практична цінність. У кваліфікаційній роботі розглянуто особливості інструменту для зубообробки та обробки центрального посадкового отвору. Спроектовано та розраховано конструкцію внутрішньої шліцьової протяжки. Спроектувати та розрахувати конструкцію черв'ячної фрези.

Ключові слова: зубчасте колесо, евольвентний профіль, зубообробка, черв'ячна фреза, шліцьова протяжка.

ANNOTATION

Kovalyov, V.P. Ensuring tooth processing of the required quality with calculation and design of a worm cutter: qualification bachelor's thesis: Specialty 131 Applied Mechanics/Scientific Adviser O.V. Lysenko; Central Ukrainian National Technical University - Kropyvnytskyi: CNTU, 2025.– 56 p.

Drawings - 3 A1 sheets in total.

The purpose of the work is to analyze the methods of machining involute gears with the development and design of the worm milling tool design.

The relevance of the work is to provide a solution to the production problem of calculating and designing tooling for machining involute profile gears.

Practical value. The qualification work considers the features of the tool for gear machining and machining the central landing hole. The design of the internal spline broach is designed and calculated. To design and calculate the design of the worm milling cutter.

Keywords: gear wheel, involute profile, gear cutting, worm cutter, spline broach.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи на тему:

Забезпечення зубообробки необхідної якості з розрахунком та конструюванням черв'ячної фрези

КРБ.ПМ.25.28.11.00.00

Виконав здобувач вищої освіти
4 курсу групи ПМ(ТМ)-21
ОПП «Комп'ютерний інжиніринг технологій,
робототехніка і 3D-друк»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
_____ Вячеслав КОВАЛЬОВ

Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр ЛИСЕНКО

Кропивницький 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС	9
1.1. Аналіз технологічності зубчастого колеса як деталі	9
1.2. Характерні особливості конструкцій внутрішніх протяжок	12
1.3. Реалізація методів нарізання зубів на зубчастих колесах	15
1.4. Копіювальний інструмент для нарізання зубчатих коліс	18
1.5. Обкатний інструмент для обробки зубчатих коліс	21
2. ВНУТРІШНЯ ШЛІЦЬОВА ПРОТЯЖКА: ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК	25
2.1. Загальні позначення змінних до розрахунку внутрішньої протяжки	25
2.2. Проектувальний розрахунок внутрішньої шліцевої протяжки	26
2.3. Практичний розрахунок внутрішньої шліцевої протяжки	33
3. ЧЕРВ'ЯЧНА МОДУЛЬНА ФРЕЗА. КОНСТРУЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК	43
3.1. Загальні характеристика та послідовність розрахунку черв'ячної фрези	43
3.2. Параметри евольвентної циліндричної передачі зовнішнього зачеплення	43
3.3. Розрахунок параметрів висхідного виробного черв'яка фрези.....	45
3.4. Розрахунок розмірів різальної частини черв'ячної фрези.....	47
3.5. Практичний розрахунок модульної черв'ячної фрези.....	49
ВИСНОВКИ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	54

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 центрального посадкового отвору колеса доцільно використовувати внутрішню шліцьову протяжку, оскільки вона дозволяє за один робочий хід виконати повну обробку та нарізати шліці в отворі.

Протяжка являє собою багатолезовий різальний інструмент, конструкція якого передбачає послідовне розташування лез із наростаючим виступом у напрямку, перпендикулярному до головного руху різання. Призначена для обробки деталей за рахунок поступального головного руху за відсутності подачі, протяжка забезпечує високу продуктивність процесу.

Водночас протяжка є металоємним, технологічно складним у виготовленні та, відповідно, дорогим інструментом. Економічна доцільність її застосування обґрунтовується лише за умови раціонального проектування конструктивних елементів, дотримання оптимальних режимів різання, високої якості виготовлення інструменту та належної експлуатації.

Нарізають зуби зубчастих коліс різними інструментами, але перевагу надають тим, що працюють за методом обкатування імітуючи зубчасті зачеплення, зокрема черв'ячним модульним фрезам, які імітують черв'ячне зачеплення черв'як – зубчасте колесо. Подібні інструменти дозволяють отримати

евольвентний профіль заданої якості з порівняно високою продуктивністю обробки.

Черв'ячна фреза є багатолезовим різальним інструментом із ріжучими зубами, призначеним для нарізання зубчастих коліс з евольвентним профілем методом обкатки. Назва інструмента зумовлена принципом його роботи, який ґрунтується на кінематиці зачеплення черв'яка з черв'ячним колесом.

Залежно від призначення, черв'ячні фрези поділяють на чорнові – для попередньої обробки, чистові – для остаточного формування профілю, та прецизійні – для досягнення підвищеної точності обробки. За кількістю заходів інструменти поділяються на однозаходні та багатозаходні, а за напрямом витків – на правозаходні та лівозаходні. За конструктивним виконанням черв'ячні фрези бувають цільними або складеними.

Метою роботи є аналіз способів обробки евольвентних зубчастих коліс з розробкою та проектуванням конструкції інструменту черв'ячна фреза.

Актуальність роботи полягає у забезпеченні вирішення виробничої задачі розрахунку та проектування інструментального забезпечення обробки зубчастих коліс евольвентного профілю.

Практична цінність. У кваліфікаційній роботі розглянуто особливості інструменту для зубообробки та обробки центрального посадкового отвору. Спроектовано та розраховано конструкцію внутрішньої шліцьової протяжки. Спроекувати та розрахувати конструкцію черв'ячної фрези.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

1.1. Аналіз технологічності зубчастого колеса як деталі

Циліндричне зубчасте колесо – це плоске тіло у формі диска, по зовнішній циліндричній поверхні якого рівномірно розташована замкнена система зубів. Зубами називають виступи, сформовані на тілі колеса, які призначені для передачі обертального руху шляхом зчеплення з відповідними виступами (зубами) іншого зубчастого колеса (рис. 1.1).

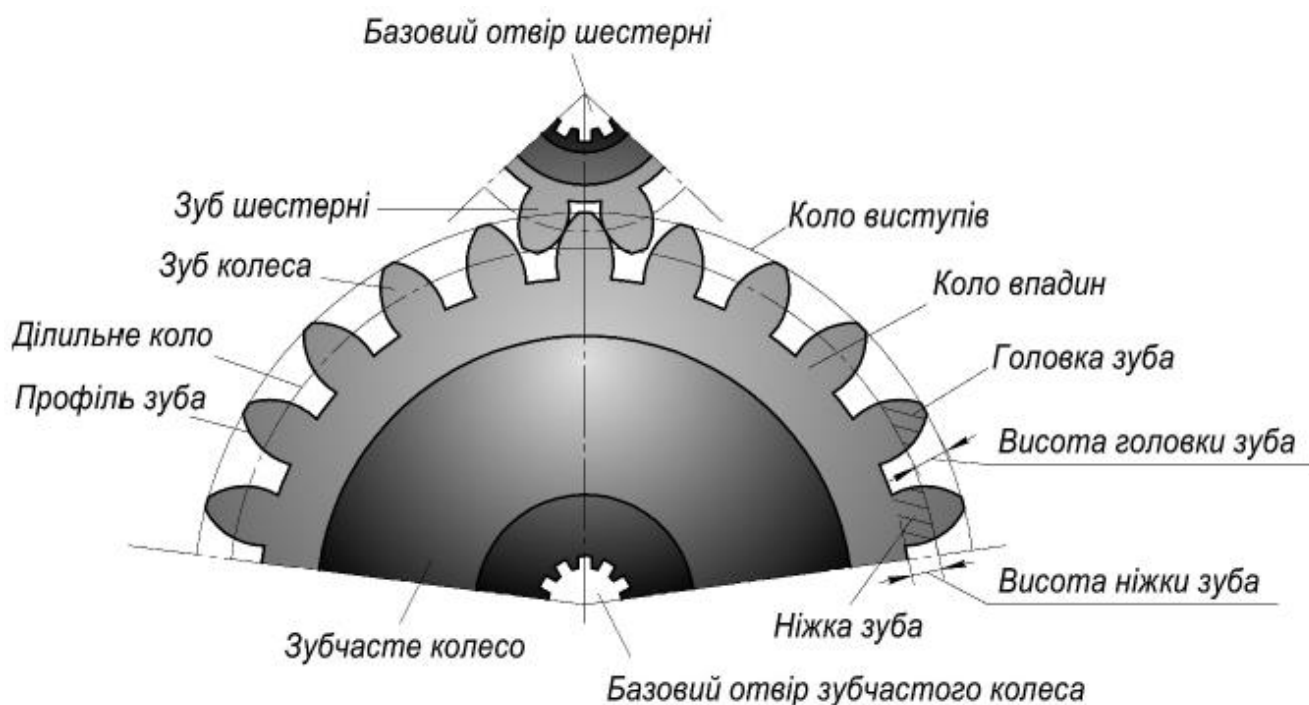


Рисунок 1.1 – Загальна схема зубчастого зачеплення коліс, що мають евольвентний профіль зубів

Зубчасте колесо складається з корпусу (тіла) та зубчастого вінця. Поверхню, яка розмежовує зубчастий вінець і основну частину корпусу колеса, прийнято називати поверхнею западин. У циліндричних зубчастих колесах зубчастий вінець розташовується між поверхнею западин та поверхнею вершин зубів.

Згідно з практикою машинобудівних підприємств [1, 7, 21, 22, 24, 25], для виготовлення зубчастих коліс переважно застосовують сталі – як вуглецеві, так і леговані. В окремих випадках, з урахуванням конструктивних особливостей та експлуатаційних вимог, зубчасті колеса можуть виготовлятися також із чавуну, бронзи, пластмас та інших матеріалів.

До основних експлуатаційних вимог, особливо для високоточних зубчастих коліс, належать стабільність геометричних розмірів та висока точність. Це, у свою чергу, обумовлює жорсткі вимоги до матеріалу за однорідністю та станом внутрішніх напружень. У реальних виробничих умовах повністю усунути залишкові напруження майже неможливо, тому важливо забезпечити їх рівновагу та мінімізувати деформації після обробки.

Виходячи з наведених вимог, для виготовлення зубчастих коліс частіше надається перевага легованим сталям, які в процесі обробки деформуються менше порівняно з вуглецевими, хоча мають вищу вартість. Для виготовлення коліс 5–6 ступенів точності широко використовуються сталі марок 20Х, 12ХНЗА, 25ХГТ (із наступною термічною обробкою — нітроцементациєю), 18ХГТ (цементация), 40Х, 40ХФА (гартування). Вуглецеві сталі, такі як 15 і 20, зазвичай піддають цементациї, а сталі 40 і 45 – гартуванню.

