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
«____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:
Технологічне забезпечення виготовлення зубчастого колеса із розробленням зубонарізного довбача

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

Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент

_____ Олександр ЛИСЕНКО

Рецензент: канд. техн. наук, доцент

_____ Олег БЕВЗ

Кропивницький 2026

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
«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

За першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
Бородіну Іллі Івановичу

Тема роботи:
Технологічне забезпечення виготовлення зубчастого колеса із розробленням зубонарізного довбача

Керівник роботи:
канд. техн. наук, доцент Олександр Лисенко
Затверджено наказом ЦНТУ від 01 квітня 2026 року № 199-02.

Строк подання роботи до захисту:
10 червня 2026 р.

Мета та завдання кваліфікаційної роботи:
Мета: аналіз способів обробки евольвентних зубчастих коліс з розробкою та проектуванням конструкції інструменту зубонарізного довбача

Завдання:
– проаналізувати технологічність деталі типу зубчасте колесо;
– проаналізувати способи обробки евольвентних зубчастих коліс;
– спроектувати та розрахувати конструкцію внутрішньої шліцьової протяжки;
– спроектувати та розрахувати конструкцію зубонарізного довбача;
– виконати креслення внутрішньої шліцьової протяжки та зубонарізного довбача.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання роботи	Примітка
1	Опрацювання літератури за тематикою роботи	квітень 2026	
2	Виконання загальної частини	квітень 2026	
3	Виконання технологічної частини	травень 2026	
4	Виконання конструкторської частини	травень 2026	
5	Розробка креслеників	травень 2026	
6	Усунення недоліків після перевірки керівником роботи	травень 2026	
7	Перевірка роботи на академічний плагіат	червень 2026	
8	Рецензування роботи	червень 2026	
9	Захист кваліфікаційної роботи	червень 2026	

Дата видачі завдання: «02» квітня 2026 р.

Здобувач вищої освіти _____ Ілля БОРОДІН

Керівник роботи _____ Олександр ЛИСЕНКО

АНОТАЦІЯ

Бородін, І.І. Технологічне забезпечення виготовлення зубчастого колеса із розробленням зубонарізного довбача: кваліфікаційна бакалаврська робота : спец. 131 Прикладна механіка / наук. кер. О. В. Лисенко; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. - Кропивницький : ЦНТУ, 2025.– 67 с.

Креслеників – разом 3 аркуші формату А1.

Метою роботи є визначення способів обробки зубчастих коліс евольвентного профілю зовнішнього зачеплення та розробка і проектування відповідного інструментального забезпечення.

Актуальність роботи полягає у вирішенні інженерної задачі з проєктування та точного розрахунку різального інструменту для нарізання евольвентних зубчастих коліс.

Практична цінність. У кваліфікаційній роботі розроблено інструментальне забезпечення обробки основних конструктивних елементів циліндричного зубчастого колеса: шліцьову протяжку для обробки посадкового отвору та зубонарізного довбача для обробки зубчатого вінця.

Ключові слова: зубчасте колесо, евольвентний профіль, зубообробка, зубонарізний довбач, шліцьова протяжка.

ANNOTATION

Borodin Illia. Technological support of gear manufacturing with the development of a gear shaper cutter: Specialty 131 Applied Mechanics/Scientific Adviser O.V. Lysenko; Central Ukrainian National Technical University - Kropyvnytskyi: CNTU, 2026.– 67 p.

Drawings - 3 A1 sheets in total.

The purpose of the work is to determine the methods of machining gears of involute profile of external gearing and to develop and design the corresponding tooling.

The relevance of the work lies in solving the engineering problem of designing and accurately calculating a cutting tool for cutting involute gears.

Practical value. In the qualification work, tooling for processing the main structural elements of a cylindrical gear wheel was developed: a spline broach for processing the landing hole and a tooth-cutting gouge for processing the gear ring.

Keywords: gear wheel, involute profile, gear cutting, tooth-cutting gouge, spline broach.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи на тему:

Технологічне забезпечення виготовлення зубчастого колеса із розробленням зубонарізного довбача

КРБ.ПМ.26.19.13.00.00

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

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

Кропивницький 2026

ЗМІСТ

ВСТУП 7

1. ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС 10

1.1. Основні конструктивні елементи циліндричних зубчастих коліс 10

1.2. Характерні особливості конструкцій внутрішніх протяжок 17

1.3. Реалізація методів нарізання зубів на зубчастих колесах 23

2. ПРОЕКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ШЛІЦЬОВОЇ ПРОТЯЖКИ 29

2.1. Загальні позначення змінних до розрахунку внутрішньої протяжки 29

2.2. Проектувальний розрахунок внутрішньої шліцьової протяжки 30

2.3. Практичний розрахунок внутрішньої шліцьової протяжки 41

3. ЗУБОНАРІЗНИЙ ДОВБАЧ. КОНСТРУЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК 51

3.1. Теоретичні передумови до розрахунку зубонарізного довбача 51

3.2. Циліндрична евольвентна передача 51

3.3. Розрахунок параметрів зуборізного довбача у висхідному перетині 54

3.4. Розрахунок параметрів проектованого довбача 54

3.5. Розрахунок параметрів сточеного довбача 56

3.6. Розрахунок і призначення параметрів ріжучої частини і виконавчих розмірів довбача 57

3.7. Розрахунок конструкції зубонарізного довбача 59

ВИСНОВКИ 65

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ 66

ВСТУП

Зубчасті колеса належать до найбільш відповідальних деталей машинобудівного призначення, оскільки вони є основними елементами зубчастих передач. Такі передачі широко застосовуються у різних вузлах машин і механізмів: коробках передач, коробках подач, редукторах, приводах верстатів, транспортних машинах, підйомно-транспортному обладнанні, гідромашинах, шестеренних насосах та інших технічних системах. За їх допомогою здійснюється передавання обертального руху і крутного моменту між валами, зміна частоти обертання, напрямку руху., а в окремих механізмах – перетворення обертального руху у поступальний або навпаки. Тому якість виготовлення зубчастих коліс безпосередньо впливає на надійність, довговічність, точність і ефективність роботи машин.

Актуальність теми роботи зумовлена тим, що сучасне машинобудування потребує виготовлення зубчастих коліс із високою точністю геометричних параметрів, стабільною якістю робочих поверхонь і достатньою продуктивністю оброблення. Основною робочою поверхнею зубчастого колеса є зубчастий вінець, який складається з рівномірно розташованих по колу зубців, найчастіше евольвентного профілю. Саме від точності профілю зубців, правильності кроку, співвісності вінця з посадковим отвором і якості поверхневого шару залежить плавність зачеплення, рівень шуму, зносостійкість та експлуатаційна надійність передачі.

Як правило, циліндричне зубчасте колесо має форму диска або маточинно-дискової деталі, у центральній частині якої розташований посадковий отвір, а на зовнішній циліндричній поверхні сформований зубчастий вінець. Центральний отвір виконує не лише конструктивну, а й технологічну функцію, оскільки часто використовується як база під час подальшого оброблення зубчастого вінця. Одним із найбільш надійних варіантів посадкового отвору є шліцьовий отвір, який забезпечує точне центрування колеса на валу, надійне передавання крутного моменту та рівномірний розподіл навантаження між елементами з’єднання.

Для оброблення внутрішніх шліцьових отворів доцільно застосовувати шліцьові протяжки. Такий інструмент дає змогу за один робочий хід виконати послідовне знімання припуску, сформувати профіль шліців і забезпечити

необхідну точність та шорсткість поверхні. Протяжка є багатолезовим різальним інструментом, у якому різальні зубці розміщені послідовно вздовж осі, а їх розміри поступово збільшуються відповідно до величини припуску, що знімається. Особливістю процесу протягування є те, що подача фактично закладена в конструкції самого інструмента за рахунок підйому на зуб, а головним рухом є поступальне переміщення протяжки відносно заготовки.

Використання протяжок забезпечує високу продуктивність, точність і повторюваність результатів, що особливо важливо для серійного та масового виробництва зубчастих коліс. Водночас протяжка є складним, металоємним і дорогим інструментом, виготовлення якого потребує точних розрахунків, правильного вибору геометричних параметрів, матеріалу, конструкції зубців, напрямних і хвостової частини. Тому раціональне проєктування шліцьової протяжки є важливим завданням, від якого залежить економічна доцільність її застосування, стійкість інструмента та якість оброблюваного отвору.

Не менш відповідальним етапом виготовлення зубчастого колеса є формування зубчастого вінця. Для нарізування зубців застосовують різні методи та інструменти, однак найбільш поширеними й технологічно обґрунтованими є методи, що працюють за принципом обкатування. Вони імітують процес зубчастого зачеплення між інструментом і заготовкою та дають змогу отримати точний евольвентний профіль зубців. До таких інструментів належить зубонарізний довбач, який за своєю конструктивною основою подібний до зубчастого колеса і під час роботи відтворює взаємодію пари «шестерня – зубчасте колесо».

Зубонарізні довбачі мають важливе значення під час оброблення зубчастих коліс складної конструкції, зокрема деталей із внутрішнім зачепленням, багатоступінчастих блоків коліс, вінців, розташованих поблизу буртів або уступів, а також інших деталей, для яких застосування черв’ячних фрез є ускладненим або неможливим.

Таким чином, актуальність даної роботи полягає у необхідності обґрунтованого вибору та проєктування спеціального різального інструменту для виготовлення двох найбільш відповідальних елементів зубчастого колеса – центрального шліцьового отвору та зубчастого вінця. Розрахунок і конструювання шліцьової протяжки та зубонарізного довбача дають змогу

забезпечити необхідну точність, якість поверхонь і продуктивність оброблення, що є важливою умовою виготовлення надійних зубчастих коліс для сучасних машинобудівних виробів.

Метою роботи є визначення способів обробки зубчастих коліс евольвентного профілю зовнішнього зачеплення та розробка і проектування відповідного інструментального забезпечення.

Актуальність роботи полягає у вирішенні інженерної задачі з проєктування та точного розрахунку різального інструменту для нарізання евольвентних зубчастих коліс.

Практична цінність. У кваліфікаційній роботі розроблено інструментальне забезпечення обробки основних конструктивних елементів циліндричного зубчастого колеса: шліцьову протяжку для обробки посадкового отвору та зубонарізного довбача для обробки зубчатого вінця.

1. ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

1.1. Основні конструктивні елементи циліндричних зубчастих коліс

Зубчасте колесо є однією з найпоширеніших деталей машинобудування, що використовується у приводах, коробках передач, редукторах, верстатних механізмах, транспортних машинах та іншому обладнанні. Основним функціональним призначенням зубчастого колеса є передавання обертального руху та крутного моменту від одного валу до іншого за рахунок взаємодії зубів двох спряжених коліс. У більшості механічних передач зубчасті колеса забезпечують зміну частоти обертання, напрямку руху, величини крутного моменту та передаточного відношення.

Кругле зубчасте колесо зовнішнього зачеплення являє собою тіло обертання, на зовнішній циліндричній поверхні якого розміщено зуби. Якщо зуби розташовані паралельно осі обертання, колесо належить до циліндричних прямозубих зубчастих коліс. У передачі зовнішнього зачеплення зуби двох коліс входять у контакт із зовнішніх боків, а самі колеса обертаються у протилежних напрямах. Менше колесо в парі зазвичай називають шестернею, а більше – зубчастим колесом.

На схемі (рис. 1.1) наведено основні геометричні елементи циліндричного зубчастого колеса зовнішнього зачеплення. До них належать коло вершин зубців, ділильне коло, коло западин зубців, а також коло радіального зазору або робочої висоти. Окремо показано висоту головки зубця, висоту ніжки зубця, повну та робочу висоту зубця, окружний крок, товщину зубця і западину між сусідніми зубцями. Також на схемі позначено ширину зубчастого вінця, поверхню вершини зубця, робочі поверхні головки та ніжки зубця, які беруть участь у контакті під час зачеплення. Наведені елементи визначають форму зубчастого профілю, умови взаємодії спряжених коліс, точність передавання руху та є вихідними параметрами для вибору способу зубообробки і подальшого контролю якості виготовлення зубчастого колеса.

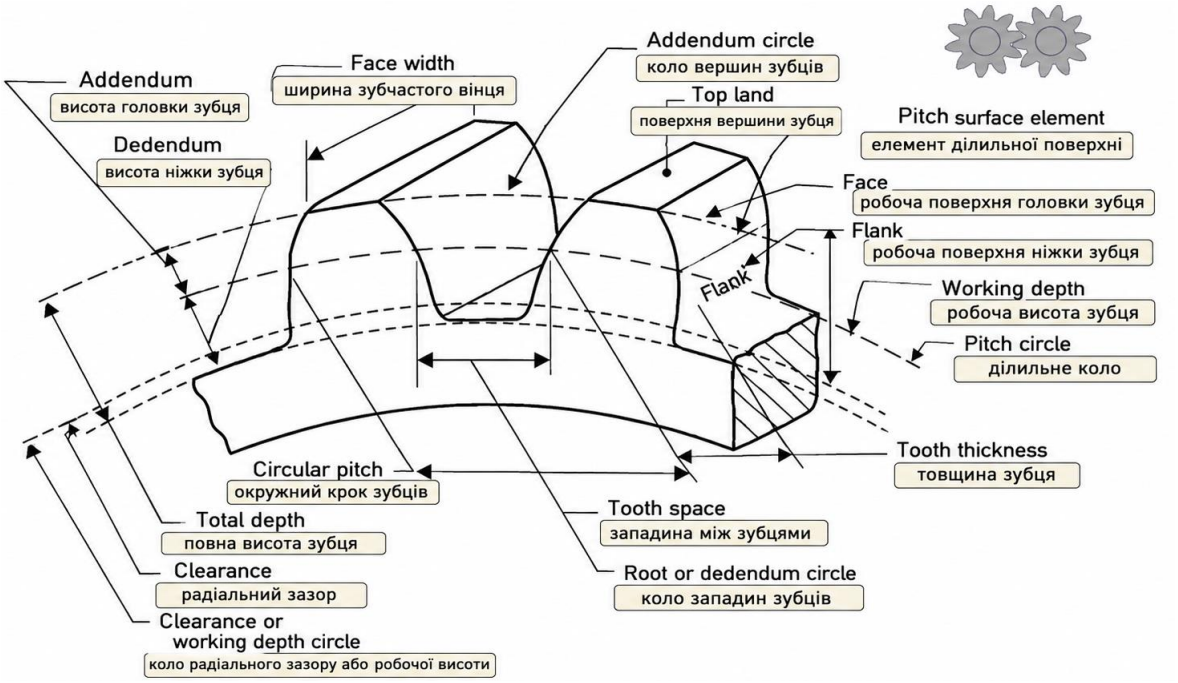


Рисунок 1.1 – Основні геометричні елементи циліндричного зубчастого колеса зовнішнього зачеплення

Зубчасте зачеплення утворюється під час взаємодії зубців двох коліс, коли профілі зубів послідовно входять у контакт і передають навантаження від ведучого колеса до веденого. Для прямозубих циліндричних коліс найчастіше застосовують евольвентний профіль зуба. Його перевагою є здатність забезпечувати сталість передаточного відношення навіть за незначних відхилень міжосьової відстані. На схемі зубчастого зачеплення (рис. 1.2, рис. 1.3) показано ведуче колесо, ведене колесо, лінію центрів, ділильні кола, зону контакту зубців, лінію зачеплення та напрямки обертання.