У випадку виготовлення зубчастих коліс з маточиною (рис. 1.2) технологічний процес, як правило, починається з обробки центрального посадкового отвору, який використовується як подвійна напрямна база, та торцевої поверхні, що служить опорною базою. Усі наступні операції обробки здійснюються відносно цих базових поверхонь.

При обробці плоских зубчастих коліс, які мають велику площу торцевої поверхні та малу ширину зубчастого вінця, технологічний процес починається з базової торцевої поверхні (що використовується як установча база) та центрального отвору (що виконує роль подвійної опорної бази).

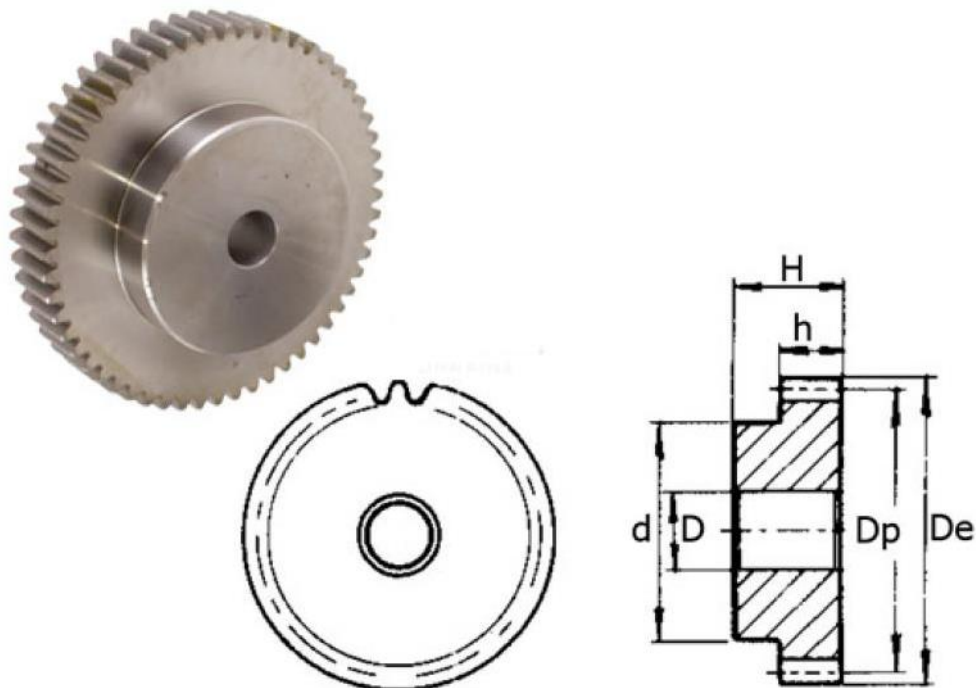


Рисунок 1.2 – Зубчасте колесо $m = 3$ мм $z = 12$ з маточиною ($D = 13 \dots 16$ мм)

При виборі базових поверхонь для встановлення зубчастого колеса в процесі обробки суттєве значення має спосіб його подальшого базування під час монтажу на вал, а також в умовах експлуатації в складі механізму або вузла. Ключовим фактором при цьому виступає тип посадкового центрального отвору – циліндричний або шліцьовий.

У разі, якщо зубчасте колесо має циліндричний внутрішній посадковий отвір (рис. 1.3), то при обробці заготовка базується за допомогою точної оправки, що забезпечує високу співвісність отвору та зубчастого вінця.



Рисунок 1.3 – Приклад зубчастого колеса з посадковим отвором циліндр

У випадку, якщо посадковий центральний отвір зубчастого колеса має шліци прямокутного профілю (рис. 1.4), центрування заготовки при обробці здійснюється або по найбільшому, або по найменшому діаметру шліцьового з'єднання, або ж по бічних поверхнях шліців. Вибір базової поверхні залежить від вимог до точності з'єднання та умов подальшої експлуатації деталі.



Рисунок 1.4 – Приклади конструкцій зубчастих коліс з посадковими отворами зі шліцями

1.2. Характерні особливості конструкцій внутрішніх протяжок

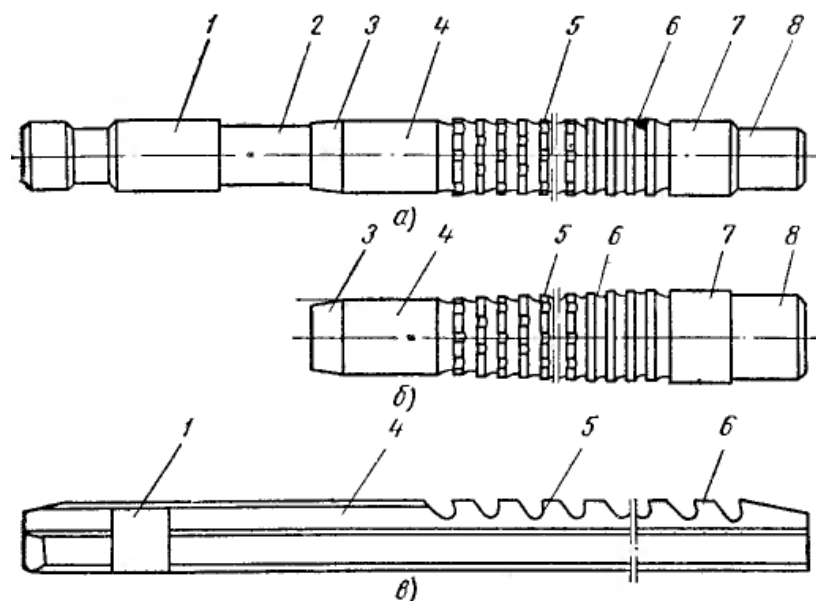
Залежно від характеру операції розрізняють два види інструментів: протяжки та прошивки. При протягуванні використовується протяжка — інструмент у вигляді довгого стрижня з послідовно розташованими ріжучими зубами, розміри яких поступово збільшуються. У цьому випадку інструмент працює на розтягування. Натомість при прошиванні застосовується прошивка, яка проштовхується через оброблюваний отвір, працюючи на стиск і поздовжній вигин [3, 4, 13].

Внутрішні протяжки (цільні або збірні) класифікують за формою отвору, що обробляється. Вони можуть бути круглими, багатогранними, шліцьовими, шпонковими тощо.

Незалежно від типу, внутрішні протяжки мають низку спільних конструктивних елементів (рис. 1.5). Прошивки, на відміну від протяжок, не

мають хвостової частини, оскільки встановлюються у верстат шляхом натиску штока на торець цапфи задньої напрямної.

Хвостовик (поз. 1 на рис. 1.5) призначений для з'єднання протяжки з робочою кареткою протяжного верстата за допомогою патрона. Його конструктивне виконання залежить від типу протяжки та конфігурації патрона.



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

Рисунок 1.5 – Конструктивні частини прошивок та протяжок

Шийка (поз. 2) та перехідний конус (поз. 3) забезпечують з'єднання між хвостовою та напрямною частинами протяжки. Як правило, на шийці розміщується маркування інструмента. У деяких випадках, зокрема для окремих типів хвостовиків, а також у шпонкових і плоских протяжках, шийка як окремий елемент не виконується, а конструктивно поєднується з хвостовиком в єдине ціле.

Передня напрямна частина протяжки (поз. 4) призначена для початкового встановлення оброблюваної деталі на інструмент, а також для забезпечення її направлення та центрування по осі. Поперечний переріз цієї частини відповідає розмірам і формі отвору деталі до початку процесу протягування.

Ріжуча частина протяжки (поз. 5) призначена для видалення припуску, залишеного на отвір під час попередньої обробки. Вона складається з послідовного ряду ріжучих зубів, кожен із яких знімає шар матеріалу визначеного перерізу. Залежно від величини подачі на зуб, ріжучі елементи поділяються на

обдирні (чорнові), перехідні та чистові. Кількість зубів ріжучої частини визначається величиною припуску, значенням подачі на зуб і вибраною схемою різання.

Чорнові зуби зрізають основну частину припуску. Перехідні зуби забезпечують плавний перехід між чорновими та чистовими зубами, зменшуючи різальні навантаження й згладжуючи нерівності поверхні, що дозволяє знизити зношування чистових зубів і підвищити їхню стійкість. Чистові зуби виконують остаточне формування отвору, забезпечуючи задану точність і шорсткість поверхні.

Калібрувальна частина (поз. 6) включає обмежену кількість зубів однакового профілю та розмірів, що відповідають остаточним параметрам готового отвору.

Задня напрямна частина протяжки (поз. 7) виконує функцію стабілізації положення деталі відносно протяжки під час завершальної фази обробки. Вона запобігає перекосу заготовки та пошкодженню вже обробленої поверхні у момент виходу останніх зубів калібрувальної частини з отвору. Для плоских шпонкових протяжок задня напрямна, як правило, не передбачається. Поперечні розміри цієї частини повинні відповідати мінімально допустимому розміру готового отвору.

У випадку застосування дуже довгих і важких протяжок конструктивно передбачена опорна цапфа (поз. 8), розташована в задній напрямній частині. Вона слугує для підтримання протяжки за допомогою люнета, який ковзає по напрямних корита протяжного верстата. Така підтримка необхідна як під час робочого ходу, для забезпечення точного напрямку та центрування протяжки, так і при зворотному ході – для утримання інструмента у стабільному положенні перед початком нового циклу.

У багатьох випадках протяжка обладнана заднім хвостовиком, ідентичним за формою та розмірами до переднього. Це забезпечує можливість захоплення інструмента патроном каретки при зворотному ході верстата, особливо на обладнанні з автоматичним або напівавтоматичним робочим циклом.

Загальна довжина протяжки визначається як сума довжин усіх її конструктивних елементів. Цей параметр повинен відповідати як

експлуатаційним вимогам, так і технологічним обмеженням щодо виготовлення інструмента. Довжина не має перевищувати максимально допустимого ходу повзуна протяжного верстата та має узгоджуватись із габаритами заготовок, які планується обробляти на наявному обладнанні.

Граничне відношення довжини протяжки до її зовнішнього діаметра залежить від габаритів інструмента:

- для протяжок малих розмірів — не більше ніж 55:1;
- для протяжок середніх розмірів — до 40:1;
- для великих протяжок — до 30:1.

Особливістю шліцьових протяжок (рис. 1.6) є їхнє призначення для обробки внутрішніх шліцьових з'єднань. Вони мають ту ж загальну конструкцію, що й круглі протяжки, однак відрізняються формою ріжучої та напрямних частин. Робоча частина шліцьової протяжки оснащена ріжучими виступами та виїмками, які формують у циліндричному отворі заготовки прямобічні або евольвентні шліці відповідно до вимог креслення.