Конструктивно зубчасте колесо складається з кількох основних елементів (рис. 1.4): зубчастого вінця, маточини, диска або спиць, центрального посадкового отвору, шпонкових або шліцьових елементів, фасок, галтелей і торцевих поверхонь. Зубчастий вінець є найбільш відповідальною частиною деталі, оскільки саме він бере участь у передачі навантаження. Маточина призначена для встановлення колеса на вал і забезпечення надійного з’єднання з ним. Диск або перемичка з’єднує маточину із зубчастим вінцем і забезпечує необхідну жорсткість конструкції за мінімальної маси. Посадковий отвір забезпечує базування деталі на валу, а шліцьові або шпонкові елементи служать для передавання крутного моменту між валом і колесом.

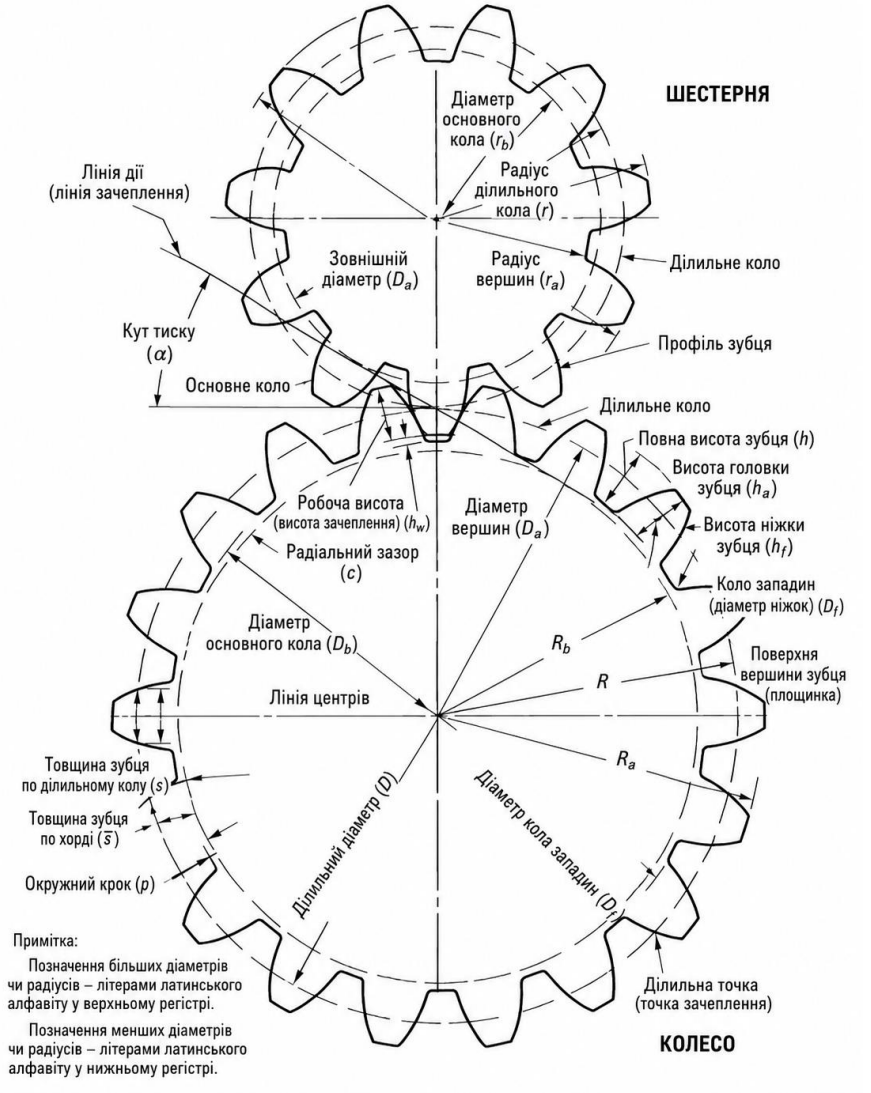


Рисунок 1.2 – Геометричні параметри зовнішнього зубчастого зачеплення

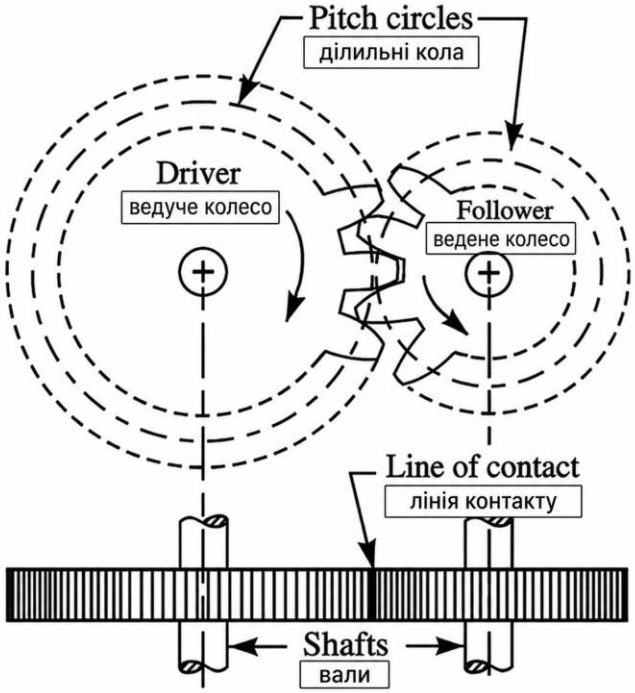


Рисунок 1.3 – Схема зовнішнього зубчастого зачеплення

а) *б*) *в*) *г*)

Рисунок 1.4 – Виконання посадкового отвору зубчатого колеса:
а) з маточиною; *б*) циліндричний; *в*) шпонковий
г) шліцьовий

З погляду технологічності зубчасте колесо (рис. 1.4) є деталлю, форма якої поєднує відносно прості поверхні обертання з високоточним зубчастим профілем. Технологічність такої деталі визначається можливістю раціонального вибору заготовки, зручністю базування під час механічної обробки, доступністю поверхонь для різального інструмента, забезпеченням необхідної точності зубчастого вінця та посадкового отвору, а також можливістю контролю основних розмірів. Важливо, щоб конструкція колеса забезпечувала достатню жорсткість під час оброблення і не створювала ускладнень під час закріплення на верстаті.

Матеріал зубчастого колеса вибирають залежно від умов експлуатації, величини переданого навантаження, швидкості обертання, вимог до зносостійкості, міцності та довговічності. У машинобудуванні зубчасті колеса найчастіше виготовляють із конструкційних і легованих сталей, зокрема сталей, що піддаються цементації, поліпшенню, загартуванню струмами високої частоти або іншій термічній обробці. Для менш навантажених передач можуть застосовуватися чавуни, бронзи, латуні, алюмінієві сплави, а також полімерні матеріали. Для відповідальних передач перевагу надають сталям, які після термічної обробки забезпечують високу твердість поверхневого шару зубців і достатню в’язкість серцевини.

До зубчастих коліс висувають комплекс конструктивних, технологічних і експлуатаційних вимог. Основними з них є точність профілю зубців, правильність кроку, мінімальне радіальне та торцеве биття, забезпечення заданої шорсткості робочих поверхонь зубців, необхідна твердість після термічної обробки, відсутність тріщин, задирок, припалів і дефектів поверхневого шару. Крім того, колесо повинно мати достатню міцність на згин зубця, контактну витривалість робочих поверхонь, зносостійкість, плавність роботи в зачепленні та допустимий рівень шуму і вібрацій. Для посадкового отвору важливими є точність діаметра, форма, співвісність з ділильною поверхнею зубчастого вінця та якість поверхні, оскільки від цього залежить правильність установлення колеса на валу.

Одним із головних конструктивних елементів зубчастого колеса є зубчастий вінець. Він складається із сукупності зубців, рівномірно розміщених по колу. Кожен зубець має головку, ніжку, бічні робочі поверхні, вершину та перехідні ділянки біля западини. Саме бічні поверхні зубів контактують із зубами спряженого колеса і передають навантаження. Точність виготовлення зубчастого вінця значною мірою визначає кінематичну точність передачі, плавність ходу, рівномірність розподілу навантаження та довговічність роботи механізму.

Оброблення зубчастого вінця може виконуватися різними методами: фрезеруванням модульними фрезами, зубофрезеруванням черв’ячними фрезами, зубодовбанням, протягуванням, шевінгуванням, зубошліфуванням, хонінгуванням та іншими способами. Вибір методу залежить від типу зубчастого колеса, модуля, числа зубців, точності, серійності виробництва та наявного обладнання. Для виготовлення зубчастих коліс зовнішнього зачеплення широко застосовують методи обкатки, які забезпечують формування евольвентного профілю зубців за рахунок узгодженого руху інструмента і заготовки.

Особливе місце серед методів зубооробки займає зубодовбання, яке виконується зубонарізним довбачем. Зубонарізний довбач являє собою інструмент, форма якого подібна до зубчастого колеса. Під час роботи довбач здійснює зворотно-поступальний рух різання вздовж осі заготовки, а заготовка та інструмент одночасно обертаються за законом зачеплення. Завдяки такому поєднанню рухів формується профіль зубців оброблюваного колеса.

Зубодовбання застосовують для оброблення зовнішніх і внутрішніх циліндричних зубчастих коліс, а також зубчастих вінців, розташованих поблизу буртів, уступів або інших конструктивних елементів, де використання черв'ячної фрези ускладнене.

Перевагою оброблення зубчастого вінця довбачем є універсальність методу, можливість отримання точного евольвентного профілю, оброблення коліс складної конструкції та використання інструмента одного модуля для коліс із різною кількістю зубців. Крім того, зубодовбання є ефективним для деталей, у яких зубчастий вінець має обмежений вихід інструмента або розташований біля торцевого уступу. До недоліків методу можна віднести меншу продуктивність порівняно із зубофрезеруванням, оскільки різання відбувається періодично, під час робочого ходу довбача. Однак для певних конструкцій зубчастих коліс саме зубодовбання є найбільш доцільним способом формоутворення зубчастого вінця.

Другим важливим конструктивним елементом зубчастого колеса є центральний посадковий отвір. Його призначення полягає у забезпеченні точного встановлення колеса на валу, передачі навантаження та збереженні співвісності зубчастого вінця відносно осі обертання. Посадковий отвір може бути гладким циліндричним, шпонковим або шліцьовим. У випадку шліцьового з'єднання на внутрішній поверхні отвору виконують шліци, які утворюють багатозубе з'єднання вала з маточиною колеса. Таке з'єднання забезпечує надійну передачу крутного моменту, краще центрування та більш рівномірний розподіл навантаження порівняно з одиничним шпонковим з'єднанням.

Конструктивними елементами шліцьового посадкового отвору є внутрішній діаметр, зовнішній діаметр по вершинах або западинах шліців, ширина шліца, кількість шліців, профіль бокових поверхонь, фаски на вході та виході, а також торцеві поверхні маточини. Залежно від призначення деталі шліци можуть бути прямобічними або евольвентними. Для забезпечення якісного складання шліцьового з'єднання необхідно витримати точність розмірів, співвісність отвору із зовнішніми поверхнями колеса, правильність форми шліців і шорсткість робочих поверхонь.

Оброблення центрального посадкового отвору виконується у кілька етапів. Спочатку отримують попередній отвір свердлінням, розточуванням або зенкеруванням. Далі виконують чистову обробку базового отвору, після чого формують шліцьовий профіль. Одним із найбільш продуктивних і точних способів виготовлення шліцьових отворів у серійному та масовому виробництві є протягування. Для цього застосовують шліцьові протяжки, які за один робочий хід послідовно зрізають припуск і формують остаточний профіль отвору.

Шліцьова протяжка є багатолезовим різальним інструментом, зубці якого розміщені послідовно вздовж осі інструмента. Кожен наступний зубець має дещо більший розмір або відповідну зміну профілю, завдяки чому припуск знімається поступово. У конструкції протяжки розрізняють хвостовик, передню напрямну, робочу частину, що містить чорнові, перехідні, чистові та калібрувальні зубці, а також задню напрямну. Для оброблення шліцьового отвору зубчастого колеса протяжка повинна забезпечувати формування необхідної кількості шліців, їх ширини, глибини, профілю та якості поверхні.

Перевагами протягування шліцьових отворів є висока продуктивність, стабільність розмірів, добра якість поверхні, можливість отримання складного внутрішнього профілю за один прохід і висока повторюваність результатів. Особливо ефективним цей метод є у серійному виробництві, коли висока вартість спеціального інструмента компенсується великою кількістю деталей. Недоліком протягування є потреба у спеціалізованому протяжному верстаті та індивідуальному проєктуванні протяжки під конкретний профіль отвору.

З технологічної точки зору зубчасте колесо, що має зовнішній зубчастий вінець і внутрішній шліцьовий отвір, є відповідальною деталлю, оскільки точність її роботи залежить від взаємного розташування зовнішніх і внутрішніх поверхонь. Особливу увагу необхідно приділяти вибору технологічних баз. Найдоцільніше забезпечувати оброблення зубчастого вінця відносно посадкового отвору або базових торцевих поверхонь, оскільки саме посадковий отвір визначає положення колеса на валу під час експлуатації. Недостатня співвісність отвору і зубчастого вінця може призвести до нерівномірного зачеплення, підвищеного шуму, вібрацій, локального спрацювання зубців і зменшення довговічності передачі.