Рисунок 1.6 – Приклад конструкції шліцьової протяжки $D10 \times 72 \times 82$ 1 75-150 P6M5

1.3. Реалізація методів нарізання зубів на зубчастих колесах

Основним методом виготовлення зубчастих коліс є механічна обробка різанням. У разі невисоких вимог до точності допускається виготовлення

зубчастих коліс методом лиття, а для коліс із малим модулем застосовують також метод накочування [5, 8, 9, 10, 18-20, 23].

Формування профілю зубів за допомогою лезового інструменту може здійснюватися двома основними способами: методом копіювання та методом обкатування.

При копіювальному методі профіль різального інструмента безпосередньо відповідає формі западини зубчастого колеса, що виготовляється. Для цього використовують модульні фрези – пальцеві або дискові (рис. 1.7), які відтворюють необхідну геометрію западини.

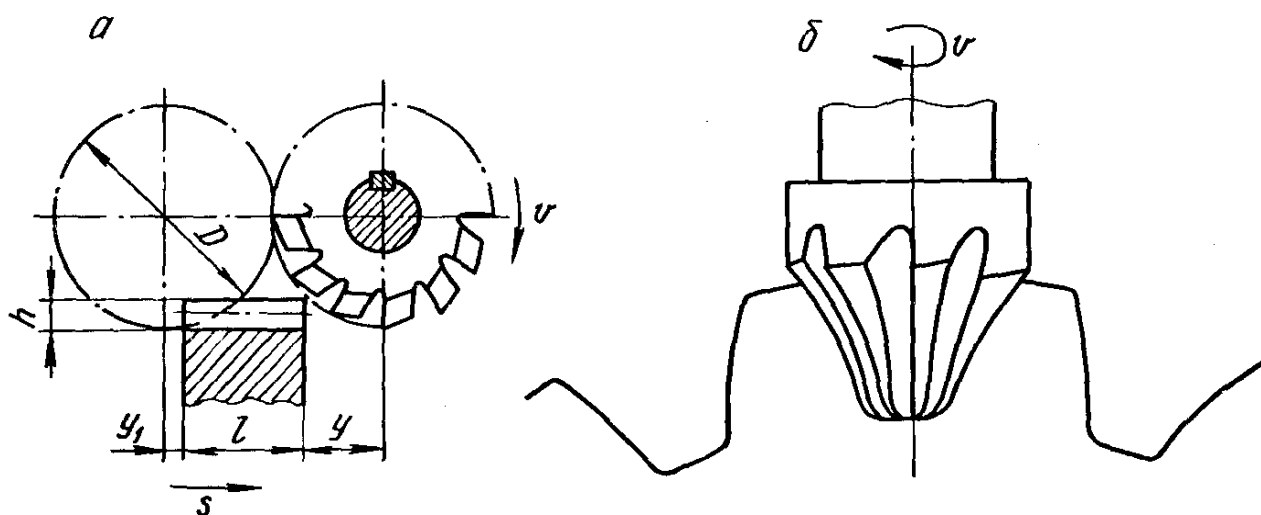


Рисунок 1.7 – Нарізання зубців фасонними модульними фрезами:

а) дисковими; б) пальцевими

До основних недоліків методу копіювання при нарізуванні зубчастих коліс належать порівняно низька точність обробки, невисока продуктивність, а також необхідність використання комплектів модульних фрез для кожного значення модуля зубчастого зачеплення. Такі набори можуть складатися з 8, 15 або 26 фрез залежно від діапазону зубчастих коліс, що виготовляються.

Нарізування зубчастих коліс методом обкатування (рис. 1.8) базується на принципі імітації роботи реального зачеплення. Так, для обробки циліндричних зубчастих коліс застосовують довбачі, які відтворюють дію зубчастої пари, а для черв'ячних передач – черв'ячні модульні фрези.

Метод обкатки також реалізується за допомогою стругальних, довбальних або обкатних різців, що забезпечує високу точність форми зуба та рівномірність профілю. Цей метод значно перевершує копіювання за точністю, стабільністю результатів і продуктивністю.

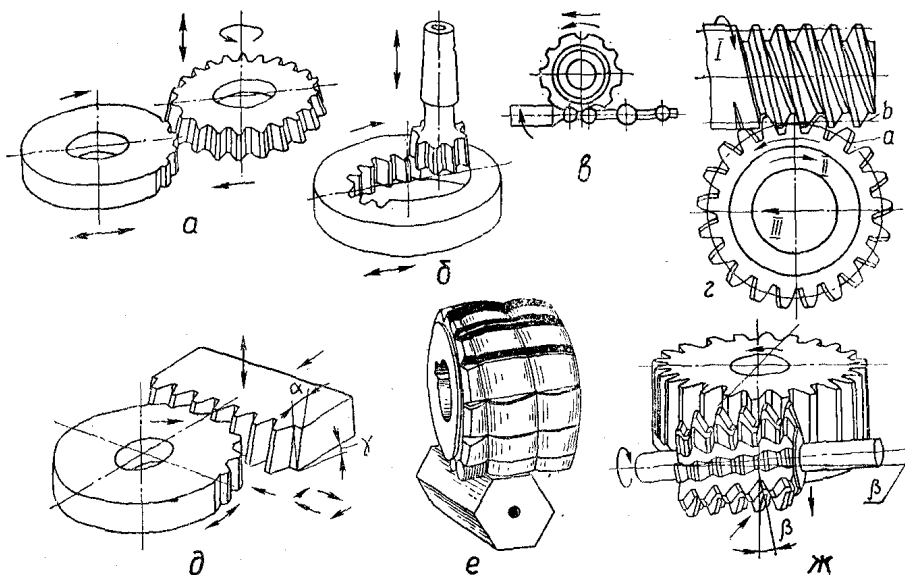


Рисунок 1.8 – Існуючі схеми обробки методом обкачування

Завдяки високій продуктивності, значного поширення в машинобудуванні набули черв'ячні фрези. Вони широко застосовуються для обробки циліндричних фасонних поверхонь, зокрема зубчастих коліс із прямим зубом. У процесі зубофрезерування як фреза, так і заготовка обертаються навколо своїх осей, а також відбувається поступальний рух подачі фрези вздовж осі заготовки (рис. 1.8, ж, е).

Обертальні рухи фрези та заготовки кінематично взаємопов'язані. Для однозаходної черв'ячної фрези один її оберт відповідає повороту заготовки на один зуб. Черв'ячна фреза конструктивно є вихідним черв'яком, модифікованим у різальний інструмент шляхом нарізання стружкових канавок і затилування зубів. У процесі обробки відтворюється зачеплення між вихідним черв'яком та оброблюваною деталлю, аналогічне роботі черв'ячної пари.

Процес зубофрезерування черв'ячною фрезою є безперервним, що забезпечує високу продуктивність і стабільність результатів, роблячи цей метод ефективним у серійному та масовому виробництві.

На рис. 1.9 представлено кінематичну схему роботи довбального інструмента (довбача), де зазначено основні рухи інструмента та заготовки в процесі нарізання зубів.

Основні етапи процесу мають такий вигляд:

I – поступальне врізання (подача довбача в матеріал заготовки);

II – обертання довбача навколо власної осі;

III – обертання заготовки навколо своєї осі (синхронізоване з рухом довбача);

IV – робочий хід довбача (різання) та зворотний хід (холостий);

V – на початку зворотного ходу заготовка відсувається від довбача з метою уникнення тертя зубів інструмента об поверхню отвору; наприкінці холостого ходу заготовка повертається у вихідне положення.

Ця послідовність рухів дозволяє реалізувати метод обкатування за допомогою довбального інструмента та забезпечити належну точність і якість обробки зубчастих коліс.

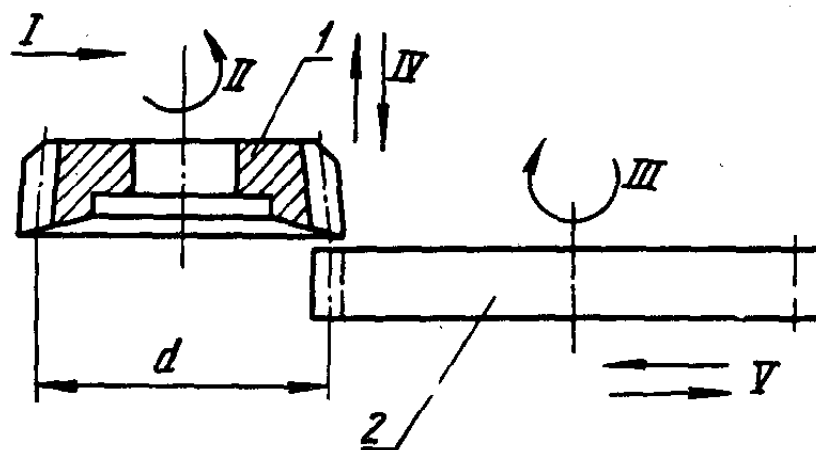


Рисунок 1.9 – Кінематика нарізання зубів довбачем:

1 – довбач; 2 – колесо

1.4. Копіювальний інструмент для нарізання зубчастих коліс

Дискові та пальцеві зуборізні фрези (рис. 1.10), а також головки контурного зубодовбання належать до інструментів, що працюють за методом

копіювання. Профіль їхніх ріжучих зубів відповідає профілю западини зубчастого колеса, яке підлягає обробці.

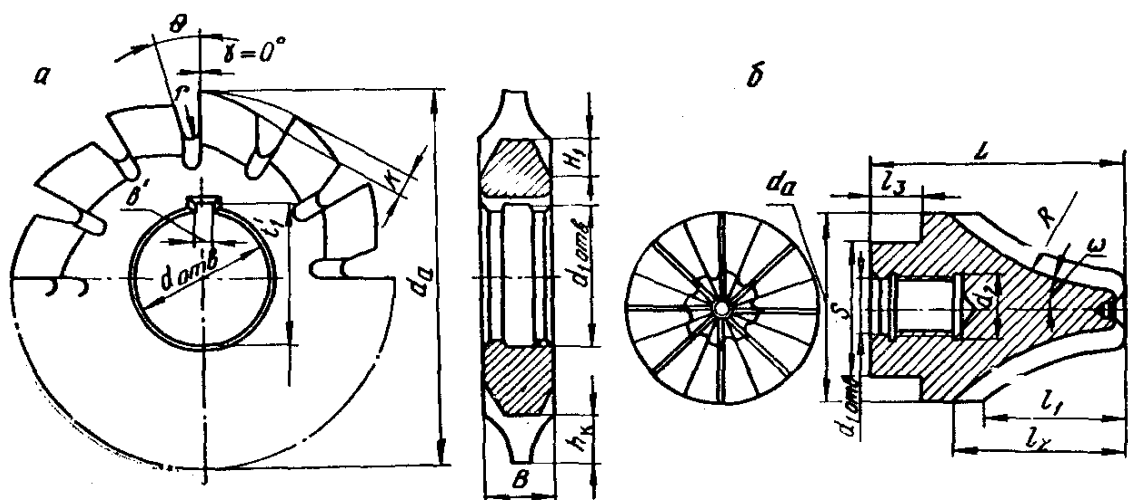


Рисунок 1.10 – Конструктивні елементи фасонних модульних фрез:
а) дискових; б) пальцевих

Пальцеві модульні фрези застосовують лише в тих випадках, коли використання дискових фрез технічно неможливе. Це обумовлено відносно низькою твердістю пальцевих фрез, яка не дозволяє реалізовувати великі подачі при обробці.