Отже, аналіз технологічності зубчастого колеса показує, що основними елементами, які визначають якість і працездатність деталі, є зубчастий вінець і центральний посадковий отвір. Зубчастий вінець забезпечує передачу руху і навантаження в зачепленні, тому потребує точного формоутворення зубців, зокрема із застосуванням зубонарізного довбача. Посадковий шліцьовий отвір забезпечує з'єднання колеса з валом і передавання крутного моменту, тому його доцільно обробляти шліцьовою протяжкою. Поєднання цих технологічних процесів дає змогу отримати деталь із необхідною точністю, жорсткістю, якістю поверхонь і експлуатаційною надійністю.

1.2. Характерні особливості конструкцій внутрішніх протяжок

Залежно від особливостей виконуваної операції інструменти для оброблення отворів поділяють на два основні види: протяжки та прошивки. Під час протягування застосовують протяжку – багатолезовий інструмент, виконаний у вигляді видовженого стрижня, на робочій частині якого послідовно розміщені різальні зубці з поступовим збільшенням їхніх розмірів. У процесі роботи така протяжка переміщується через оброблюваний отвір і сприймає переважно розтягувальне навантаження. На відміну від цього, при прошиванні використовують прошивку, яку не протягують, а проштовхують крізь отвір заготовки. У цьому випадку інструмент працює в умовах стиску та може зазнавати поздовжнього згину, що необхідно враховувати під час його конструювання [2, 9].

Внутрішні протяжки, які можуть мати цільну або збірну конструкцію, класифікують за формою отвору, що підлягає обробленню. За цією ознакою розрізняють круглі, багатогранні, шліцьові, шпонкові та інші типи протяжок. Кожен із зазначених видів призначений для формування відповідного профілю внутрішньої поверхні деталі та вибирається з урахуванням конструкції отвору, вимог до точності й умов виробництва.

Внутрішня протяжка є багатолезовим різальним інструментом, призначеним для оброблення попередньо підготовлених отворів різної форми. Її застосовують у тих випадках, коли необхідно отримати отвір із високою точністю

розмірів, правильною геометричною формою та малою шорсткістю поверхні. Особливістю протягування є те, що припуск знімається не одним різальним лезом, а послідовністю зубів, розташованих уздовж осі інструмента. Кожен наступний зуб має дещо більший розмір або змінений профіль, тому в процесі одного робочого ходу поступово формується остаточна поверхня отвору.

Внутрішні протяжки використовують для оброблення круглих, багатогранних, шпонкових, шліцьових, фасонних та інших отворів. Класифікацію внутрішніх протяжок за формою оброблюваного отвору наведено на рис. 1.5. За конструктивним виконанням вони можуть бути цільними, збірними, складеними або секційними. Цільні протяжки виготовляють з однієї заготовки інструментального матеріалу, найчастіше зі швидкорізальної сталі. Така конструкція є достатньо жорсткою і технологічно простою, однак у разі спрацювання або пошкодження окремої ділянки заміні підлягає весь інструмент. Збірні та секційні протяжки застосовують переважно для великих розмірів, складних профілів або дорогих інструментів, коли доцільно передбачити можливість заміни окремих різальних елементів.

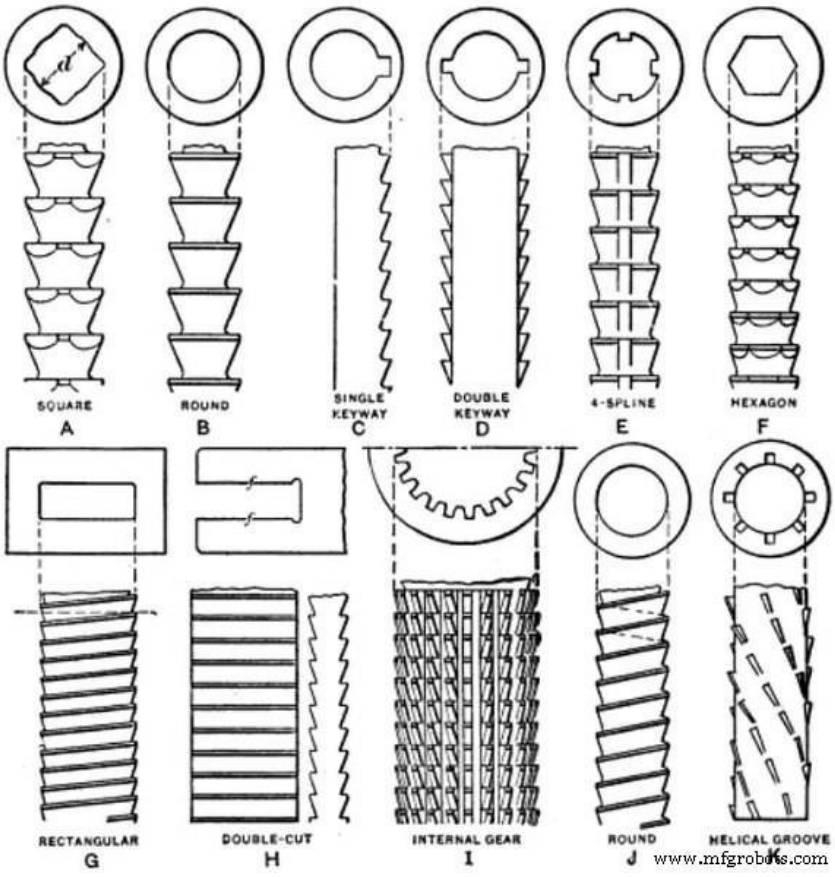


Рисунок 1.5 – Основні типи внутрішніх протяжок за формою оброблюваного отвору

Типова внутрішня протяжка (рис. 1.6) складається з кількох конструктивних частин: хвостовика, шийки, передньої напрямної, робочої частини, задньої напрямної та заднього хвостовика або елемента для зворотного транспортування інструмента. Кожна з цих частин виконує певну функцію і впливає на працездатність протяжки, точність оброблення та надійність роботи інструмента під навантаженням.

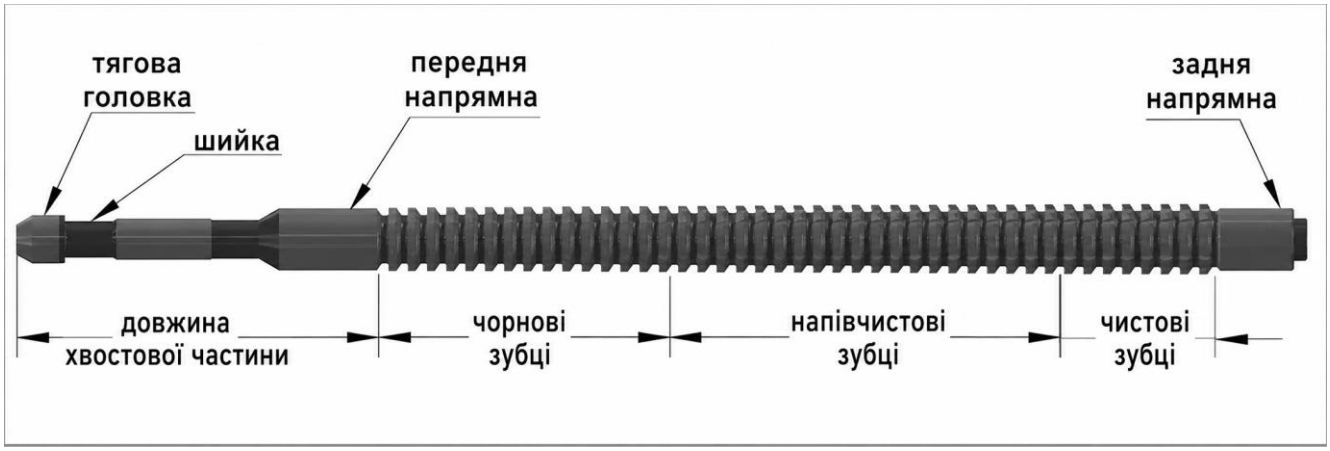


Рисунок 1.6 –Конструктивні елементи внутрішньої протяжки

Хвостовик протяжки призначений для закріплення інструмента в тяговому пристрої верстата. Через нього передається основне тягове зусилля, необхідне для протягування інструмента крізь отвір заготовки. Конструкція хвостовика залежить від типу протяжного верстата, способу кріплення, діаметра протяжки та величини розрахункової сили різання. Хвостовик може мати циліндричну, конічну, плоску або спеціальну форму відповідно до стандартів і конструкції патрона верстата. Під час проєктування хвостовик перевіряють на міцність, оскільки його руйнування під час роботи може призвести до пошкодження інструмента, деталі або обладнання.

За хвостовиком розташовується шийка. Вона є перехідною ділянкою між хвостовиком і напрямною частиною протяжки. У багатьох конструкціях шийка має менший діаметр, ніж сусідні ділянки інструмента. Така форма необхідна для зручності закріплення, компенсації конструктивних переходів і зменшення концентрації напружень. Крім того, шийка може виконувати роль умовно ослабленої ділянки, у якій у разі перевантаження інструмент руйнується більш прогнозовано, не пошкоджуючи відповідальні різальні зуби.

Передня напрямна призначена для початкового центрування протяжки в попередньо обробленому отворі. Вона входить в отвір до початку роботи різальних зубців і забезпечує правильне положення осі інструмента відносно осі заготовки. Завдяки цьому зменшується перекіс протяжки, підвищується точність оброблення і знижується ймовірність нерівномірного знімання припуску. Діаметр передньої напрямної вибирають з урахуванням розміру попереднього отвору та необхідного зазору для вільного проходження інструмента. Довжина напрямної повинна забезпечувати стійке базування протяжки до моменту входження в роботу перших різальних зубців.

Основною частиною внутрішньої протяжки є робоча частина (див. рис. 1.6), на якій розміщуються різальні та калібрувальні зуби. Вона забезпечує поступове знімання припуску, формування профілю отвору та досягнення необхідної точності. Робочу частину умовно поділяють на чорнову, перехідну, чистову та калібрувальну ділянки. Такий поділ дає змогу раціонально розподілити припуск між зубцями, зменшити силове навантаження на інструмент і забезпечити необхідну якість поверхні [1, 4].

Чорнові зуби призначені для знімання основної частини припуску. Вони мають найбільшу подачу на зуб і працюють в умовах значного навантаження. Саме чорнова частина значною мірою визначає величину сили різання, довжину робочої частини та продуктивність процесу. Геометрія чорнових зубів повинна забезпечувати стійке різання, достатню міцність зуба та надійне розміщення стружки у стружкових канавках. Для зменшення ширини стружки на зубах можуть виконуватися стружкорозділювальні канавки або викружки.

Перехідні зуби розташовуються після чорнових і забезпечують поступове зменшення подачі на зуб. Їх призначення полягає у плавному переході від інтенсивного чорнового знімання металу до чистового формоутворення поверхні. Перехідна частина зменшує різкі зміни навантаження між окремими ділянками протяжки, сприяє стабільності процесу різання та покращує умови роботи чистових зубців.

Чистові зуби знімають невеликий шар матеріалу та формують поверхню з більш високою точністю і меншою шорсткістю. Подача на чистових зубах значно менша, ніж на чорнових, тому навантаження на них нижче. Водночас саме чистова частина значною мірою визначає кінцеву якість обробленого отвору.

Профіль чистових зубів повинен відповідати остаточному профілю поверхні, яку необхідно отримати після протягування.

Калібрувальні зуби зазвичай мають однаковий розмір і не призначені для інтенсивного знімання металу. Їх основна функція полягає у стабілізації розміру, згладжуванні незначних нерівностей, підвищенні точності та забезпеченні сталої геометрії отвору.

Між зубами протяжки розміщуються стружкові канавки. Вони призначені для накопичення та відведення стружки, що утворюється під час зрізання припуску. Розміри стружкових канавок мають бути достатніми для розміщення всього об’єму стружки, який утворюється одним зубцем на довжині оброблюваного отвору. Якщо канавка має недостатній об’єм, стружка ущільнюється, зростає сила різання, погіршується якість поверхні та підвищується небезпека поломки зубців. Водночас надмірна глибина канавок зменшує міцність і жорсткість тіла протяжки, тому їх розміри вибирають з урахуванням балансу між місткістю стружкової канавки та міцністю інструмента.

Важливими геометричними параметрами зубців протяжки є передній кут, задній кут, крок зубців, висота зубця, ширина стрічки, радіуси заокруглення у стружковій канавці та підйом на зуб. Передній кут впливає на умови стружкоутворення і силу різання. Задній кут забезпечує зменшення тертя задньої поверхні зубця об оброблену поверхню. Крок зубів визначає кількість зубів, які одночасно перебувають у контакті з деталлю.

Після робочої частини розташовується задня напрямна. Вона служить для підтримання інструмента після виходу різальних зубців із отвору та забезпечує правильне спрямування протяжки в кінці робочого ходу. Задня напрямна також сприяє зменшенню перекосу інструмента, підвищує стабільність процесу та покращує точність оброблення.

Матеріал внутрішньої протяжки повинен забезпечувати високу твердість, зносостійкість, теплостійкість і достатню міцність. Найчастіше протяжки виготовляють зі швидкорізальних сталей, які після термічної обробки здатні тривалий час зберігати різальні властивості. Для окремих умов можуть застосовуватися леговані інструментальні сталі, а для підвищення стійкості – зносостійкі покриття. Вибір матеріалу залежить від матеріалу оброблюваної деталі, типу виробництва, точності, вартості інструмента та очікуваного ресурсу.

Особливості конструкції шліцьових протяжок. Шліцьові протяжки є різновидом внутрішніх протяжок і призначені для оброблення внутрішніх шліцьових отворів. Такі отвори застосовують у зубчастих колесах, муфтах, втулках та інших деталях, які повинні передавати крутний момент через багатозубе з’єднання з валом. На відміну від круглих протяжок, шліцьова протяжка формує не лише циліндричну поверхню отвору, а й систему внутрішніх пазів або зубців, розташованих по колу (рис. 1.7).

Рисунок 1.7 – Приклад конструкції внутрішньої шліцьової протяжки

Конструкція шліцьової протяжки визначається профілем шліцьового з’єднання, кількістю шліців, їх шириною, глибиною, типом центрування та вимогами до точності. У робочій частині такої протяжки можуть бути передбачені круглі, фасочні та шліцьові зубці. Круглі зубці забезпечують оброблення або калібрування базового діаметра отвору. Фасочні зубці формують фаски або перехідні ділянки біля шліців, а шліцьові зубці безпосередньо утворюють профіль шліцьових пазів. Послідовність розміщення цих зубців залежить від конструкції отвору та вимог до точності взаємного розташування поверхонь.