Як дискові, так і пальцеві модульні фрези виготовляються комплектами: для модулів до 10 мм — у наборі з 8 фрез, для більших модулів — у комплекті з 15 фрез. Кожна фреза в наборі призначена для нарізання коліс певного модуля, але з різною кількістю зубів.

Використання тієї ж фрези для обробки зубчастих коліс з іншою кількістю зубів призводить до погрешностей профілю, що, своєю чергою, знижує точність готового виробу. Таким чином, метод копіювання, хоч і простий у реалізації, має обмеження за точністю та універсальністю.

Для нарізування зубчастих коліс із модулем $m > 4$ доцільно застосовувати обдирні модульні фрези, які мають конструкцію із чергуванням прорізних (східчастих) та зачисних зубів (рис. 1.11). Така будова інструмента дозволяє ефективно знімати припуск у кілька етапів, покращуючи умови різання та знижуючи навантаження на кожен окремий зуб фрези.

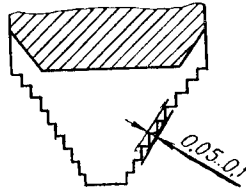


Рисунок 1.11 – Прорізний зуб дискової чорнової модульної фрези

З метою економного використання швидкорізальної сталі, особливо при виготовленні дискових фрез великих розмірів, рекомендується застосовувати збірні конструкції. Це дозволяє не лише зменшити витрату дорогого інструментального матеріалу, а й спрощує технічне обслуговування та заміну зношених частин інструмента.

Східчаста форма прорізних зубів сприяє надійному дробленню стружки під час обробки, що дозволяє знизити сили різання та покращити умови стружкоутворення. Для чорнових дискових модульних фрез рекомендується встановлювати передній кут γ_v у межах $8...12^\circ$, причому куточки зубів виконуються із заокругленням по заданому радіусу для зменшення напружень у зонах переходу.

У випадку чистових модульних дискових фрез передній кут, як правило, приймається рівним $\gamma_v = 0^\circ$. Однак якщо конструкція інструмента передбачає ненульовий передній кут ($\gamma_v \neq 0^\circ$), необхідно виконати коригувальний розрахунок профілю різальної частини, аналогічно до методики, яка застосовується для фасонних фрез. Це забезпечує збереження точності профілю нарізуваних зубів.

Головки контурного зубодовбання працюють за методом копіювання, однак характеризуються високою продуктивністю, оскільки забезпечують одночасне нарізування всіх западин зубчастого колеса (рис. 1.12). Ріжучими елементами головки є фасонні різці (поз. 3), профіль яких відповідає формі западини прямозубого циліндричного колеса. Різці встановлюються в радіальні пази корпуса або розвідного кільця (поз. 1). Після завершення кожного робочого ходу різці автоматично відводяться, а на початку наступного робочого ходу подаються в радіальному напрямку за допомогою зворотного (звідного) кільця (поз. 2). У процесі робочого руху заготовки (поз. 4) відбувається довбання западин одночасно по всій ширині вінця. Така організація процесу дозволяє значно скоротити час обробки та забезпечити високу точність профілю.

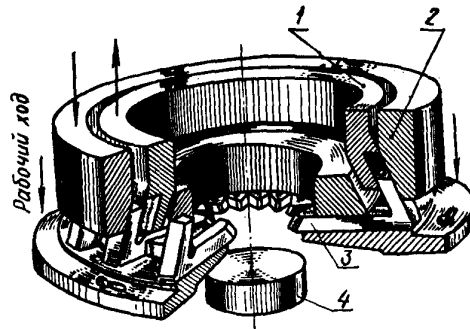


Рисунок 1.12 – Зуборізна головка з різцями для контурного зубодовбання

Незважаючи на складність конструкції, головки контурного зубодовбання знаходять застосування в умовах масового виробництва завдяки високій продуктивності процесу нарізування прямозубих циліндричних коліс. Висока ефективність досягається за рахунок безперервності процесу та можливості автоматизації, що компенсує складність інструменту.

1.5. Обкатний інструмент для обробки зубчатих коліс

Зуборізні довбачі працюють за методом обкатування. На відміну від черв'ячних фрез, конструкція довбача базується не на прямозубій рейці, а на шестірні з відповідними геометричними параметрами профілю.

Хоча продуктивність обробки довбачами дещо нижча порівняно з черв'ячними фрезами, вони мають значно ширші технологічні можливості. Зокрема, довбачами можна обробляти такі типи коліс, які не піддаються нарізанню черв'ячними фрезами: багатоступінчасті блоки коліс, шевронні колеса, колеса з внутрішнім зачепленням тощо.

Крім того, довбачі забезпечують вищу точність профілю зубів порівняно з методом зубофрезерування, що робить їх незамінними у випадках, коли потрібна підвищена точність та якість поверхні.

Залежно від характеру оброблюваних деталей зуборізні довбачі поділяються на три основні групи:

- прямозубі довбачі – призначені для нарізування прямозубих циліндричних коліс.

- косозубі довбачі – використовуються для обробки коліс із гвинтовим (косим) зубом, а також шевронних зубчастих коліс.

– спеціальні довбачі – застосовуються для нарізання зубчастих деталей із неевольвентним профілем, таких як зірочки, шліцьові вали та інші елементи нетипових зачеплень.

За конструкцією довбачі класифікуються (рис. 1.13):

- 1) дискові (рис. 13, *a*) – застосовуються для коліс внутрішнього й зовнішнього зачеплення при більших діаметрах;
- 2) хвостові (рис. 13, *б*) – для коліс внутрішнього зачеплення малого діаметра, де неприпустимі застосування й виготовлення дискового довбача;
- 3) чашкові (рис. 13, *в*) – для нарізування зубів в упор;
- 4) втулкові (рис. 13, *г*) є видозміненим типом хвостового довбача;
- 5) складальні (рис. 13, *д*);
- б) комбіновані – для чорнової й чистової обробок.

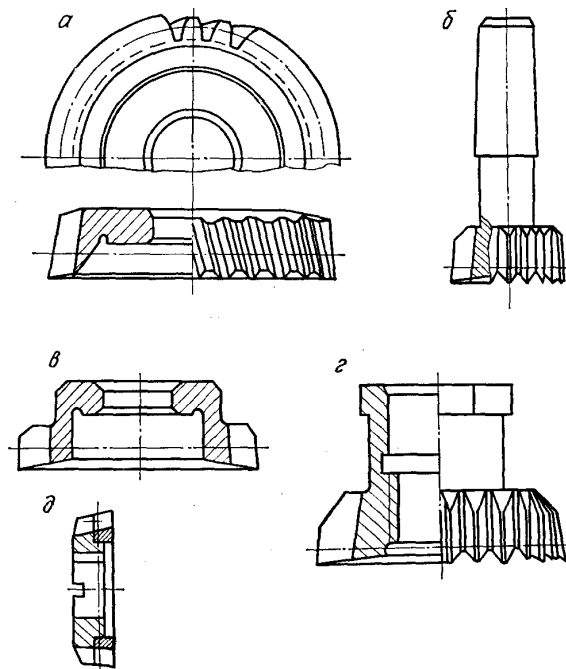


Рисунок 1.13 – Особливості конструкцій довбачей:

а) дискових; б) хвостових; в) чашкових; г) втулкових; д) складальних

За класом точності зуборізні довбачі поділяються на класи АА, А та В. Для забезпечення ефективного процесу різання довбачу надають спеціально модифіковану форму, яка відрізняється від геометрії звичайного зубчастого колеса. Це забезпечує утворення правильного профілю зуба під час обкатування.

Черв'ячні фрези, за технологічними ознаками, поділяються на дві основні групи:

1. Фрези для нарізування циліндричних коліс – чорнові та чистові. Вони відрізняються числом заходів, геометрією профілю та кутом нахилу стружкових канавок.

2. Фрези для нарізування черв'ячних коліс – з подачею в радіальному або тангенціальному напрямках.

Залежно від вимог до точності обробки, черв'ячні фрези виготовляють у чотирьох класах точності: ААА, АА, А, В і С. Вибір класу залежить від необхідного ступеня точності зубчастого колеса (від 6 до 10-го ступеня). Посадкові отвори фрез виконуються за посадками: 0,5Н6, 0,7Н6, Н6 або Н7 відповідно до класу точності:

– для нарізування коліс 7-9-го ступеня точності застосовують фрези класів АА, А та В.

– для 10-го ступеня точності допускається використання фрез класу С.

Черв'ячна фреза (рис. 1.14, а) конструктивно являє собою черв'як зі стружковими канавками, нахиленими під кутом β до осі фрези. Таке розташування утворює ріжучі зуби, які формують профіль западин у заготовці в процесі обкатування.

Зуби модульної фрези мають одне периферійне та два бічні ріжучі леза. Передня поверхня кожного зуба є гвинтовою, тоді як задні поверхні виконані зі спіральним затилуванням за спіраллю Архімеда.

У чистових модульних фрез периферійне ріжуче лезо має передній кут $\gamma = 0^\circ$, тоді як у чорнових фрез цей кут становить $5...10^\circ$. Зі збільшенням переднього кута γ поліпшуються умови різання (зменшуються сили різання, поліпшується відведення стружки), проте це може призводити до спотворення профілю зубів нарізуваного колеса.

Задні кути бічних ріжучих лез ($\alpha_{б.н.}$) зазвичай приймаються в межах $3...4^\circ$, що забезпечує необхідний задній зазор для стабільної роботи інструмента.