Особливістю шліцьових протяжок є складніший профіль зубців порівняно з круглими протяжками. Кожен шліцьовий зубець повинен відповідати формі майбутньої западини або бокової поверхні шліца. При цьому необхідно забезпечити рівномірне знімання припуску по всіх шліцьових елементах, достатню міцність зубців і надійне розміщення стружки. Для зменшення сил різання шліцьова частина часто виконується секційною, а припуск розподіляється між чорновими, перехідними, чистовими та калібрувальними зубцями.

У шліцьових протяжках особливу увагу приділяють напрямним частинам. Передня напрямна повинна точно встановлювати інструмент у попередньо підготовленому отворі, оскільки навіть незначний перекіс може спричинити нерівномірну ширину шліців або відхилення їх положення відносно осі. Задня напрямна стабілізує інструмент після проходження робочої частини та допомагає зберегти співвісність обробленого профілю. Для зубчастого колеса це особливо важливо, оскільки шліцьовий отвір є базовим елементом під час установлення деталі на валу.

Під час конструювання шліцьової протяжки враховують не тільки форму шліців, а й допустиму силу різання, міцність хвостовика, жорсткість тіла інструмента, кількість одночасно працюючих зубців і можливості протяжного верстата. За правильно вибраної конструкції шліцьова протяжка дає змогу за один робочий хід отримати точний внутрішній профіль, забезпечити необхідну якість поверхні та високу повторюваність розмірів у серійному виробництві.

1.3. Реалізація методів нарізання зубів на зубчастих колесах

Найбільш поширеним способом виготовлення зубчастих коліс є механічне оброблення різанням, оскільки саме воно дає змогу забезпечити необхідну точність профілю зубців [12], кроку та взаємного розташування робочих поверхонь. Якщо до точності зубчастого колеса не висуваються високі вимоги, його можна виготовляти литтям. Для зубчастих коліс із малим модулем у виробничій практиці також застосовують накочування, що дає змогу формувати зубчастий профіль без знімання стружки [3, 5, 6, 10, 11].

У разі використання лезового різального інструмента формоутворення профілю зубців може здійснюватися двома основними методами: копіюванням і обкатуванням.

Метод копіювання полягає в тому, що профіль різальної частини інструмента відповідає формі западини між зубами колеса, яке обробляється. У цьому випадку форма западини відтворюється безпосередньо геометрією інструмента. Для такого способу оброблення застосовують модульні фрези – дискові або пальцеві (рис. 1.8), профіль яких забезпечує отримання необхідної конфігурації міжзубцевої западини.

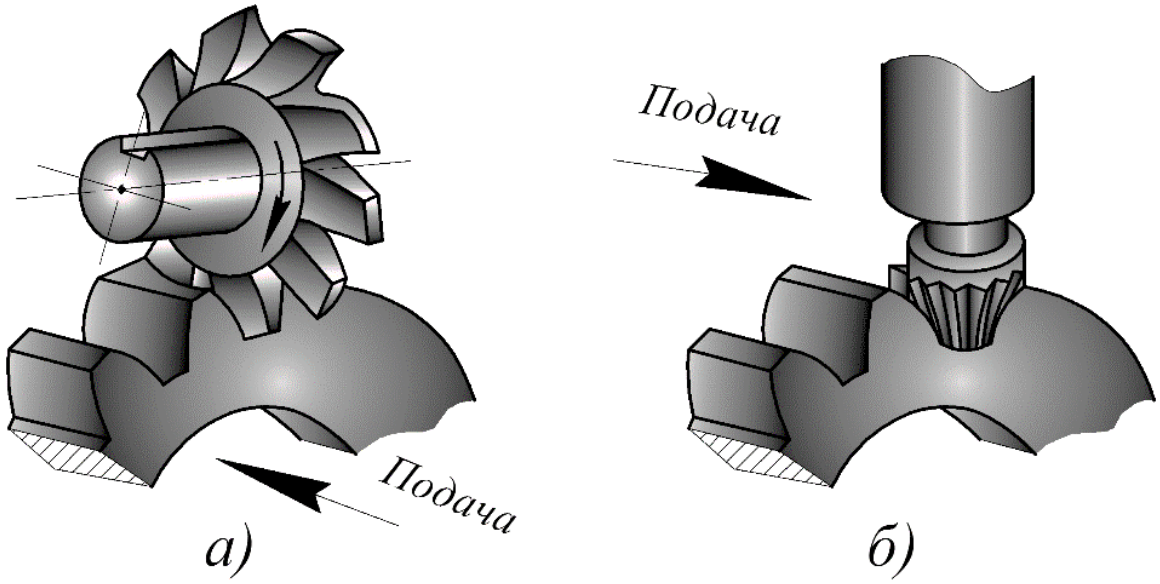
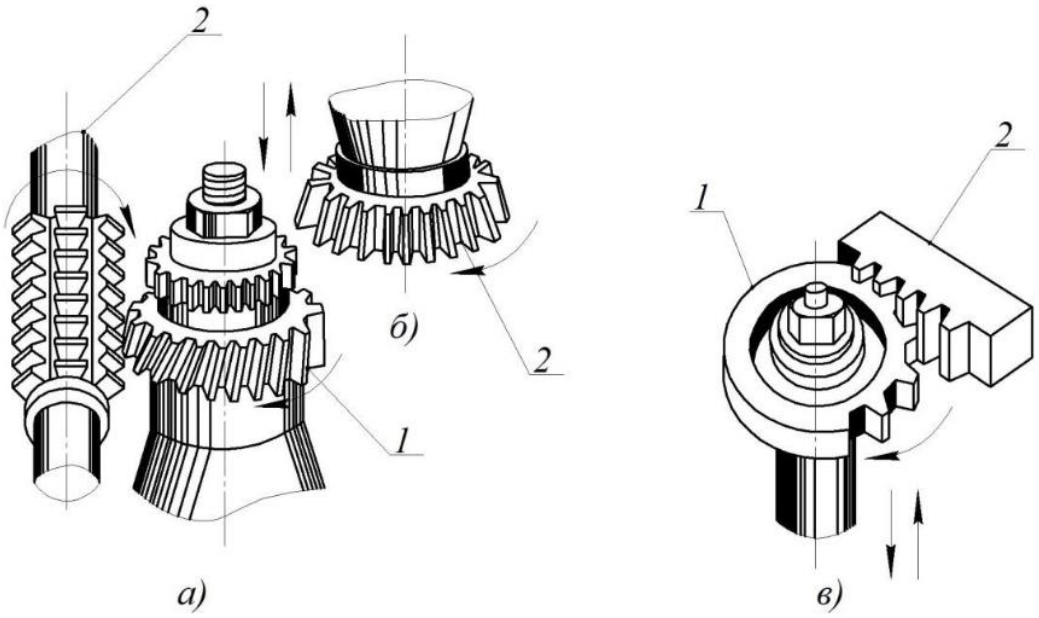


Рисунок 1.8 – Зубообробка фасонними модульними фрезами [13]:
а) дисковою; б) пальцевою

Основними недоліками нарізування зубчастих коліс методом копіювання є відносно невисока точність формування зубчастого профілю, обмежена продуктивність процесу та потреба у використанні спеціальних комплектів модульних фрез для кожного конкретного модуля зачеплення. Залежно від діапазону чисел зубців коліс, що підлягають обробленню, такі комплекти можуть містити 8, 15 або 26 фрез.

Нарізування зубчастих коліс методом обкатування (рис. 1.9) ґрунтується на відтворенні кінематики реального зубчастого зачеплення між інструментом і заготовкою [14, 15]. Під час оброблення циліндричних зубчастих коліс для цього застосовують зубонарізні довбачі, робота яких імітує взаємодію спряженої зубчастої пари. Для виготовлення елементів черв'ячних передач використовують черв'ячні модульні фрези, які також працюють за принципом обкатування.

Метод обкатування може реалізовуватися із застосуванням стругальних, довбальних або спеціальних обкатних різців. Завдяки узгодженому руху інструмента і заготовки цей спосіб забезпечує точніше формування евольвентного профілю зубця, рівномірність кроку та стабільність геометричних параметрів зубчастого вінця. Порівняно з методом копіювання обкатування характеризується вищою точністю, кращою повторюваністю результатів і більшою продуктивністю оброблення.



1 – циліндричне зубчасте колесо; 2 – зубонарізний інструмент

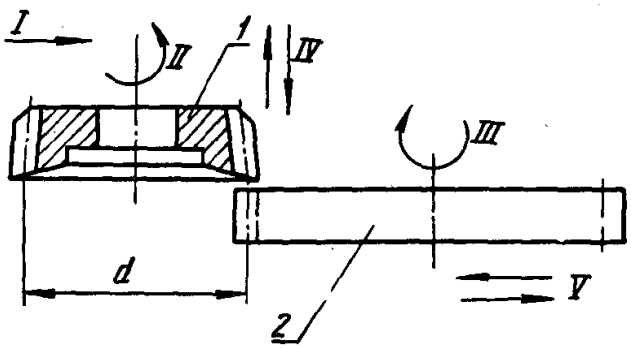
Рисунок 1.9 – Існуючі схеми, які реалізують нарізування циліндричних зубчастих коліс методом обкачування [13]:
а) черв'ячною фрезою; б) довбачем; *в*) гребінкою.

Завдяки високій продуктивності та можливості забезпечення стабільної якості оброблення значного поширення в машинобудуванні набули черв'ячні зуборізні фрези (рис. 1.9, *а*). Їх застосовують для нарізування зубців на циліндричних зубчастих колесах, зокрема колесах із прямими зубцями. У процесі зубофрезерування черв'ячна фреза та заготовка здійснюють узгоджені обертальні рухи навколо власних осей, а фреза додатково переміщується вздовж осі заготовки з подачею.

Обертання інструмента і заготовки кінематично пов'язані між собою відповідно до параметрів зубчастого зачеплення, що формується. Для однозаходної черв'ячної фрези один повний оберт інструмента відповідає повороту заготовки на кут, що дорівнює одному кроку зубця. За своєю конструктивною основою черв'ячна фреза є вихідним черв'яком, перетвореним на різальний інструмент шляхом виконання стружкових канавок і затилування зубців. Під час оброблення відтворюється взаємодія, подібна до зачеплення вихідного черв'яка з оброблюваним зубчастим колесом, що забезпечує формування необхідного профілю зубців.

Зубофрезерування черв'ячною фрезою належить до безперервних методів зубообробки, оскільки процес різання відбувається безперервно під час узгодженого руху інструмента та заготовки. Це забезпечує високу продуктивність, рівномірність формування зубчастого вінця та сталість результатів оброблення.

На рис. 1.10 наведено кінематичну схему роботи зубодовбального інструмента – довбача. На схемі показано основні рухи, які здійснюють інструмент і заготовка під час формоутворення зубчастого профілю, зокрема зворотно-поступальний рух довбача, узгоджене обертання інструмента та заготовки, а також допоміжні рухи.



1 – зубонарізний довбач; 2 – зубчасте колесо

Рисунок 1.10 – Кінематика процесу зубодовбання

Процес роботи зубонарізного довбача включає кілька взаємопов'язаних рухів, які забезпечують формоутворення зубчастого профілю методом обкатування.

I – радіальне врізання інструмента в матеріал заготовки, під час якого довбач поступово підводиться до необхідної глибини різання;

II – обертальний рух довбача навколо власної осі;

III – обертання заготовки навколо своєї осі, яке кінематично узгоджується з обертанням довбача відповідно до заданого передаточного відношення;

IV – зворотно-поступальний рух довбача, що складається з робочого ходу, під час якого відбувається зрізання шару металу, та зворотного холостого ходу;

V – відведення заготовки від інструмента на початку зворотного ходу для запобігання тертю зубців довбача об уже оброблену поверхню. Наприкінці холостого ходу заготовка знову повертається у робоче положення.

Узгоджене виконання зазначених рухів дає змогу реалізувати процес зубодовбання за принципом обкатування. Завдяки цьому формується правильний профіль зубців, забезпечується необхідна точність зубчастого вінця та досягається належна якість обробленої поверхні.

Зуборізні довбачі працюють за принципом обкатування, тобто профіль зубців формується внаслідок узгодженого руху інструмента та заготовки, подібного до роботи зубчастої пари. На відміну від черв'ячних фрез, конструктивною основою довбача є не вихідна рейка, а зубчасте колесо-шестерня з відповідними геометричними параметрами зубчастого профілю.

Продуктивність зубодовбання, як правило, дещо нижча порівняно із зубофрезеруванням черв'ячними фрезами. Це пояснюється переривчастим характером різання, оскільки знімання металу відбувається лише під час робочого ходу довбача. Однак зуборізні довбачі мають ширші технологічні можливості й можуть застосовуватися для оброблення таких деталей, які неможливо або складно виготовити черв'ячними фрезами. До них належать багатоступінчасті блоки зубчастих коліс, шевронні колеса, зубчасті колеса з внутрішнім зачепленням, а також колеса, розташовані поблизу буртів, уступів або інших конструктивних перешкод.

Крім того, застосування довбачів дає змогу отримати високу точність профілю зубців і належну якість обробленої поверхні. Це особливо важливо під час виготовлення відповідальних зубчастих передач, для яких необхідно забезпечити правильність евольвентного профілю, рівномірність кроку та стабільну роботу зачеплення.

Залежно від виду оброблюваних зубчастих деталей зуборізні довбачі поділяють на три основні групи:

– прямозубі довбачі, які застосовують для нарізування прямозубих циліндричних зубчастих коліс;

– косозубі довбачі, призначені для оброблення зубчастих коліс із гвинтовими зубцями, а також шевронних коліс;

– спеціальні довбачі, які використовують для виготовлення зубчастих деталей із нестандартним або неевольвентним профілем, зокрема зірочок, шліцьових валів та інших елементів спеціальних зачеплень.

За конструктивним виконанням зубонарізні довбачі бувають (рис. 1.11):

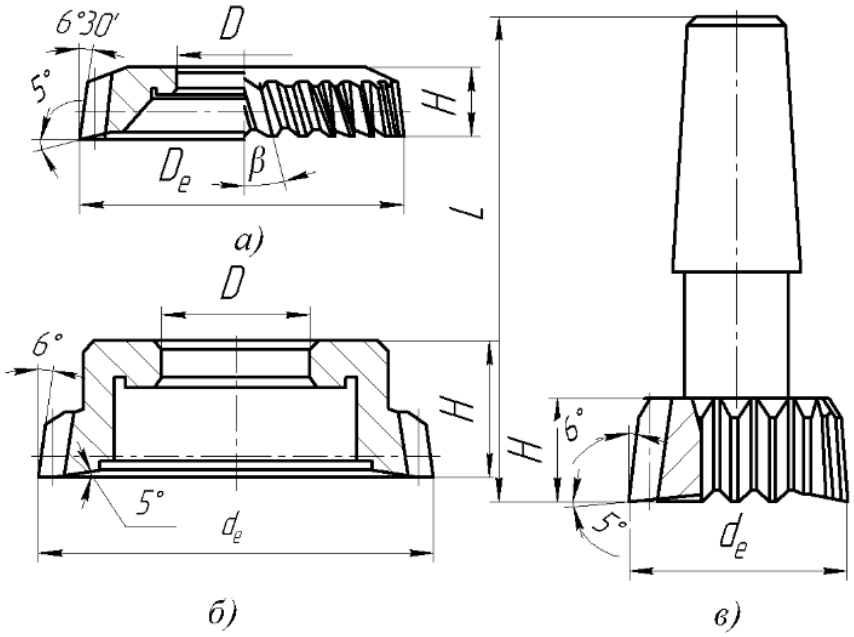


Рисунок 1.11 – Існуючі типи довбачів [13]:

а) довбач дисковий насадний;

б) довбач чашковий насадний;

в) довбач хвостовий

За точністю виготовлення зуборізні довбачі поділяють на три класи: *АА*, *А* та *В*. Вибір класу точності залежить від вимог до зубчастого колеса, яке обробляється, зокрема від необхідної точності профілю зубців, кроку та якості зубчастого зачеплення.

Для забезпечення нормальних умов різання довбач має спеціальну геометрію, яка відрізняється від форми звичайного зубчастого колеса. Така конструктивна модифікація необхідна для створення різальних кромок, задніх і передніх кутів, а також для правильного формоутворення профілю зубця під час обкатування. Завдяки цьому в процесі зубодовбання забезпечується отримання заданої евольвентної форми зуба та необхідної точності зубчастого вінця.

2. ПРОЕКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ШЛІЦЬОВОЇ ПРОТЯЖКИ

2.1. Загальні позначення змінних до розрахунку внутрішньої протяжки

У цьому розділі виконується розрахунок і конструктивне опрацювання шліцьової протяжки, призначеної для оброблення шліцьового отвору зубчастого колеса [7, 8].

Вихідними даними для проєктування протяжки є марка матеріалу деталі та його твердість, початковий стан поверхні перед операцією протягування, а також форма й основні розміри оброблюваного отвору. Крім того, враховують вимоги до точності отримуваних розмірів і шорсткості поверхні після оброблення.

Під час розрахунку також беруть до уваги технічні характеристики протяжного верстата, зокрема його тягову силу, довжину ходу штока, діапазон робочих швидкостей і фактичний технічний стан обладнання. Додатково враховують тип виробництва та технологічні можливості інструментального цеху, від яких залежить вибір конструкції, матеріалу та способу виготовлення протяжки.

У подальших розрахунках використовуються такі умовні позначення.

Стосовно оброблюваної заготовки:

D_o – діаметр отвору заготовки до процесу обробки протягуванням;

D – значення зовнішнього діаметру шліцьового отвору заготовки;

d – значення внутрішнього діаметру шліцьового отвору заготовки;

b – величина ширина пазу шліцьового отвору заготовки;

Z – кількість шліців шліцьового отвору заготовки;

f – значення фаски на шліцах шліцьового отвору заготовки;

l – величина довжини оброблюваної поверхні заготовки.

Стосовно до шліцьової протяжки:

z – кількість зубів;

t – величина кроку зубів;

h – значення глибини стружкової канавки протяжки;

В – значення ширини сектора різання зачисного зуба;

Б – значення ширини сектору різання прорізних зубів;

p – велична периметру зрізу;

s – значення подачі (підйом на зуб) або (на секцію зубів);

q_o – велична питомої сили різання, що діє на 1 мм довжини периметру зрізу;

i – кількість секцій зубів протяжки;

К – значення коефіцієнту поміщення стружки в стружкову канавку;

K_P – значення коефіцієнту, що враховує відмінність умов обробки;

А – величина загального припуску на обробку;

l – значення довжини конкретної ділянки протяжки;

$P_{хв}$, $P_{неб}$, P_{max} – значення зусиль, допустимі міцністю хвостовика, міцністю самого небезпечного перерізу інструменту і максимальної на протяжки;

Q – величина тягового зусилля протяжного верстату;

σ_{pp} – величина допустимих напруг в самому небезпечному перерізі протяжки;

V – велична швидкість різання при протягуванні;

γ, α – величина геометричних параметрів переднього і заднього кутів;

a – величина ширина викружок зубів протяжки;

n – кількість викружок зубів протяжки.

Індекси біля умовних позначень *о, п, ч, к* позначають чорнову, перехідну, чистову та калібрувальну частину протяжок; Σ – відповідає значенню всієї протяжки; *р* – стосується різальної частини; *кр*, *ф*, *ш* – означає круглі, фасочні і шліцьові зуби протяжки.

2.2. Проектувальний розрахунок внутрішньої шліцьової протяжки

Проєктування шліцьової протяжки виконують за встановленою послідовністю, що дає змогу врахувати властивості оброблюваного матеріалу, вимоги до точності поверхні та конструктивні особливості інструмента.

1. На початковому етапі визначають групу оброблюваності матеріалу заготовки. Для цього враховують марку матеріалу деталі, його механічні властивості та твердість, оскільки саме ці параметри впливають на вибір режимів різання, геометрії зубців і матеріалу різальної частини протяжки.

2. Встановлюють групу якості оброблюваної поверхні. Вона призначається залежно від необхідної точності виготовлення посадкового отвору, допусків на розміри та заданої шорсткості поверхні після протягування. Цей етап є важливим, оскільки від нього залежить кількість чорнових, перехідних і калібрувальних зубців інструмента.

3. Обирають матеріал різальної частини протяжки. Його призначають з урахуванням типу виробництва, конструкції деталі, властивостей оброблюваного матеріалу, а також умов роботи інструмента. Для забезпечення необхідної стійкості протяжки матеріал різальної частини повинен мати достатню твердість, зносостійкість і теплостійкість.

4. Наступним етапом є вибір способу з'єднання хвостовика з робочою частиною протяжки. При цьому визначають конструктивне виконання хвостовика, його типорозмір і основні геометричні параметри, які мають відповідати умовам закріплення інструмента на протяжному верстаті:

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

отримане значення діаметра хвостовика узгоджують зі стандартним рядом типорозмірів і приймають найближче стандартне значення, яке відповідає конструктивним та міцнісним вимогам до інструмента.

Після вибору типу хвостовика та встановлення його основних розмірів визначають допустиме тягове зусилля $P_{хв}$, яке може бути сприйняте хвостовиком без втрати міцності. Це зусилля характеризує граничне навантаження, за якого хвостова частина протяжки забезпечує надійне закріплення інструмента та безпечну роботу під час процесу протягування.

5. Задають геометричні параметри різальних зубців протяжки, зокрема значення переднього кута γ та заднього кута α. Їх вибір здійснюють з урахуванням групи оброблюваності матеріалу деталі, вимог до якості оброблюваної поверхні, а

також призначення відповідних зубців протяжки. Правильно вибрані кути забезпечують сприятливі умови різання, зменшення силового навантаження на інструмент і підвищення стійкості його різальної частини.

6. Призначають швидкість різання (V). Її вибирають відповідно до групи оброблюваності матеріалу та групи якості поверхні, яку необхідно отримати після протягування. Додатково прийняте значення швидкості уточнюють з урахуванням кінематичних можливостей протяжного верстата. Остаточно прийнята швидкість різання використовується у подальших розрахунках конструктивних і технологічних параметрів протяжки.

7. Далі встановлюють основні параметри чистової частини інструмента: кількість чистових зубців ($z_ч$), подачу або підйом на зуб ($s_ч$), а також величину припуску, що знімається чистовою частиною, ($A_ч$). Окремо приймають кількість калібрувальних зубців ($z_к$), які не призначені для інтенсивного знімання металу, а забезпечують остаточне формування розміру, стабілізацію профілю та досягнення необхідної якості обробленої поверхні.

8. Наступним етапом є вибір подачі чорнових зубців ($s_о$), яку призначають з умови забезпечення приблизно однакової стійкості різних ділянок протяжки. Спочатку, з урахуванням прийнятої швидкості різання, визначають розрахункову стійкість чистової частини інструмента.

Якщо швидкість різання для чистової та чорнової частин протяжки приймається однаковою, то для чорнової частини встановлюють таку стійкість, яка дорівнює або незначно перевищує стійкість чистової частини. За отриманим значенням стійкості визначають відповідну подачу чорнових зубців ($s_о$).

Після цього обране значення подачі перевіряють за допустимими межами. Для цього його порівнюють із максимально допустимою подачею чорнових зубців, установленою для відповідної групи оброблюваності матеріалу та групи якості оброблюваної поверхні. Прийнята подача ($s_о$) не повинна перевищувати граничних значень, оскільки надмірне збільшення подачі може спричинити підвищення сил різання, прискорене спрацювання зубців і погіршення якості оброблення.

9. Глибину стружкової канавки визначають із умови забезпечення достатнього об’єму для розміщення стружки, яка утворюється під час зрізання шару матеріалу одним зубцем протяжки. При цьому розміри канавки мають забезпечувати вільне розміщення та відведення стружки без її надмірного ущільнення, оскільки переповнення стружкової канавки може призвести до зростання сил різання, погіршення якості обробленої поверхні та підвищеного спрацювання інструмента:

$$h = 1.13\sqrt{ls_o K}\,. \tag{2.1}$$

Значення коефіцієнта (K), який враховує умови розміщення стружки у стружковій канавці, приймають залежно від властивостей оброблюваного матеріалу. Для сталей, що належать до I–III груп оброблюваності, а також для алюмінієвих і мідних сплавів приймають (K = 3). Для інших матеріалів, умови стружкоутворення яких є менш сприятливими або відрізняються від наведених груп, коефіцієнт приймають (K = 2,5).

Під час визначення глибини стружкової канавки необхідно також враховувати жорсткість протяжки. Для інструментів діаметром менше 45 мм глибина канавки обмежується вимогами до міцності та жорсткості тіла протяжки, тому її значення не повинно перевищувати допустимої межі:

$$h_{\max} = (0.2...0.3)D_o\,. \tag{2.2}$$

Із двох значень глибини канавки, отриманих за залежностями (2.1) та (2.2), для подальших розрахунків приймають менше значення. За визначеною величиною (h) підбирають відповідний стандартний розмір глибини стружкової канавки. Якщо розрахункове значення (h) отримане за формулою (2.1), то приймають найближче більше стандартне значення, за умови що воно не перевищує (h_{max}). У разі коли глибина канавки обмежується жорсткістю інструмента, вибирають найближче менше стандартне значення відносно (h_{max}). Для цього випадку максимальна подача, яка задовольняє умову розміщення стружки в канавці, визначається як:

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

10. Крок чорнових зубців (t_o) та форму профілю стружкової канавки вибирають залежно від попередньо прийнятої глибини канавки (h). Для кожного стандартного профілю стружкової канавки передбачено кілька можливих значень кроку зубців. У подальших розрахунках приймають найменше з рекомендованих значень кроку, оскільки це дає змогу забезпечити раціональну кількість зубців на робочій частині протяжки та стабільні умови зрізання припуску.

11. Кількість зубів протяжки, що в процесі обробки працюють одночасно:

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

Отримане розрахункове значення кількості одночасно працюючих зубів (z_p) округлюють до найближчого більшого цілого числа. При цьому значення ($z_p < 3$) не допускається, оскільки за меншої кількості зубів не забезпечується достатня рівномірність роботи протяжки. У такому випадку необхідно зменшити крок чорнових зубів (t_o), одночасно дотримуючись умови виконання рівності (2.3).

12. Максимально допустиме зусилля різання (P_{max}) визначають як найменше з кількох граничних значень, що характеризують міцнісні та технологічні обмеження роботи протяжки. До таких обмежувальних факторів належать допустиме зусилля за міцністю хвостовика ($P_{хв}$), номінальна тягова сила протяжного верстата (Q), а також зусилля, допустиме за небезпечним перерізом інструмента ($P_{неб}$). Отже, для подальших розрахунків приймають менше з цих значень:

$$P_{ст} = (0.8...0.9)Q;$$

$$P_{неб} = F_{неб}\sigma_{рр}.$$

Значення допустимого напруження розтягу ($\sigma_{рр}$) вибирають залежно від матеріалу протяжки та її діаметра. Для інструментів, виготовлених зі швидкоріжучих сталей, при діаметрі протяжки до 15 мм приймають $\sigma_{рр}$ = 400…500 МПа. Для протяжок більшого діаметра допустиме напруження зменшують і приймають у межах $\sigma_{рр}$ = 350…400 МПа. Якщо протяжка виготовляється зі сталі ХВГ, розрахункове значення допустимого напруження приймають рівним $\sigma_{рр}$ = 250 МПа.

13. Кількість зубів в одній різальній секції визначають:

$$z_c = pq_o z_p K_{pм} K_{po} K_{pp} K_{pк} / P_{\max}, \qquad (2.4)$$

де $K_{pм}, K_{po}, K_{pp}, K_{pк}$ – коефіцієнти, що враховують відміну умови різання в наслідок зміни матеріалу заготовки, стану заготовки і її твердості, типу ЗОР, використаного способу розподілу зрізу, групи якості обробної поверхні при протягуванні.

Визначення величини периметру зрізу шліцьових протяжок:

– на фасочній частині: $p = nb_ф$;

– на круглій частині, що розташована після фасочної: $p = nb_{кр}$;

– на шліцьовій частині: $p = nb_ш$.

Для шліцьових протяжок кількість одночасно працюючих зубців (z_c) обмежують з урахуванням ширини різального сектора та діаметра інструмента. Якщо для фасочних або круглих зубців розрахункове значення ($z_c < 1$), а ширина різального сектора не перевищує допустимих меж, то в подальших розрахунках допускається приймати ($z_c = 1$).

Для шліцьової частини протяжки умови вибору є дещо жорсткішими. Якщо розрахункове значення ($z_{cш} < 1$), то з метою забезпечення стабільнішого процесу різання та підвищення якості обробленої поверхні приймають ($z_{cш} = 2$). У випадку, коли отримане значення перебуває в межах ($1 < z_{cш} < 3$), необхідно виконати перевірочні розрахунки для двох варіантів: із округленням ($z_{cш}$) до меншого та до більшого цілого числа.