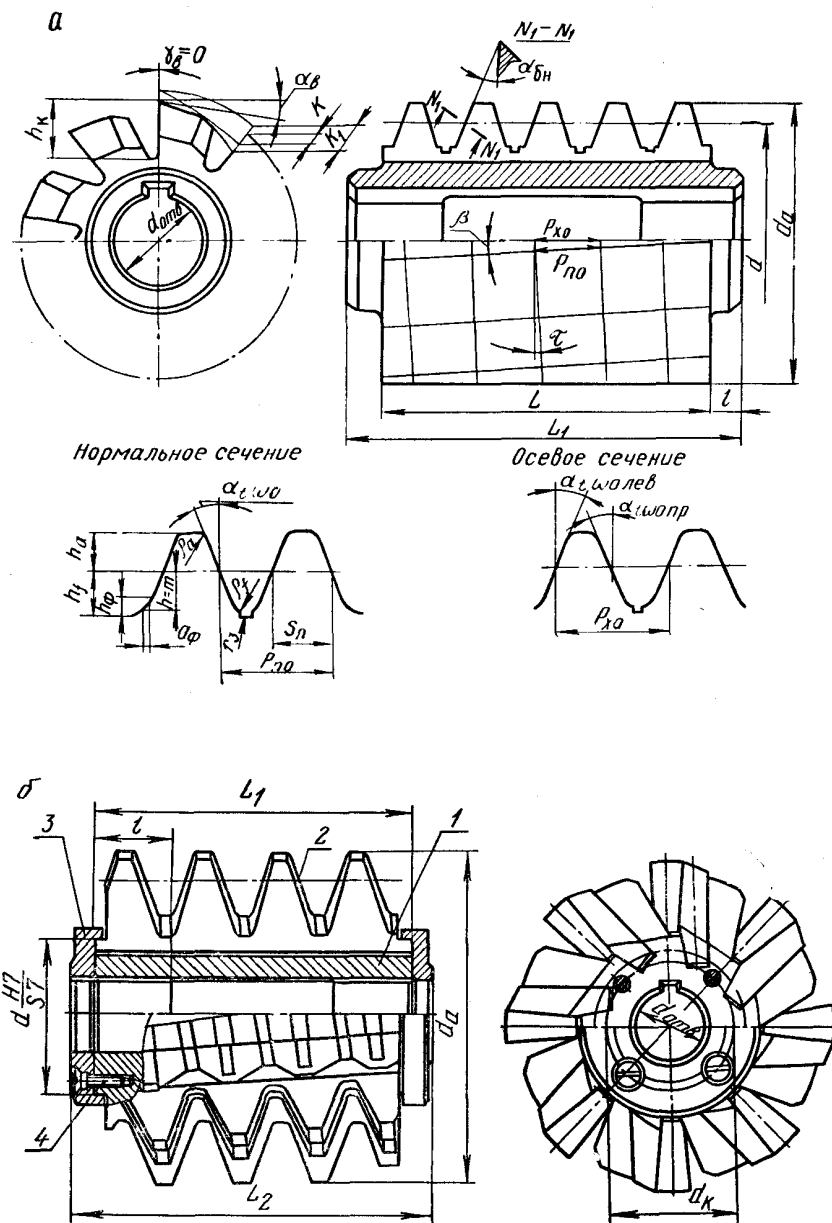


Рисунок 1.14 – Геометричні параметри та конструктивні елементи черв'ячних фрез: а) цільної; б) складальної

Черв'ячні фрези, призначені для нарізування циліндричних зубчастих коліс із модулем 10 мм і більше, доцільно виготовляти лише в збірному виконанні. Це дозволяє значно зменшити витрати швидкорізальної сталі, яка є дорогою та складною в обробці. Крім того, для фрез великого діаметра виготовлення цільних поковок зі швидкорізальної сталі є технічно складним або практично неможливим без втрати якості.

2. ВНУТРІШНЯ ШЛІЦЬОВА ПРОТЯЖКА: ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК

2.1. Загальні позначення змінних до розрахунку внутрішньої протяжки

В цьому розділі проводимо розрахунок та конструювання протяжки для обробки шліцевого отвору [2, 6, 11, 12, 16].

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 шліцевого отвору;

d – внутрішній діаметр шліцевого отвору;

b – ширина шліцевого 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 шліцевих 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;

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

Q – тягова сила верстата;

σ_{pp} – допустимі напруження в небезпечному перерізі;

V – швидкість різання;

γ , α - передній і задній кути;

a – ширина викружки;

n – число викружок.

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

2.2. Проектувальний розрахунок внутрішньої 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 γ і заднього α 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_c, s_c, A_c . 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 $P_{xв}$, тяговою силою верстата Q і небезпечним перерізом протяжки $P_{неб}$:

$$P_{ст} = (0.8...0.9)Q;$$

$$P_{неб} = F_{неб} \sigma_{pp}.$$

Значення σ_{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:

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

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

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

на шліцьовій частині: $p = nb_{ш}$.

Для шліцьових 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 шліцьовій 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_{cmax} 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_{cmin} , 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

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

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:

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

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

$$t_{оув} = (l / z_{рум}) + 0.4$$

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 кожную 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 $A_{кп}$, $A_{шп}$ і чистові $A_{кч}$, $A_{шч}$ зубці круглої і шліцьової частин приймаються з таблиць довідників. Припуск на чорнові зубці:

$$A_{ок} = A_k - A_{кп} - A_{кч};$$

$$A_{шо} = A_{ш} - A_{шп} - A_{шч}.$$

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:

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

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

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

Кроки t_{ϕ} і t_k 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:

$$d_{nn} = D_{оmin}.$$

Відхилення d_{nn} приймаються по $\epsilon 8$.

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 напрямного конуса приймається в залежності від діаметра протяжки.

21. Розміри зубців протяжки.

Діаметр першого фасочного зуба, якщо фасочні зубці перші:

$$D_{\phi 1} = D_o + A_{ocm}.$$

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 шліцьового зуба:

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

Діаметри наступних чорнових шліцьових 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 шліцьових з першою фасочною частиною діаметр впадин фасочних і шліцьових зубців приймається $D_{\phi s} = D_{o\min}$ з відхиленнями по d11.

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

23. Розміри задньої напрямної.

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.

2.3. Практичний розрахунок внутрішньої шліцьової протяжки

Розрахунки проводимо за допомогою спеціалізованого математичного пакету MathCAD.

Вихідні дані:

Діаметр отвору до протягування	$D_o := 18$	$D_{o_{max}} := D_o + 0.52$
Зовнішній діаметр шліцьового отвору	$D := 25$	$D_{max} := D + 0.021$
Внутрішній діаметр шліцьового отвору	$d := 21$	$d_{max} := d + 0.13$
Ширина шліцьового пазу	$b := 5.03$	$b_{max} := b + 0.03$
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		$l_{зч} := 210$
Найбільший хід каретки чи повзуна	$l_{хд} := 1600$	

Діаметр хвостовика

$$d_{\text{хв}} := D_0 - 0.5$$

$$d_{\text{хв}} = 17.5$$

Приймаємо

$$d_{\text{хв}} := 18$$

$$F_{\text{хв}} := 132.7$$

Параметри чистової частини

Число зубців

$$z_{\text{чкр}} := 6$$

$$z_{\text{чш}} := 6$$

Припуск

$$A_{\text{чкр}} := 0.1$$

$$A_{\text{чш}} := 0.08$$

Число секцій

$$i_{\text{чкр}} := 3$$

$$i_{\text{чш}} := 3$$

Подача

$$s_{\text{чкр}_1} := 0.02$$

$$s_{\text{чш}_1} := 0.02$$

$$s_{\text{чкр}_2} := 0.02$$

$$s_{\text{чш}_2} := 0.01$$

$$s_{\text{чкр}_3} := 0.01$$

$$s_{\text{чш}_3} := 0.01$$

Подача чорнової частини

$$s_0 := 0.21$$

Глибина стружкової канавки

$$K := 3$$

з умови розміщення стружки

$$h := 1.13 \cdot \sqrt{1 \cdot s_0 \cdot K}$$

$$h = 6.947$$

з умови жорсткості

$$h_{\text{max}} := 0.3 \cdot D_0$$

$$h_{\text{max}} = 5.4$$

Приймаємо

$$h := 5.0$$

Перевіряємо і коригуємо подачу чорнової частини

$$s_{\text{omax}} := \text{round}\left(\frac{\pi \cdot h^2}{4 \cdot 1 \cdot K}, 2\right)$$

$$s_{\text{omax}} = 0.11$$

$$s_{0\text{max}} := \min(s_0, s_{\text{omax}})$$

$$s_0 = 0.11$$

Крок чорнових зубців

$$t_0 := 12$$

Число одночасно працюючих зубців

$$z_p := \frac{1}{t_0 - 0.4}$$

$$z_p = 5.172$$

$$z_p := \text{round}(z_p, 0)$$

$$z_p = 5$$

Робоча сила верстата

$$P_{\text{ст}} := 0.9 \cdot Q$$

$$P_{\text{ст}} = 352800$$

Сила, що допускається міцністю хвостовика

$$\sigma_{\text{хв}} := 300$$

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

$$P_{\text{хв}} = 39810$$

Сила, що допускається небезпечним перерізом протяжки

$$\sigma_{\text{пр}} := 400$$

$$P_{\text{пр}} := \text{round}\left[\frac{\pi \cdot (D_0 - h)^2}{4} \cdot \sigma_{\text{пр}}, 0\right]$$

$$P_{\text{пр}} = 53093$$

Сила різання

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

$$P_{\text{max}} = 39810$$

Периметр зрізу

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

Коефіцієнти, що враховують змінені умови роботи

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

Питома осьова сила різання

$$q_o := 258$$

Число зубців в секції

$$\begin{aligned} z_{сфo} &:= \frac{p_{\phi} \cdot q_o \cdot z_p \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}}{P_{max}} & z_{сфo} &= 1.095 \\ z_{скрo} &:= \frac{p_{кр} \cdot q_o \cdot z_p \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}}{P_{max}} & z_{скрo} &= 1.043 \\ z_{сшo} &:= \frac{p_{ш} \cdot q_o \cdot z_p \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}}{P_{max}} & z_{сшo} &= 0.984 \end{aligned}$$

Приймаємо

$$\begin{aligned} z_{сф_1} &:= \text{if}(z_{сфo} < 1, 1, \text{floor}(z_{сфo})) & z_{сф_2} &:= z_{сф_1} & z_{сф_3} &:= \text{ceil}(z_{сфo}) \\ z_{скр_1} &:= \text{if}(z_{скрo} < 2, 2, \text{floor}(z_{скрo})) & z_{скр_2} &:= z_{скр_1} & z_{скр_3} &:= \text{ceil}(z_{скрo}) \\ z_{сш_1} &:= \text{if}(z_{сшo} < 1, 1, \text{floor}(z_{сшo})) & z_{сш_2} &:= z_{сш_1} & z_{сш_3} &:= \text{ceil}(z_{сшo}) \end{aligned}$$

$$q_{o\phi} := \frac{P_{max} \cdot z_{сф_1}}{p_{\phi} \cdot z_p \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}} \quad q_{o\phi} = 235.702 \quad \text{Приймаємо} \quad s_{o\phi_1} := 0.1$$

$$q_{окр} := \frac{P_{max} \cdot z_{скр_1}}{p_{кр} \cdot z_p \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}} \quad q_{окр} = 494.635 \quad \text{Приймаємо} \quad s_{окр_1} := 0.22$$

$$q_{ош} := \frac{P_{max} \cdot z_{сш_1}}{p_{ш} \cdot z_p \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}} \quad q_{ош} = 262.253 \quad \text{Приймаємо} \quad s_{ош_1} := 0.11$$

$$s_{o\phi_2} := s_o \quad s_{окр_2} := s_o \quad s_{ош_2} := s_o$$

$$s_{o\phi_3} := s_o \quad s_{окр_3} := s_o \quad s_{ош_3} := s_o$$

$$z_{р\phi} := \frac{P_{max} \cdot z_{сф_2}}{p_{\phi} \cdot q_o \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}} \quad z_{р\phi} := \text{floor}(z_{р\phi})$$

$$t_{o\phi_2} := \text{ceil}\left(\frac{1}{z_{р\phi}} + 0.4\right) \quad t_{o\phi_2} = 16$$

$$z_{\text{ркр}} := \frac{P_{\text{max}} \cdot z_{\text{скр}_2}}{P_{\text{кр}} \cdot q_0 \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}}$$

$$z_{\text{ркр}} := \text{floor}(z_{\text{ркр}})$$

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

$$t_{\text{окр}_2} = 12$$

$$z_{\text{рш}} := \frac{P_{\text{max}} \cdot z_{\text{ш}_2}}{P_{\text{ш}} \cdot q_0 \cdot K_{\text{рм}} \cdot K_{\text{ро}} \cdot K_{\text{рр}} \cdot K_{\text{рк}}}$$

$$z_{\text{рш}} := \text{floor}(z_{\text{рш}})$$

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

$$t_{\text{ош}_2} = 13$$

$$t_{\text{оф}_1} := t_0$$

$$t_{\text{окр}_1} := t_0$$

$$t_{\text{ош}_1} := t_0$$

$$t_{\text{оф}_3} := t_0$$

$$t_{\text{окр}_3} := t_0$$

$$t_{\text{ош}_3} := t_0$$

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

$$s_{\text{ткр}_1} := 0.08$$

$$s_{\text{тш}_1} := 0.08$$

$$s_{\text{ткр}_2} := 0.04$$

$$s_{\text{тш}_2} := 0.04$$

Діаметр останнього фасочного зуба

$$\lambda := \text{asin} \left(\frac{b_{\text{max}} + 2 \cdot f}{d} \right)$$

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

$$D_E := \frac{b_{\text{max}}}{\sin(\lambda_E)}$$

$$D_\phi := D_E + 0.4$$

$$D_\phi = 21.829$$

Припуск на фасочну частину

$$A_\phi := D_\phi - d_{\text{max}} + A_{\text{чкр}}$$

$$A_\phi = 0.799$$

Припуск на круглу частину

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

$$A_{\text{кр}} = 3.13$$

Діаметр першого шліцевого зуба

$$D_{\text{ш}_1} := D_\phi - 0.1$$

$$D_{\text{ш}_1} = 21.729$$

Припуск на шліцеву частину

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

$$A_{\text{ш}} = 3.292$$

Припуск на чорнові зубці

$$A_{\text{окр}} := A_{\text{кр}} - A_{\text{ткр}} - A_{\text{чкр}}$$

$$A_{\text{окр}} = 2.79$$

$$A_{\text{ош}} := A_{\text{ш}} - A_{\text{тш}} - A_{\text{чш}}$$

$$A_{\text{ош}} = 2.972$$

Число секцій чорнових зубців

$$i_{\phi_k} := \text{floor} \left(\frac{A_\phi}{2 \cdot s_{\text{оф}_k}} \right)$$

$$i_\phi = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

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

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

Остаточний припуск

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

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

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

Розподіл остаточного припуска

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

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

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

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

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

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

$$s_{\text{перкр}_k} := \text{if}\left(s_{\text{чоркр}_k} \neq s_{\text{окр}_1}, s_{\text{пкр}_1}, \text{if}\left(s_{\text{чискр}_k} \neq s_{\text{чкр}_1}, s_{\text{чкр}_1}, 0.5 \cdot A_{\text{кр}_k}\right)\right) \quad s_{\text{перкр}} = \begin{pmatrix} 0.075 \\ 0.075 \\ 0.075 \end{pmatrix}$$

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

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

$$i_{\text{шпк}} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{шпк}} > s_{\text{шп1}}, i_{\text{шп}}, \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{шпк}} > s_{\text{чш1}}, i_{\text{шп}} + 1, i_{\text{шп}})) \quad i_{\text{шп}} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$i_{\text{чшк}} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{чшк}} \leq s_{\text{чш1}}, i_{\text{чш}} + 1, i_{\text{чш}}) \quad i_{\text{чш}} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{чоршк}} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{шпк}} > s_{\text{шп1}}, 0.5 \cdot A_{\text{шпк}}, s_{\text{ош1}}) \quad s_{\text{чорш}} = \begin{pmatrix} 0.11 \\ 0.11 \\ 0.11 \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{чисшк}} := \text{if}(0.5 \cdot A_{\text{шпк}} \leq s_{\text{чш1}}, 0.5 \cdot A_{\text{шпк}}, s_{\text{чш1}}) \quad s_{\text{чисш}} = \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.02 \\ 0.02 \end{pmatrix}$$

$$s_{\text{першк}} := \text{if}(s_{\text{чоршк}} \neq s_{\text{ош1}}, s_{\text{шп1}}, \text{if}(s_{\text{чисшк}} \neq s_{\text{чш1}}, s_{\text{чш1}}, 0.5 \cdot A_{\text{шпк}})) \quad s_{\text{перш}} = \begin{pmatrix} 0.056 \\ 0.056 \\ 0.056 \end{pmatrix}$$

Число калибруючих зубців

$$z_{\text{зкр}} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \quad z_{\text{кш}} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Перевірка

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

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

Середній крок чистових і калибруючих зубців

$$t_{\text{окр}} = \begin{pmatrix} 12 \\ 12 \\ 12 \end{pmatrix} \quad t_{\text{чкр}} = \begin{pmatrix} 9 \\ 9 \\ 9 \end{pmatrix} \quad t_{\text{ош}} = \begin{pmatrix} 12 \\ 13 \\ 12 \end{pmatrix} \quad t_{\text{чш}} = \begin{pmatrix} 9 \\ 11 \\ 9 \end{pmatrix}$$

Кількість фасочних зубців

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

так як добавляється одна секція для зняття остаточного припуску

Кількість круглих зубців

$$z_{\text{окрк}} := i_{\text{окрк}} \cdot z_{\text{скрк}} \quad z_{\text{окр}} = \begin{pmatrix} 12 \\ 24 \\ 24 \end{pmatrix}$$

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

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

Кількість шлицевих зубців

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

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

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

Довжина ріжучої частини протяжки

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

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

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

$$l_{\text{ш}_k} := t_{\text{ош}_k} \cdot (z_{\text{ош}_k} + z_{\text{тш}_k}) + t_{\text{чш}_k} \cdot (z_{\text{чш}_k} + z_{\text{тш}_k} - 1)$$

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

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

$k := 1$

Діаметр передньої напрямної

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

Довжина передньої напрямної

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

Довжина напрямного конуса

$$l_{\text{тк}} := 15$$

Діаметр першого прорізного круглого зуба

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

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

$$s_{\text{окр}_m} := s_{\text{окр}_k}$$

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

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

$$s_{oy+zckp_k} := \text{if}(s_{чоркр_k} < s_{окр_1}, s_{чоркр_k}, s_{окр_k})$$

$$D_{y+1} := D_{y-zckp_k+1} + 2 \cdot s_{oy+zckp_k}$$

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

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

$$\underline{x} := z_{окр_k} + 1$$

$$\underline{y} := z_{окр_k} + z_{ткр_k}$$

$$m := x + 2, x + 4..y$$

$$s_o := \text{if}(s_{перкр_k} < s_{ткр_1}, s_{перкр_k}, 0)$$

$$s_{ткр_3} := s_o$$

$$s_{ткр} := \text{sort}(s_{ткр})$$

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

$$D_x := D_{x-zckp_k} + 2 \cdot s_{ткр_1}$$

$$D_{x+1} := D_x - 0.02$$

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

$$D_{m+1} := D_m - 0.02$$

$$\underline{x} := y + 1$$

$$\underline{y} := x + z_{ф_k} - 2$$

$$m := x + z_{сф_k}, x + z_{сф_k} + 2..y$$

$$D_x := d_{\max} - A_{чкр} + A_{остф_k}$$

$$D_m := D_{m-zсф_k} + 2 \cdot s_{оф_k}$$

$$D_{x+1} := \text{if}(z_{сф_k} > 1, D_x - 0.02, D_{x+1})$$

$$D_{m+1} := \text{if}(z_{сф_k} > 1, D_x - 0.02, D_m + 2 \cdot s_{оф_k})$$

$$\underline{x} := y + 2$$

$$\underline{y} := x + z_{чкр_k} - 2$$

$$m := x + 2, x + 4..y$$

$$\underline{s_o} := \text{if}(s_{ччкр_k} < s_{чкр_1}, s_{ччкр_k}, 0)$$

$$s_{чкр_4} := s_o$$

$$s_{чкр} := \text{sort}(s_{чкр})$$

$$\underline{s_{чкр}} := \text{reverse}(s_{чкр})$$

$$D_x := D_{x-2-zф_k} + 2 \cdot s_{чкр_1}$$

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

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

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

$$\underline{x} := y + 2$$

$$\underline{y} := x + z_{ткр_k} - 1$$

$$m := x, x + 1..y$$

$$D_m := d_{\max}$$

$$\underline{x} := y + 1$$

$$\underline{y} := x + z_{ом_k} - z_{см_k} - 1$$

$$m := x + 1, x + z_{см_k} + 1..y$$

$$D_x := D_{m_1}$$

$$\underline{s_{om}} := s_{ом_k}$$

$$D_{x+1} := D_x + 2 \cdot s_{ом_k}$$

$$D_m := D_{x+1} + 2 \cdot s_{om} \cdot \text{ceil}\left(\frac{m-x-1}{z_{см_k}}\right)$$

$$D_{m+1} := \text{if}(z_{см_k} > 1, D_m - 0.02, D_m + 2 \cdot s_{om})$$

$$s_{oy+zсм_k} := \text{if}(s_{чорсм_k} < s_{ом_1}, s_{чорсм_k}, s_{ом_k})$$

$$D_{y+1} := D_{\text{ceil}\left(\frac{y}{z_{\text{смк}}}\right) + 2 \cdot s_{\text{oy}+z_{\text{смк}}}}$$