У разі округлення розрахункового значення кількості одночасно працюючих зубців (z_c) до величини (z_{cmax}) зусилля різання під час протягування не перевищуватиме максимально допустимого значення (P_{max}). Тому раніше прийняті параметри чорнової частини протяжки, а саме подача чорнових зубів (s_o), крок зубів (t_o) та кількість одночасно працюючих зубів (z_p), визначені у пунктах 8, 10 і 11, залишають без змін.

Якщо розрахункове значення кількості одночасно працюючих зубів (z_c) округлюють до (z_{cmin}), то фактична сила різання може перевищити допустиме

значення. Зменшити діюче навантаження до рівня, що не перевищує (P_{max}), можна шляхом коригування параметрів чорнової частини протяжки, насамперед зменшенням подачі чорнових зубців (s_o) та кількості одночасно працюючих зубців (z_p).

Для визначення зменшеної подачі чорнових зубців за умови збереження значення (z_p), прийнятого у пункті 11, обчислюють величину:

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

За визначеним значенням $q_{оум}$ визначаємо найближче менше значення q_o та таке що відповідає йому $s_{оум}$.

Зменшене умовне значення кількості одночасно працюючих зубців ($z_{рум}$) при подачі чорнових зубців (s_o), прийнятій у пункті 8, визначають за такою залежністю:

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

Приводимо значення $z_{рум}$ до найближчого меншого цілого числа, величину збільшеного кроку розраховуємо:

$$t_{оув} = \left(l / z_{рум} \right) + 0.4$$

обираємо найближче більше значення. Необхідно щоб значення величини (h) задовольняла умові (2.2).

Оскільки, величина $2 < z_c < 5$ не є цілим числом, то виходить цілих три різних виконання протяжки. Подальші розрахунки роблять для кожного виконання окремо.

14. Далі визначають параметри перехідної частини протяжки. Для цього призначають кількість перехідних секцій (i_n), установлюють значення подачі для кожної з них, а також визначають припуск (A_n), який знімається перехідними зубцями. Перехідна частина забезпечує поступовий перехід від чорнового знімання металу до чистового оброблення, що сприяє зменшенню навантаження на інструмент і підвищенню якості сформованої поверхні.

15. Розподіл величини припуску між зубами шліцьової протяжки.

Величина припуску на фасочну частину протяжки: $A_ф = D_ф - D_o$,

де значення діаметру останнього фасочного зуба: $D_ф = d + 2f + 0{,}4$.

Величина припуску на круглу частину протяжки: $A_{кр} = d_{\max} - D_{o\min}$.

Величина припуску шліцьової частини протяжки: $A_ш = D_{\max} - D_{ш1}$,

де значення діаметру першого шліцьового зуба протяжки: $D_{ш1} = D_ф - 0{,}1$.

Значення припусків на чорнові зуби протяжки: $A_o = A - A_n - A_ч$.

Значення припуску на перехідні зуби $A_{кп}$, $A_{шп}$, чистові зуби $A_{кч}$, $A_{шч}$ круглої і шліцьової частин визначають зі спеціалізованої довідкової літератури. Величина припуску на чорнові зуби протяжки:

$$A_{ок} = A_к - A_{кп} - A_{кч};$$

$$A_{шо} = A_ш - A_{шп} - A_{шч}.$$

16. Кількість секцій зубів чорнової частини та розподіл залишкового припуску.

Визначена кількість секцій зубів чорнової частини:

$$i_{ор} = A_o / (2s_o).$$

Кількість $i_{ор}$ як правило виходить не цілим та округляється до найближчого меншого значення i_o. Величина остаточного припуску визначається:

$$A_{ост} = A_o - 2i_o s_o.$$

Розподіл остаточного припуску між чорновою, перехідною та чистовою частинами протяжки виконують за такими умовами. Якщо величина ($0{,}5A_{ост}$) перевищує подачу першої перехідної секції, то до чорнової частини додають одну додаткову секцію з подачею, що дорівнює ($0{,}5A_{ост}$).

Якщо значення ($0{,}5A_{ост}$) є меншим за подачу першої перехідної секції, але водночас більшим за подачу першої чистової секції, тоді остаточний припуск відносять до перехідної частини. У цьому випадку до перехідної частини додають одну секцію з подачею (s_n =$0{,}5A_{ост}$).

Якщо ж величина ($0{,}5A_{ост}$) менша за подачу останньої перехідної секції, то остаточний припуск переносять на чистову частину протяжки. При цьому кількість чистових зубців відповідно збільшують для забезпечення повного зняття залишкового припуску та отримання необхідної якості обробленої поверхні.

17. Кількість зубів шліцьової протяжки.

Кількість фасочних зубців протяжки $z_ф = i_ф z_{сф}$;

кількість круглих зубів чорнової частини $z_{окр} = i_{ок} z_{ск}$;

кількість шліцьових зубів чорнової частини $z_{ош} = i_{ош} z_{сош} + 1$

кількість зубів інших частин перехідної, чистової та калібруючої круглої та шліцьової визначається зі спеціальної довідкової літератури.

18. Величина різальної частини шліцьової протяжки:

$$l_р = l_ф + l_{кп} + l_ш;$$

для протяжок, які мають круглі зуби, розташовані після фасочних:

$$l_ф = t_о z_ф;$$

$$l_{кр} = t_о\left(z_{окр} + z_{пкр}\right) + t_ч\left(z_{чкр} + z_{ккр} - 1\right);$$

$$l_ш = t_о\left(z_{ош} + z_{пш}\right) + t_ч\left(z_{чш} + z_{кш} - 1\right).$$

Значення величин кроків $t_ч$ і $t_к$ обирають відповідно до $t_о$.

Результати розрахунків, виконаних за пунктами 12–17 для різних конструктивних варіантів протяжки, порівнюють між собою з метою вибору найбільш раціонального варіанта. Оптимальним вважають той варіант, який забезпечує виконання технологічних і міцнісних вимог за найдоцільніших конструктивних параметрів інструмента. Подальше визначення всіх інших елементів протяжки виконують саме для прийнятого оптимального варіанта.

19. Розрахунок розмірних параметрів передньої напрямної протяжки

Значення діаметру передньої напрямної протяжки:

$$d_{пн} = D_{o\min}.$$

Величину відхилення $d_{пн}$ приймаємо за е8.

Значення довжини передньої напрямної протяжки для $l/D < 1.5$

$$l_{пн} = l_{\max},$$

для $l/D > 1.5$

$$l_{пн} = 0.75 l_{\max}.$$

20. Довжину напрямного конуса призначають залежно від діаметра протяжки. Цей елемент забезпечує плавне входження інструмента в оброблюваний отвір, правильне центрування протяжки на початку робочого ходу та зменшення ймовірності перекосу під час протягування.

21. Розмірні параметри зубів шліцьової протяжки.

Величина діаметру першого фасочного зуба протяжки:

$$D_{ф1} = D_o + A_{ост}.$$

Величина діаметрів інших фасочних зубів:

$$D_{фi} = D_{ф1} + 2s_ф(i-1).$$

Значення діаметру першого прорізного зуба чорнової частини (першого зуба при $z_c = 1$) круглої частини:

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

Значення діаметрів прорізних зубів інших секцій круглої частини протяжки:

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

Значення діаметрів першого шліцьового зуба чорнової частини протяжки:

$$D_{ш1} = D_{ф\max} - 0{,}1.$$

Значення діаметрів наступних шліцьових зубів чорнової частини:

$$D_{шi} = D_{ш1} + 2s_{ош}(i-1).$$

Значення діаметрів зубів калібрувальної частини визначається з обов’язковим додаванням верхнього відхилення отвору заготовки:

$$D_к = D + ES.$$

Допуски на виготовлення зубів шліцьових протяжок визначають за відповідними нормативними стандартами.

Для шліцьових протяжок, конструкція яких передбачає наявність першої фасочної частини, діаметр впадин фасочних і шліцьових зубців приймають $D_{фв} = D_{o\min}$ із полем допуску d11. Таке призначення відхилень забезпечує необхідну технологічну точність виготовлення відповідних елементів профілю протяжки та узгодженість їх розмірів із вимогами до оброблюваного шліцьового отвору.

22. Визначають кількість, ширину та радіуси викружок, які передбачаються на прорізних чорнових, перехідних і чистових зубцях протяжки. Ці елементи необхідні для поділу зрізуваного шару металу на окремі частини, поліпшення умов стружкоутворення та зменшення навантаження на різальні кромки інструмента під час протягування.

23. Розраховують розмірні параметри задньої напрямної.

Для шліцьових протяжок, у яких фасочні зубці розташовані перед круглими, діаметр задньої напрямної визначають з урахуванням конструктивної схеми інструмента та розмірів оброблюваного отвору. Значення діаметра задньої напрямної приймають за такою залежністю:

$$d_{зн} = d_{\min}$$

відхилення приймають за d_{11}.

Довжину задньої напрямної призначають залежно від діаметра напрямної частини протяжки, а також з урахуванням співвідношення між довжиною обробленого отвору та його діаметром. Такий підхід дає змогу забезпечити достатню стійкість і правильне спрямування інструмента після проходження робочої частини через отвір деталі.

24. Сумарне значення величини довжини шліцьової протяжки

$$L = l_{зч} + l_р + l_{зн} + l_ц,$$

де $l_{зч}$ – значення довжини з’єднувальної частини шліцьової протяжки від переднього торця до першого різального зуба.

Розмір ($l_{зч}$) приймають відповідно до паспортних даних протяжного верстата. При цьому загальна довжина протяжки має відповідати можливостям використовуваного обладнання: вона не повинна перевищувати хід каретки верстата. Крім того, довжину інструмента обмежують технологічними можливостями підприємства-виробника, зокрема умовами виготовлення, термічної обробки, шліфування та контролю протяжки.

25. Технічні вимоги до виготовлення протяжки, допуски на розміри та форму її окремих конструктивних елементів, а також параметри шорсткості робочих і допоміжних поверхонь призначають відповідно до чинних стандартів. Це забезпечує необхідну точність виготовлення інструмента, його працездатність, взаємозамінність і відповідність умовам експлуатації.

Кресленики протяжок змінного різання виконують відповідно до вимог чинних стандартів, які регламентують правила оформлення конструкторської документації, нанесення розмірів, допусків, технічних вимог і позначень. Дотримання цих вимог забезпечує правильність виготовлення інструмента, однозначність читання креслення та відповідність документації встановленим нормам.

2.3. Практичний розрахунок внутрішньої шліцьової протяжки

Розрахунки проводимо за допомогою спеціалізованого математичного пакету MathCAD.

Вихідні дані:

Діаметр отвору до протягування $D_o := 18$ $D_{omax} := D_o + 0.52$

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 $l_{хід} := 1600$

Діаметр хвостовика

$d_{хв} := D_o - 0.5$ $d_{хв} = 17.5$

Приймаємо $d_{хв} := 18$ $F_{хв} := 132.7$

Параметри чистової частини

Число зубців	$z_{чкр} := 6$	$z_{чш} := 6$
Припуск	$A_{чкр} := 0.1$	$A_{чш} := 0.08$
Число секцій	$i_{чкр} := 3$	$i_{чш} := 3$
Подача	$s_{чкр_1} := 0.02$	$s_{чш_1} := 0.02$
	$s_{чкр_2} := 0.02$	$s_{чш_2} := 0.01$
	$s_{чкр_3} := 0.01$	$s_{чш_3} := 0.01$

Подача чорнової частини $s_o := 0.21$

Глибина стружкової канавки

$K := 3$

з умови розміщення стружки $h := 1.13 \cdot \sqrt{1 \cdot s_o \cdot K}$ $h = 6.947$

з умови жорсткості $h_{max} := 0.3 \cdot D_o$ $h_{max} = 5.4$

Приймаємо $h := 5.0$

Перевіряємо і коригуємо подачу чорнової частини

$$s_{omax} := \text{round}\left(\frac{\pi \cdot h^2}{4 \cdot 1 \cdot K}, 2\right) \qquad s_{omax} = 0.11$$

$s_o := \min(s_o, s_{omax})$ $s_o = 0.11$

Крок чорнових зубців

$t_o := 12$

Число одночасно працюючих зубців

$$z_p := \frac{1}{t_o - 0.4} \qquad z_p = 5.172$$

$z_p := \text{round}(z_p, 0)$ $z_p = 5$

Робоча сила верстата

$P_{ст} := 0.9 \cdot Q$ $P_{ст} = 352800$

Сила, що допускається міцністю хвостовика

$\sigma_{хв} := 300$

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

Сила, що допускається небезпечним перерізом протяжки

$\sigma_{пр} := 400$

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

Сила різання

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

Периметр зрізу

$b_ф := b + 2 \cdot f$ $b_ф = 5.63$ $p_ф := Z \cdot b_ф$ $p_ф = 33.78$

$b_{кр} := \frac{\pi \cdot d}{Z} - (b + 2 \cdot f)$ $b_{кр} = 5.366$ $p_{кр} := Z \cdot b_{кр}$ $p_{кр} = 32.193$

$b_ш := b_{max}$ $b_ш = 5.06$ $p_ш := Z \cdot b_ш$ $p_ш = 30.36$

Коефіцієнти, що враховують змінені умови роботи

в залежності від оброблюваного матеріалу $K_{рм} := 1$

в залежності від виду ЗОР $K_{ро} := 1$

в залежності від способу розділення стружки $K_{рр} := 1$

в залежності від якості оброблюваної поверхні $K_{рк} := 1$

Питома осьова сила різання

$q_o := 258$

Число зубців в секції

$z_{сфо} := \frac{p_ф \cdot q_o \cdot z_р \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}}{P_{max}}$ $z_{сфо} = 1.095$

$z_{скро} := \frac{p_{кр} \cdot q_o \cdot z_р \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}}{P_{max}}$ $z_{скро} = 1.043$

$z_{сшо} := \frac{p_ш \cdot q_o \cdot z_р \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}}{P_{max}}$ $z_{сшо} = 0.984$

Приймаємо

$z_{сф_1} := \text{if}(z_{сфо} < 1, 1, \text{floor}(z_{сфо}))$ $z_{сф_2} := z_{сф_1}$ $z_{сф_3} := \text{ceil}(z_{сфо})$

$z_{скр_1} := \text{if}(z_{скро} < 2, 2, \text{floor}(z_{скро}))$ $z_{скр_2} := z_{скр_1}$ $z_{скр_3} := \text{ceil}(z_{скро})$