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

$$\underline{x} := y + 2 \quad \underline{y} := x + z_{\text{тшк}} - 2 \quad m := x + 2, x + 4..y$$

$$s_o := \text{if}(s_{\text{першк}} < s_{\text{тш1}}, s_{\text{першк}}, 0) \quad s_{\text{тш3}} := s_o$$

$$s_{\text{тш}} := \text{sort}(s_{\text{тш}}) \quad \underline{s_{\text{тш}}} := \text{reverse}(s_{\text{тш}})$$

$$D_x := D_{x-z_{\text{смк}}} + 2 \cdot s_{\text{тш1}} \quad D_{x+1} := D_x - 0.02$$

$$D_m := D_{m-2} + 2 \cdot s_{\text{тш}} \cdot \text{ceil}\left(\frac{m-x+2}{2}\right) \quad D_{m+1} := D_m - 0.02$$

$$\underline{x} := y + 2 \quad \underline{y} := x + z_{\text{чшк}} - 2 \quad m := x + 2, x + 4..y$$

$$\underline{s_o} := \text{if}(s_{\text{чшк}} < s_{\text{чш1}}, s_{\text{чшк}}, 0) \quad s_{\text{чш4}} := s_o$$

$$s_{\text{чш}} := \text{sort}(s_{\text{чш}}) \quad \underline{s_{\text{чш}}} := \text{reverse}(s_{\text{чш}})$$

$$D_x := D_{x-2} + 2 \cdot s_{\text{чш1}} \quad D_{x+1} := D_x$$

$$D_m := D_{m-2} + 2 \cdot s_{\text{чш}} \cdot \text{ceil}\left(\frac{m-x+2}{2}\right) \quad D_{m+1} := D_m$$

$$\underline{x} := y + 1 \quad \underline{y} := x + z_{\text{кшк}} \quad m := x, x + 1..y$$

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

Діаметр впадин фасочних і шліцевих зубців

$$D_{\text{фв}} := D_o \quad D_{\text{шв}} := D_o$$

$$D_{\text{фв}} = 18 \quad D_{\text{шв}} = 18$$

Ширина ріжучого сектора прорізного круглого зуба

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

Число викружок

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

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

Ширина викружок

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

Приймаємо $\underline{a_{\text{окр}}} := \frac{\text{round}(a_{\text{окр}} \cdot 2, 0)}{2} \quad a_{\text{окр}} = 5.5$

$$a_{\text{ткр}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{max}} \cdot (2 - 1)}{n_{\text{ткр}} \cdot 2} \quad a_{\text{ткр}} = 5.532$$

$$B_{\phi} := b + 2 \cdot f \quad B_{\phi} = 5.63$$

$$B_{\text{чкр}} := \frac{\pi \cdot d_{\text{max}}}{Z} - (b + 2 \cdot f) \quad B_{\text{чкр}} = 5.434$$

$$B_{\text{ош}} := b_{\text{max}} \quad B_{\text{ош}} = 5.06$$

Розмір фаски на прорізних зубцях

$$f_{\pi} := 1$$

Ширина ріжучого сектора

$$B_{s\phi} := b - 2 \cdot f_{\pi} \quad B_{s\phi} = 3.03$$

$$B_{s\text{ош}} := b - 2 \cdot f_{\pi}$$

$$B_{s\text{чш}} := 0.7 \cdot B_{\text{ош}}$$

Ширина викружок

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

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

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

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

Довжина задньої напрямної

$$l_{\text{н}} := 25$$

Довжина заднього хвостовика

$$l_{\text{ц}} := 125$$

Загальна довжина протяжки

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

3. ЧЕРВ'ЯЧНА МОДУЛЬНА ФРЕЗА. КОНСТРУЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК

3.1. Загальні характеристика та послідовність розрахунку черв'ячної фрези

В цьому розділі проводимо розрахунок та конструювання модульної черв'ячної фрези для обробки зубчатого колеса [14, 15, 17].

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.

3.2. Параметри 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 β .

2. 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

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

3.3. 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 γ_0 виробного черв'яка (попередній) для одновиткових фрез ($z_0 = 1$) вибирається з таблиць довідників.

Для багатовиткових фрез γ_0 збільшується:

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

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

де γ'_0 – ділительний кут підйому одновиткової фрези відповідного модуля.

4. Висота ділительної 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. Ділительний 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 ділительний діаметр виробного черв'яка (фрези)

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

9. Ділительний 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 Δs – 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

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

3.4. Розрахунок розмірів різальної частини черв'ячної 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

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

17. Величина затилування:

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

другого (для інструментів із шліфованим профілем)

$$K_2 = 1.5 K_1.$$

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

$$d_{отв} = d_{a0} - 2H - 2t,$$

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

$$D_{\sigma} = d_{a0} - 2H - (2...5)$$

(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 Θ призначають із стандартного ряду, причому чим більший об'єм зрізуваної стружки, тим більший кут Θ .

3.5. Практичний розрахунок модульної черв'ячної фрези

Розрахунки проводимо за допомогою спеціалізованого математичного пакету MathCAD.

Евольвентна циліндрична передача зовнішнього зачеплення

Вихідні дані:

$m_n := 5.0$	- модуль нормальний
$z_1 := 34$	- число зубців шестерні
$z_2 := 42$	- число зубців колеса
$X_1 := 0.215$	- коефіцієнт зміщення висхідного контуру шестерні
$X_2 := -0.215$	- коефіцієнт зміщення висхідного контуру колеса
$h_a := 1$	- коефіцієнт висоти головки
$c := 0.25$	- коефіцієнт радіального зазору
$\rho_f := 0.3799$	- коефіцієнт радіуса кривини перехідної кривої
$\alpha := 20 \cdot \frac{\pi}{180}$	- кут головного профілю
$\beta := 0$	- кут нахилу зубців

$a := \frac{(z_2 + z_1) \cdot m_n}{2 \cdot \cos(\beta)}$	$a = 190$	- ділильна міжосьова відстань
$X_{\Sigma} := X_1 + X_2$	$X_{\Sigma} = 0$	- коефіцієнт зміщень
$\alpha_t := \operatorname{atan}\left(\frac{\tan(\alpha)}{\cos(\beta)}\right)$	$\alpha_t \cdot \frac{180}{\pi} = 20$	- кут профілю торцевий
$\operatorname{alf} := 1$	Given	
	$\tan(\operatorname{alf}) - \operatorname{alf} - \tan(\alpha_t) + \alpha_t - \frac{2 \cdot X_{\Sigma} \cdot \tan(\alpha)}{z_2 + z_1} = 0$	
$\alpha_{tw} := \operatorname{Find}(\operatorname{alf})$	$\alpha_{tw} \cdot \frac{180}{\pi} = 20$	- кут зачеплення передачі
$a_w := a \cdot \frac{\cos(\alpha_t)}{\cos(\alpha_{tw})}$	$a_w = 190$	- початкова міжосьова відстань
$d_1 := \frac{m_n \cdot z_1}{\cos(\beta)}$	$d_1 = 170$	- ділильний діаметр шестерні
$d_2 := \frac{m_n \cdot z_2}{\cos(\beta)}$	$d_2 = 210$	- ділильний діаметр колеса
$u := \frac{z_2}{z_1}$	$u = 1.235$	- передатне число
$d_{w1} := \frac{2 \cdot a_w}{u + 1}$	$d_{w1} = 170$	- початковий діаметр шестерні
$d_{w2} := d_{w1} \cdot u$	$d_{w2} = 210$	- початковий діаметр колеса
$\Delta y := X_{\Sigma} - \frac{a_w - a}{m_n}$	$\Delta y = 0$	- коефіцієнт зрівнюючого зміщення
$d_{a1} := d_1 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_1 - \Delta y)$	$d_{a1} = 182.15$	- діаметр вершин шестерні
$d_{a2} := d_2 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_2 - \Delta y)$	$d_{a2} = 217.85$	- діаметр вершин колеса
$d_{f1} := d_1 - 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c - X_1)$	$d_{f1} = 159.65$	- діаметр впадин шестерні
$d_{f2} := d_2 - 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c - X_2)$	$d_{f2} = 195.35$	- діаметр впадин
$h_1 := \frac{d_{a1} - d_{f1}}{2}$	$h_1 = 11.25$	- висота зуба шестерні
$h_2 := \frac{d_{a2} - d_{f2}}{2}$	$h_2 = 11.25$	- висота зуба колеса
$d_{b1} := d_1 \cdot \cos(\alpha_t)$	$d_{b1} = 159.748$	- основний діаметр шестерні
$d_{b2} := d_2 \cdot \cos(\alpha_t)$	$d_{b2} = 197.335$	- основний діаметр колеса
$\alpha_{a1} := \operatorname{acos}\left(\frac{d_{b1}}{d_{a1}}\right)$	$\alpha_{a1} \cdot \frac{180}{\pi} = 28.716$	- кут профілю на колі вершин шестерні
$\alpha_{a2} := \operatorname{acos}\left(\frac{d_{b2}}{d_{a2}}\right)$	$\alpha_{a2} \cdot \frac{180}{\pi} = 25.064$	- кут профілю на колі вершин шестерні
$\rho_{p1} := a_w \cdot \sin(\alpha_{tw}) - \rho_f \cdot m_n$	$\rho_{p1} = 63.084$	- радіус кривини активного профілю в нижній точці шестерні
$\rho_{p2} := a_w \cdot \sin(\alpha_{tw}) - \rho_f \cdot m_n$	$\rho_{p2} = 63.084$	- радіус кривини активного профілю в нижній точці колеса
$c_{12} := 0.5 \cdot [2 \cdot a_w - (d_{a1} + d_{f2})]$	$c_{12} = 1.25$	- радіальний зазор в передачі

Розрахунок параметрів висхідного виробного черв'яка фрези

$$\alpha_{n0} := \alpha \quad \alpha_{n0} \cdot \frac{180}{\pi} = 20 \quad - \text{нормальний кут профілю}$$

$$z_0 := 1 \quad - \text{число витків виробного черв'яка}$$

$$\gamma_0 := 2.4 \cdot \frac{\pi}{180} \quad - \text{ділильний кут підйому витків виробного черв'яка (попередній)}$$

$$h_{a0} := m_n \cdot (h_a + c) \quad h_{a0} = 6.25 \quad - \text{висота ділильної головки витка виробного черв'яка (зуба фрези)}$$

$$h_0 := 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c) \quad h_0 = 12.5 \quad - \text{висота зуба виробного черв'яка (фрези)}$$

$$d_{0p} := \frac{m_n \cdot z_0}{\sin(\gamma_0)} \quad d_{0p} = 119.401 \quad - \text{ділильний діаметр виробного черв'яка (фрези) розрахунковий}$$

$$d_{a0p} := d_{0p} + 2 \cdot h_{a0} \quad d_{a0} := \frac{\text{round}(d_{a0p} \cdot 2, 0)}{2}$$

$$d_{a0} = 132 \quad - \text{діаметр поверхні вершин виробного черв'яка (фрези)}$$

$$d_0 := d_{a0} - 2 \cdot h_{a0} \quad d_0 = 119.5 \quad - \text{уточнений ділильний діаметр виробного черв'яка (фрези)}$$

$$\gamma_{0u} := \text{asin}\left(\frac{m_n \cdot z_0}{d_0}\right) \quad \gamma_0 \cdot \frac{180}{\pi} = 2.398 \quad - \text{ділильний кут підйому витків уточнений}$$

$$p_{n0} := \pi \cdot m_n \quad p_{n0} = 15.708 \quad - \text{нормальний крок висхідного виробного черв'яка (фрези)}$$

$$p_{x0} := \frac{p_{n0}}{\cos(\gamma_0)} \quad p_{x0} = 15.722 \quad - \text{осьовий крок висхідного виробного черв'яка (фрези)}$$

$$p_{z0} := p_{x0} \cdot z_0 \quad p_{z0} = 15.722 \quad - \text{хід витків виробного черв'яка (фрези)}$$

$$E_{Hs} := 0.17 \quad - \text{найменше додаткове зміщення висхідного контуру}$$

$$\Delta s := 2 \cdot E_{Hs} \cdot \tan(\alpha) \quad \Delta s = 0.124 \quad - \text{допустиме найменше зміщення висхідного контура}$$

$$s_{n0} := 0.5 \cdot p_{n0} + \Delta s \quad s_{n0} = 7.978 \quad - \text{ділильна товщина зуба виробного черв'яка (фрези) нормальна}$$

$$s_{x0} := \frac{s_{n0}}{\cos(\gamma_0)} \quad s_{x0} = 7.985 \quad - \text{осьова ділильна товщина зуба}$$

Розрахунок параметрів ріжучої частини фрези

$$b := 2.6 \quad \varphi := \text{acos}\left(\frac{d_{a0} - 2 \cdot h_1}{d_{a0}}\right)$$

$$z := b \cdot \frac{\pi}{\varphi} \quad z_u := \text{round}(z, 0) \quad z = 14 \quad - \text{число зубців фрези}$$

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

$$K_1 := \frac{\pi \cdot d_{a0} \cdot \tan(\alpha_B)}{z} \quad K_{1u} := \text{if}\left(K_1 < 5, \frac{\text{round}(K_1 \cdot 2, 0)}{2}, \text{round}(K_1, 0)\right)$$

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

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

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

$$\sigma := 0.125$$

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

$$d_{pac} = 118$$

- розрахунковий діаметр початковий гвинтових стружкових канавок

$$\omega := \operatorname{atan}\left(\frac{m_n \cdot z_0}{d_{pac} \cdot \cos(\gamma_0)}\right)$$

$$\omega \cdot \frac{180}{\pi} = 2.428$$

- кут нахилу гвинтової стружкової канавки

$$T := \frac{P_{z0}}{\tan(\omega)^2}$$

$$T := \operatorname{round}(T, 0)$$

$$T = 8741$$

- крок стружкових канавок

$$\alpha_{x0} := \operatorname{atan}\left(\frac{\tan(\alpha_{n0})}{\cos(\gamma_0)}\right)$$

$$\alpha_{x0} \cdot \frac{180}{\pi} = 20.016$$

- осьовий кут профілю для фрез з осьовими канавками

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

$$\alpha_{x0L} \cdot \frac{180}{\pi} = 20.501$$

- осьовий кут профілю для лівої сторони фрез з осьовими канавками з правим напрямком витків

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

$$\alpha_{x0R} \cdot \frac{180}{\pi} = 19.529$$

- осьовий кут профілю для правої сторони фрез з осьовими канавками з правим напрямком витків

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

$$\rho_{x0} = 1.9$$

- радіус заокруглення вершини зуба фрези

$$\rho_{f0} := 0.3 \cdot m_n$$

$$\rho_{f0} = 1.5$$

- радіус заокруглення профілю ніжки зуба фрези

$$r := 2$$

- радіус заокруглення впадини зуба

$$H := h_0 + r + 0.5 \cdot (K_1 + K_2)$$

$$H = 22$$

- глибина стружкової канавки

$$t := 4 \cdot m_n$$

$$t = 20$$

- товщина тіла фрези

$$d_{отв} := d_{a0} - 2 \cdot H - 2 \cdot t$$

$$d_{отв} = 48$$

Приймаємо

$$d_{отв} := 50$$

- діаметр посадочного отвору фрези

$$D_6 := d_{a0} - 2 \cdot H - 5$$

$$D_6 = 83$$

- діаметр буртиків фрези

$$n := 6$$

- число осьових перестановок фрези

$$l := \frac{\frac{h_1}{2 \cdot \tan(\alpha_{n0})} + \sqrt{(d_{a1} - h_1) \cdot h_1}}{\cos(\beta - \gamma_0)} + (n + 2) \cdot \rho_{x0}$$

$$l := \operatorname{round}(l, 0)$$

$$l = 185$$

- довжина нарізаної частини фрези

$$\gamma := 0$$

- передній кут фрези

$$\Theta := 18 \cdot \frac{\pi}{180}$$

- кут стружкової канавки

ВИСНОВКИ

Циліндричне зубчасте колесо є плоским тілом у формі диску 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. 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 – черв'ячна модульна фреза, що імітує черв'ячне зачеплення черв'як – зубчасте колесо. Розрахована та спроектована у роботі конструкція модульної черв'ячної фрези забезпечить нарізання зубів зубчатих коліс евольвентного профілю.

Таким чином, спроектовані шліцьова протяжка для обробки посадкового центрального отвору та черв'ячна фреза для обробки зубчастого вінця методом обкатування дозволить вирішити виробничу задачу виготовлення зубчатого колеса заданої якості профілю та с порівняно високою продуктивністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гнатюк А. О. Теоретичні та експериментальні дослідження показників шорсткості профілю цівкового колеса героторної пари, що забезпечуються шліфуванням в умовах обкату / А. О. Гнатюк, О. І. Скібінський, А. М. Кириченко // *Mechanics and Advanced Technologies*. – К. : НТУУ «КПІ», 2018. – № 1 (82). – С. 12-19.
2. Горбацевич, А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения / А.Ф. Горбацевич, В.А. Шкред. – М.: Высшая школа, 1983. – 256 с.
3. Зубовецька Н. Т. Проектування та технологія виготовлення металорізальних інструментів [Електронний ресурс] : Посібник / Н. Т. Зубовецька.– Луцьк, 2018 р.
4. Иноземцев Г.Г. Проектирование металлорежущих инструментов: Учебное пособие для вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты».– М.: "Машиностроение", 1984.– 272 с.
5. Ігнат'єв, Е. С. Основні тенденції розвитку сучасного ріжучого інструменту / Е. С. Ігнат'єв, О. В. Лисенко // *Наукові записки : зб. наук. пр.* - Кіровоград : КНТУ, 2011. - Вип. 11, ч. 1. - С. 221-225.
6. Кирсанов Г.Н. Руководство по курсовому проектированию металлорежущих инструментов / Г.Н. Кирсанов и др. – М.: Машиностроение, 1986.– 288 с.
7. Кривошея А. В. Дослідження впливу процесу зубохонінгування алмазними червячними хонами на параметри шоркості зубчатих коліс / А. В. Кривошея, Є.О. Пащенко, В.Є. Мельник, К.К. Щербина // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – Київ: КНУБА, 2021. – Вип. 106. – С. 296-311.
8. 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.
9. Металорізальні інструменти: навчальний посібник / С. В. Швець. – Суми: Сумський державний університет, 2019. – 272 с.

10. Модульно-параметричний принцип розробки проектів шестеренних гідравлічних машин. / Апаракін А.Р. // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - Вип. 7 (38). – С. 51-58.

11. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ : Учеб.пособие для втузов / 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.

12. Проектування та виробництво різального інструмента : метод. рекомендації до виконання практ. роб. для студ. спец. 131 - Прикладна механіка та 133 - Галузеве машинобудування / [уклад. : О. В. Лисенко, П. М. Єрьомін] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. металорізальних верстатів та систем. - Кропивницький : ЦНТУ , 2020. - 48 с.

13. Протяжки для обработки отверстий / Д.К. Маргулис, М.М. Тверской, В.Н. Ашихмин и др.– М.: "Машиностроение", 1986.– 232 с.

14. 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.

15. 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.

16. Різальний інструмент : метод. вказівки до викон. курсового проекту для студ. напряму підготовки 6.050502 "Інженерна механіка", спец. 131 "Прикладна механіка" та 133 "Галузеве машинобудування" / [уклад. О. В. Лисенко, В. М. Лисенко] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. металорізальних верстатів та систем. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – 96 с.

17. 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.

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

19. Родін П.Р., Бугай Ю.М., Равська Н.С. Солодкий В.І. Металорізальні інструмента, Частина 2. – Київ, 1993.– 178 с.
20. Родін П.Р., Бугай Ю.М., Равська Н.С. Солодкий В.І. Металорізальні інструмента, Частина 1.– Київ,1992. – 226 с.
21. Скібінський О. І. Синтез профілю зубчатих коліс малошумного шестеренного насоса з низькою пульсацією / О. І. Скібінський, А. О. Гнатюк, М. О. Годунко, Д. В. Богатирьов, В. М. Селєхова // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. - Кропивницький : ЦНТУ, 2023. - Вип. 7 (38). – С. 43-50.
22. 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.
23. Филиппов, Г.В. Режущий инструмент / Г.В. Филиппов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд.-е, 1981. – 392 с.
24. Щербина, К., Заїка, А., Заїка, С., Мажара, В., & Скібінський, Я. (2025). Управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділим на дві частини профілем інструментальної рейки. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 349(2), 364-370.
25. Skibinskyi O.I., Hnatiuk A.O. Research on kinematics of contact interaction of cycloidal profiles in gerotor gearing / Skibinskyi O.I., Hnatiuk A.O. // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu . – Vol. 6. – 2017. – P. 82-89.