$z_{сш_1} := \text{if}(z_{сшо} < 1, 1, \text{floor}(z_{сшо}))$ $z_{сш_2} := z_{сш_1}$ $z_{сш_3} := \text{ceil}(z_{сшо})$

$q_{оф} := \frac{P_{max} \cdot z_{сф_1}}{p_ф \cdot z_р \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}}$ $q_{оф} = 235.702$ Приймаємо $s_{оф_1} := 0.1$

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

$q_{ош} := \frac{P_{max} \cdot z_{сш_1}}{p_ш \cdot z_р \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}}$ $q_{ош} = 262.253$ Приймаємо $s_{ош_1} := 0.11$

$s_{оф_2} := s_o$ $s_{окр_2} := s_o$ $s_{ош_2} := s_o$

$s_{оф_3} := s_o$ $s_{окр_3} := s_o$ $s_{ош_3} := s_o$

$z_{рф} := \frac{P_{max} \cdot z_{сф_2}}{p_ф \cdot q_o \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}}$ $z_{рф} := \text{floor}(z_{рф})$

$t_{оф_2} := \text{ceil}\left(\frac{1}{z_{рф}} + 0.4\right)$ $t_{оф_2} = 16$

$$z_{ркр} := \frac{P_{max} \cdot z_{скр_2}}{p_{кр} \cdot q_o \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}} \qquad z_{ркр} := \mathrm{floor}(z_{ркр})$$

$$t_{окр_2} := \mathrm{if}\left(z_{скр_2} \le 2, t_o, \mathrm{ceil}\left(\frac{1}{z_{ркр}} + 0.4\right)\right) \qquad t_{окр_2} = 12$$

$$z_{рш} := \frac{P_{max} \cdot z_{сш_2}}{p_{ш} \cdot q_o \cdot K_{рм} \cdot K_{ро} \cdot K_{рр} \cdot K_{рк}} \qquad z_{рш} := \mathrm{floor}(z_{рш})$$

$$t_{ош_2} := \mathrm{ceil}\left(\frac{1}{z_{рш}} + 0.4\right) \qquad t_{ош_2} = 13$$

$t_{оф_1} := t_o$ $t_{окр_1} := t_o$ $t_{ош_1} := t_o$

$t_{оф_3} := t_o$ $t_{окр_3} := t_o$ $t_{ош_3} := t_o$

Кількість варіантів розрахунку $k := 1..3$

Параметри перехідної частини

Число зубців	$z_{пкр} := 4$	$z_{пш} := 4$
Припуск	$A_{пкр} := 0.24$	$A_{пш} := 0.24$
Число секцій	$i_{пкр} := 2$	$i_{пш} := 2$
Подача	$s_{пкр_1} := 0.08$	$s_{пш_1} := 0.08$
	$s_{пкр_2} := 0.04$	$s_{пш_2} := 0.04$

Діаметр останнього фасочного зуба

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

$D_ф := D_E + 0.4$ $D_ф = 21.829$

Припуск на фасочну частину

$A_ф := D_ф - d_{max} + A_{чкр}$ $A_ф = 0.799$

Припуск на круглу частину

$A_{кр} := d_{max} - D_o$ $A_{кр} = 3.13$

Діаметр першого шліцьового зуба

$D_{ш_1} := D_ф - 0.1$ $D_{ш_1} = 21.729$

Припуск на шліцьову частину

$A_ш := D_{max} - D_{ш_1}$ $A_ш = 3.292$

Припуск на чорнові зубці

$A_{окр} := A_{кр} - A_{пкр} - A_{чкр}$ $A_{окр} = 2.79$

$A_{ош} := A_ш - A_{пш} - A_{чш}$ $A_{ош} = 2.972$

Число секцій чорнових зубців

$$i_{ф_k} := \mathrm{floor}\left(\frac{A_ф}{2 \cdot s_{оф_k}}\right) \qquad i_ф = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

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

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

Остаточний припуск

$$A_{остф_k} := A_{ф} - 2 \cdot s_{оф_k} \cdot i_{ф_k} \qquad A_{остф} = \begin{pmatrix} 0.199 \\ 0.139 \\ 0.139 \end{pmatrix}$$

$$A_{останкр_k} := A_{окр} - 2 \cdot i_{окр_k} \cdot s_{окр_k} \qquad A_{останкр} = \begin{pmatrix} 0.15 \\ 0.15 \\ 0.15 \end{pmatrix}$$

$$A_{остш_k} := A_{ош} - 2 \cdot i_{ош_k} \cdot s_{ош_k} \qquad A_{остш} = \begin{pmatrix} 0.1122 \\ 0.1122 \\ 0.1122 \end{pmatrix}$$

Розподіл остаточного припуска

$$A_{кр_k} := A_{останкр_k}$$

$$i_{окр_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{кр_k} > s_{пкр_1}, i_{окр_k} + 1, i_{окр_k}\right) \qquad i_{окр} = \begin{pmatrix} 6 \\ 12 \\ 12 \end{pmatrix}$$

$$i_{пкр_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{кр_k} > s_{пкр_1}, i_{пкр}, \text{if}\left(0.5 \cdot A_{кр_k} > s_{чкр_1}, i_{пкр} + 1, i_{пкр}\right)\right) \qquad i_{пкр} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$i_{чкр_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{кр_k} \le s_{чкр_1}, i_{чкр} + 1, i_{чкр}\right) \qquad i_{чкр} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$s_{чоркр_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{кр_k} > s_{пкр_1}, 0.5 \cdot A_{кр_k}, s_{окр_1}\right) \qquad s_{чоркр} = \begin{pmatrix} 0.22 \\ 0.22 \\ 0.22 \end{pmatrix}$$

$$s_{чискр_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{кр_k} \le s_{чкр_1}, 0.5 \cdot A_{кр_k}, s_{чкр_1}\right) \qquad s_{чискр} = \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.02 \\ 0.02 \end{pmatrix}$$

$$s_{перкр_k} := \text{if}\left(s_{чоркр_k} \ne s_{окр_1}, s_{пкр_1}, \text{if}\left(s_{чискр_k} \ne s_{чкр_1}, s_{чкр_1}, 0.5 \cdot A_{кр_k}\right)\right) \qquad s_{перкр} = \begin{pmatrix} 0.075 \\ 0.075 \\ 0.075 \end{pmatrix}$$

$$A_{ш_k} := A_{остш_k}$$

$$i_{ош_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{ш_k} > s_{пш_1}, i_{ош_k} + 1, i_{ош_k}\right) \qquad i_{ош} = \begin{pmatrix} 13 \\ 13 \\ 13 \end{pmatrix}$$

$$i_{пш_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{ш_k} > s_{пш_1}, i_{пш}, \text{if}\left(0.5 \cdot A_{ш_k} > s_{чш_1}, i_{пш} + 1, i_{пш}\right)\right) \qquad i_{пш} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$i_{чш_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{ш_k} \le s_{чш_1}, i_{чш} + 1, i_{чш}\right) \qquad i_{чш} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$s_{чорш_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{ш_k} > s_{пш_1}, 0.5 \cdot A_{ш_k}, s_{ош_1}\right) \qquad s_{чорш} = \begin{pmatrix} 0.11 \\ 0.11 \\ 0.11 \end{pmatrix}$$

$$s_{чисш_k} := \text{if}\left(0.5 \cdot A_{ш_k} \le s_{чш_1}, 0.5 \cdot A_{ш_k}, s_{чш_1}\right) \qquad s_{чисш} = \begin{pmatrix} 0.02 \\ 0.02 \\ 0.02 \end{pmatrix}$$

$$s_{перш_k} := \text{if}\left(s_{чорш_k} \ne s_{ош_1}, s_{пш_1}, \text{if}\left(s_{чисш_k} \ne s_{чш_1}, s_{чш_1}, 0.5 \cdot A_{ш_k}\right)\right) \qquad s_{перш} = \begin{pmatrix} 0.056 \\ 0.056 \\ 0.056 \end{pmatrix}$$

Число калібруючих зубців

$$z_{ккр} := \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix} \qquad z_{кш} := \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

Перевірка

$$\frac{i_{чкр} \cdot 2 + z_{ккр}}{3} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \end{pmatrix}$$ - цілі числа

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

Середній крок чистових і калібруючих зубців

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

Кількість фасочних зубців

$$z_{ф_k} := \left(i_{ф_k} + 1\right) \cdot z_{сф_k} \qquad z_ф = \begin{pmatrix} 4 \\ 4 \\ 8 \end{pmatrix}$$

так як добавляється одна секція для зняття остаточного припуску

Кількість круглих зубців

$$z_{окр_k} := i_{окр_k} \cdot z_{скр_k} \qquad z_{окр} = \begin{pmatrix} 12 \\ 24 \\ 24 \end{pmatrix}$$

$$z_{пкр_k} := i_{пкр_k} \cdot 2 \qquad z_{пкр} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$$

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

Кількість шліцевих зубців

$z_{ош_k} := i_{ош_k} \cdot z_{сш_k} + 1$ $\quad z_{ош} = \begin{pmatrix} 14 \\ 14 \\ 14 \end{pmatrix}$

$z_{пш_k} := i_{пш_k} \cdot 2$ $\quad z_{пш} = \begin{pmatrix} 6 \\ 6 \\ 6 \end{pmatrix}$

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

Довжина ріжучої частини протяжки

$l_{ф_k} := t_{оф_k} \cdot z_{ф_k}$

$l_{кр_k} := t_{окр_k} \cdot \left(z_{окр_k} + z_{пкр_k}\right) + t_{чкр_k} \cdot \left(z_{чкр_k} + z_{ккр_k} - 1\right)$ $\quad l_{кр} = \begin{pmatrix} 288 \\ 432 \\ 432 \end{pmatrix}$

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

$l_{ш_k} := t_{ош_k} \cdot \left(z_{ош_k} + z_{пш_k}\right) + t_{чш_k} \cdot \left(z_{чш_k} + z_{кш_k} - 1\right)$

$l_p := l_ф + l_{кр} + l_ш$

$l_p = \begin{pmatrix} 675 \\ 877 \\ 867 \end{pmatrix}$ Приймаємо перший варіант протяжки $k := 1$

Діаметр передньої напрямної

$d_{пн} := D_o$ $\quad d_{пн} = 18$

Довжина передньої напрямної

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

Довжина напрямного конуса

$l_{нк} := 15$

Діаметр першого прорізного круглого зуба

$D_1 := D_o + 2 \cdot s_{окр_k}$

$x := 1$ $\quad y := z_{окр_k} - z_{скр_k}$ $\quad m := x, x + z_{скр_k} .. y$

$s_{o_m} := s_{окр_k}$

$D_m := D_1 + 2 \cdot s_{o_m} \cdot \left(\text{ceil}\left(\frac{m}{z_{скр_k}}\right) - 1\right)$

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

$s_{o_{y+z_{скр_k}}} := \text{if}\left(s_{чоркр_k} < s_{окр_1}, s_{чоркр_k}, s_{окр_k}\right)$

$D_{y+1} := D_{y-z_{скр_k}+1} + 2 \cdot s_{o_{y+z_{скр_k}}}$ $\quad D_{y+1} = 20.64$

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

$x := z_{окр_k} + 1$ $\quad y := z_{окр_k} + z_{пкр_k}$ $\quad m := x + 2, x + 4 .. y$

$s_o := \text{if}\left(s_{перкр_k} < s_{пкр_1}, s_{перкр_k}, 0\right)$ $\quad s_{пкр_3} := s_o$

$s_{пкр} := \text{sort}\left(s_{пкр}\right)$ $\quad s_{пкр} := \text{reverse}\left(s_{пкр}\right)$

$D_x := D_{x-z_{скр_k}} + 2 \cdot s_{пкр_1}$ $\quad D_{x+1} := D_x - 0.02$

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

$x := y + 1$ $\quad y := x + z_{ф_k} - 2$ $\quad m := x + z_{cф_k}, x + z_{cф_k} \cdot 2 .. y$

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

$D_m := D_{m-z_{cф_k}} + 2 \cdot s_{oф_k}$

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

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

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

$s_o := \text{if}\left(s_{чискр_k} < s_{чкр_1}, s_{чискр_k}, 0\right)$ $\quad s_{чкр_4} := s_o$

$s_{чкр} := \text{sort}\left(s_{чкр}\right)$ $\quad s_{чкр} := \text{reverse}\left(s_{чкр}\right)$

$D_x := D_{x-2-z_{ф_k}} + 2 \cdot s_{чкр_1}$ $\quad D_{x+1} := D_x$

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

$x := y + 2$ $\quad y := x + z_{ккр_k} - 1$ $\quad m := x, x + 1 .. y$

$D_m := d_{max}$

$x := y + 1$ $\quad y := x + z_{ош_k} - z_{сш_k} - 1$ $\quad m := x + 1, x + z_{сш_k} + 1 .. y$

$D_x := D_{ш_1}$ $\quad s_{o_m} := s_{ош_k}$ $\quad D_{x+1} := D_x + 2 \cdot s_{ош_k}$

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

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

$s_{o_{y+z_{сш_k}}} := \text{if}\left(s_{чорш_k} < s_{ош_1}, s_{чорш_k}, s_{ош_k}\right)$

$$D_{y+1} := D_{\operatorname{ceil}\left(\frac{y}{z_{сш_k}}\right)} + 2 \cdot s_{o_{y+z_{сш_k}}}$$

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

$x := y + 2 \qquad y := x + z_{пш_k} - 2 \qquad m := x + 2, x + 4 .. y$

$s_o := \text{if}\left(s_{перш_k} < s_{пш_1}, s_{перш_k}, 0\right) \qquad s_{пш_3} := s_o$

$s_{пш} := \text{sort}\left(s_{пш}\right) \qquad s_{пш} := \text{reverse}\left(s_{пш}\right)$

$D_x := D_{x-z_{сш_k}} + 2 \cdot s_{пш_1} \qquad D_{x+1} := D_x - 0.02$

$D_m := D_{m-2} + 2 \cdot s_{пш_{\operatorname{ceil}\left(\frac{m-x+2}{2}\right)}} \qquad D_{m+1} := D_m - 0.02$

$x := y + 2 \qquad y := x + z_{чш_k} - 2 \qquad m := x + 2, x + 4 .. y$

$s_o := \text{if}\left(s_{чисш_k} < s_{чш_1}, s_{чисш_k}, 0\right) \qquad s_{чш_4} := s_o$

$s_{чш} := \text{sort}\left(s_{чш}\right) \qquad s_{чш} := \text{reverse}\left(s_{чш}\right)$

$D_x := D_{x-2} + 2 \cdot s_{чш_1} \qquad D_{x+1} := D_x$

$D_m := D_{m-2} + 2 \cdot s_{чш_{\operatorname{ceil}\left(\frac{m-x+2}{2}\right)}} \qquad D_{m+1} := D_m$

$x := y + 1 \qquad y := x + z_{кш_k} \qquad m := x, x + 1 .. y$

$D_m := D_{max}$

Діаметр впадин фасочних і шліцевих зубців

$D_{фв} := D_o \qquad D_{шв} := D_o$

$D_{фв} = 18 \qquad D_{шв} = 18$

Ширина ріжучого сектора прорізного круглого зуба

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

Число викружок

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

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

Ширина викружок

$$a_{окр} := \frac{\pi \cdot d_{max} \cdot \left(z_{скр_k} - 1\right)}{n_{окр} \cdot z_{скр_k}} \qquad a_{окр} = 5.532$$

Приймаємо $a_{окр} := \dfrac{\text{round}\left(a_{окр} \cdot 2, 0\right)}{2} \qquad a_{окр} = 5.5$

$$a_{пкр} := \frac{\pi \cdot d_{max} \cdot (2 - 1)}{n_{пкр} \cdot 2} \qquad a_{пкр} = 5.532$$

$B_ф := b + 2 \cdot f$ $B_ф = 5.63$

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

$B_{ош} := b_{max}$ $B_{ош} = 5.06$

Розмір фаски на прорізних зубцях

$f_п := 1$

Ширина ріжучого сектора

$B_{sф} := b - 2 \cdot f_п$ $B_{sф} = 3.03$

$B_{sош} := b - 2 \cdot f_п$

$B_{sчш} := 0.7 \cdot B_{ош}$

Ширина викружок

$a_ф := \frac{\pi \cdot d_{max}}{Z} - B_{sф}$ $a_ф := \frac{round(a_ф \cdot 2, 0)}{2}$ $a_ф = 8$

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

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

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

Довжина задньої напрямної

$l_{зн} := 25$

Довжина заднього хвостовика

$l_ц := 125$

Загальна довжина протяжки

$L := l_{зч} + l_р + l_{зн} + l_ц$ $L = \begin{pmatrix} 1035 \\ 1237 \\ 1227 \end{pmatrix}$

3. ЗУБОНАРІЗНИЙ ДОВБАЧ. КОНСТРУЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНОК

3.1. Теоретичні передумови до розрахунку зубонарізного довбача

В цьому розділі наведено результати розрахунку та конструювання зубонарізного довбача для обробки зубчатого колеса 14, 15, 17].

Для проведення розрахунку зубонарізного довбача необхідні наступні вихідні дані:

– значення геометричних параметрів зубчатого колеса;

– вимоги до якості обробки (точності евольвентного профілю і якості зубчатого вінця);

– визначене загальне призначення довбача.

Розрахунок зубонарізного довбача складається з наступних 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 передує розрахунок необхідних геометричних параметрів зубчатої передачі, в якій задіяне оброблюване зубчасте колесо.

3.2. Циліндрична евольвентна передача

1. Вихідні дані до розрахунку: 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

$$a = \frac{(z_1 + z_2)m_n}{(2\cos\beta)}.$$

3. Коефіцієнт зміщень

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

4. Кут профілю торцевий

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

5. Кут зачеплення передачі

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

6. Початкова міжосьова відстань

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

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

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

колеса

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

10. Коефіцієнт зрівнюючого зміщення

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

11. Діаметр вершин:

шестерні

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

колеса

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

12. Діаметр впадин:

шестерні

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

колеса

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

13. Висота зуба:

шестерні

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

колеса

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

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

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

колеса

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

16. Радіус кривини активного профілю в нижній точці:

шестерні

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

колеса

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

17. Радіальний зазор в передачі

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

3.3. Розрахунок параметрів зуборізного довбача у висхідному перетині

1. Кількість 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:

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

4. Основний діаметр довбача:

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

3.4. Розрахунок параметрів проектованого довбача

5. Товщина зуба на вершині проектованого довбача, що допускається міцністю різальної кромки:

при $d_0 < 50$ мм: $S_{ta0н} = \sqrt{0.138 m_n - 0.013}$;

при $50 \le d_0 \le 160$ мм: $S_{ta0н} = \sqrt{0.2594 m_n - 0.0375}$;

при $d_0 > 160$ мм: $S_{ta0н} = \sqrt{0.81 m_n - 0.72}$.

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

$$\text{inv}\alpha_{ta0н} = \frac{\pi}{2z_0} + \text{inv}\alpha_{t0}.$$

7. Діаметр поверхні вершин (перше наближення):

$$d_{a0н} = d_{b0} / \cos\alpha_{ta0н}.$$

8. Коефіцієнт зміщення нового довбача (перше наближення):

$$X_{0н} = z_0 S_{ta0н} / 2_{a0н} \text{tg}\alpha_{ta0н}.$$

9. Кут зачеплення нового довбача з колесом:

$$\text{inv}\alpha_{t\omega 01н} = \text{inv}\alpha_t + 2(X_1 + X_{0н})\text{tg}\alpha/(z_1 + z_0).$$

10. Верстатна міжосьова відстань:

$$a_{w01н} = (d_{b1} + d_{b0})/2\cos\alpha_{t\omega 01н}.$$

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

$$d_{a0н} = d_0 + 2m_n(h_a^* + X_{0н} + c^*).$$

12. Радіус кривини профілю на поверхні вершин довбача:

$$\rho_{a0н} = 0.5\sqrt{d_{a0н}^2 - d_{b0}^2}.$$

13. Радіус кривини в граничній точці профілю колеса:

$$\rho_{l1} = a_{w01н} \sin\alpha_{t\omega 01н} - \rho_{a0н}.$$

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

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

Якщо $\rho_{l1} \le 0$, то необхідно зменшити $X_{0н}$, якщо $\rho_{l1} \ge \rho_{p1}$, $X_{0н}$ необхідно збільшити і повторити розрахунок, починаючи з п. 9. Якщо умова виконується, то знайдені значення $X_{0н}$, $d_{a0н}$, $\alpha_{tw01н}$ задовольняють умову правильного нарізання зубців колеса.

3.5. Розрахунок параметрів сточеного довбача

15. Кут зачеплення сточеного довбача з колесом:

$$\alpha_{tw01c} = arctg\left(2\left(\rho_{a1} + \rho_{P0}\right)/d_{b1} + d_{b0}\right),$$

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

$\rho_{P0} = 1$ мм при $d_0 < 50$ мм,

$\rho_{P0} = 2...3$ мм при $50 \le d_0 \le 100$ мм,

$\rho_{P0} = 4...5$ мм при $d_0 > 100$ мм.

16. Коефіцієнт зміщення сточеного довбача:

$$X_{0c} = \frac{\left(\mathrm{inv}\alpha_{t\omega 01c} - \mathrm{inv}\alpha_{t0}\right)\left(z_1 + z_0\right)}{2\mathrm{tg}\alpha} - X_1.$$

17. Діаметр поверхні вершин сточеного довбача:

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

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

18. Міжосьова верстатна відстань:

$$a_{w01c} = \left(d_{b1} + d_{b0}\right)/2\cos\alpha_{t\omega 01c}.$$

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:

$$\rho_{l1} = a_{w01c}\sin\alpha_{t\omega 01c} - \rho_{a0c}.$$

21. Якість нарізання перевіряють аналогічно п. 14.

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

22. Кут нахилу гвинтової задньої поверхні довбача на основному циліндрі

$$\varepsilon = 2.5...3°.$$

23. Гвинтовий параметр задньої поверхні

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

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

$$a_{н\max} = 2pX_{0н}\mathrm{tg}\alpha / z_0 ,$$

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

25. Можлива висота сточування довбача:

$$H_{\max} = 2p\left(X_{0н} - X_{0c}\right)\mathrm{tg}\alpha / z_0 ,$$

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

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

$$X_{0н} = a_н z_0 / 2p\mathrm{tg}\alpha ;$$

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

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

$$d_{a0н} = d_0 + 2m_n\left(h_a^* + X_{0н} + c^*\right),$$

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

28. Задній кут на вершинній ріжучій крайці:

$$\delta_a = \mathrm{arctg}\left(\left(d_{a0н} - d_{a0c}\right)/2H\right).$$

29. Передній кут γ = 5º для чистових довбачів і 9…11º - для чорнових.

30. Ділильна товщина зубця нового довбача:

$$S_{t0н} = \left(d_0\left(0.5\pi + 2X_{0н}\mathrm{tg}\alpha\right)/z_0\right) + \Delta S,$$

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

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

де E_{HS} вибирається з довідникових таблиць.

31. Висота ділильної головки зубця нового довбача:

$$h_{a0} = 0.5\left(d_{a0н} - d_0\right).$$

32. Ширина вінця довбача

$$b_0 = H + b,$$

де b = 3…7,5 мм в залежності від модуля.

33. Висота довбача дискового:

$$B_0 = b_0 + \left(3...5\right) \text{ мм},$$

а для чашкових та хвостових довбачів їх розміри вздовж осі визначаються відповідно до стандартів.

34. Висота зуба нового довбача:

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

35. Боковий задній кут на ділильному циліндрі:

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

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

$$\delta_н = \mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\delta_{бок}\cos\alpha_{t0}\right).$$

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

$$\alpha_{0к} = \mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg}\alpha/\left(1 - \mathrm{tg}\gamma\mathrm{tg}\delta_a\right)\right).$$

38. Діаметр основного циліндру довбача при шліфуванні профілю:

$$d_{b0} = d_0 \cos \alpha_{0к} .$$

Інші розміри та вимоги до параметрів якості призначають за відповідними стандартами.

3.7. Розрахунок конструкції зубонарізного довбача

Проектувальний розрахунок зубонарізного довбача доцільно виконати за допомогою прикладної математичної програми MathCAD.

Евольвентна циліндрична передача зовнішнього зачеплення

Вихідні дані:

$m_n := 2.5$ - модуль нормальний

$z_1 := 28$ - число зубців шестерні

$z_2 := 34$ - число зубців колеса

$X_1 := 0.0$ - коефіцієнт зміщення висхідного контуру шестерні

$X_2 := 0.0$ - коефіцієнт зміщення висхідного контуру колеса

$h_a := 1.2$ - коефіцієнт висоти головки

$c := 0.355$ - коефіцієнт радіального зазору

$\rho_f := 0.48$ - коефіцієнт радіуса кривини перехідної кривої

$\alpha := 15 \cdot \frac{\pi}{180}$ - кут головного профілю

$\beta := 0$ - кут нахилу зубців

$a := \frac{(z_2 + z_1) \cdot m_n}{2 \cdot \cos(\beta)}$ $a = 77.5$ - ділильна міжосьова відстань

$X_\Sigma := X_1 + X_2$ $X_\Sigma = 0$ - коефіцієнт зміщень

$\alpha_t := \operatorname{atan}\left(\frac{\tan(\alpha)}{\cos(\beta)}\right)$ $\alpha_t \cdot \frac{180}{\pi} = 15$ - кут профілю торцевий

$alf := 1$ Given

$$\tan(alf) - alf - \tan(\alpha_t) + \alpha_t - \frac{2 \cdot X_\Sigma \cdot \tan(\alpha)}{z_2 + z_1} = 0$$

$\alpha_{t\omega} := \text{Find}(alf)$ $\alpha_{t\omega} \cdot \frac{180}{\pi} = 15$ - кут зачеплення передачі

$a_\omega := a \cdot \frac{\cos(\alpha_t)}{\cos(\alpha_{t\omega})}$ $a_\omega = 77.5$ - початкова міжосьова відстань

$d_1 := \frac{m_n \cdot z_1}{\cos(\beta)}$ $d_1 = 70$ - ділильний діаметр шестерні

$d_2 := \frac{m_n \cdot z_2}{\cos(\beta)}$ $d_2 = 85$ - ділильний діаметр колеса

$u := \frac{z_2}{z_1}$ $u = 1.214$ - передатне число

$d_{\omega 1} := \frac{2 \cdot a_\omega}{u + 1}$ $d_{\omega 1} = 70$ - початковий діаметр шестерні

$d_{\omega 2} := d_{\omega 1} \cdot u$ $d_{\omega 2} = 85$ - початковий діаметр колеса

$\Delta y := X_\Sigma - \frac{a_\omega - a}{m_n}$ $\Delta y = -5.684 \times 10^{-15}$ - коефіцієнт зрівнюючого зміщення

$d_{a1} := d_1 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_1 + \Delta y)$ $d_{a1} = 76$ - діаметр вершин шестерні

$d_{a2} := d_2 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_2 - \Delta y)$ $d_{a2} = 91$ - діаметр вершин колеса

$d_{f1} := d_1 - 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c - X_1)$ $d_{f1} = 62.225$ - діаметр впадин шестерні

$d_{f2} := d_2 - 2 \cdot m_n \cdot (h_a + c - X_2)$ $d_{f2} = 77.225$ - діаметр впадин колеса

$h_1 := \frac{d_{a1} - d_{f1}}{2}$ $h_1 = 6.887$ - висота зуба шестерні

$h_2 := \frac{d_{a2} - d_{f2}}{2}$ $h_2 = 6.888$ - висота зуба колеса

$d_{b1} := d_1 \cdot \cos(\alpha_t)$ $d_{b1} = 67.615$ - основний діаметр шестерні

$d_{b2} := d_2 \cdot \cos(\alpha_t)$ $d_{b2} = 82.104$ - основний діаметр колеса

$\alpha_{a1} := \operatorname{acos}\left(\frac{d_{b1}}{d_{a1}}\right)$ $\alpha_{a1} \cdot \frac{180}{\pi} = 27.168$ - кут профілю на колі вершин шестерні

$\alpha_{a2} := \operatorname{acos}\left(\frac{d_{b2}}{d_{a2}}\right)$ $\alpha_{a2} \cdot \frac{180}{\pi} = 25.546$ - кут профілю на колі вершин шестерні

$\rho_{a1} := 0.5 \cdot d_{b1} \cdot \tan(\alpha_{a1})$ $\rho_{a1} = 17.351$ - радіус кривини активного профілю в точці вершин зубців шестерні

$\rho_{p1} := a_\omega \cdot \sin(\alpha_{t\omega}) - \rho_{a1}$ $\rho_{p1} = 2.707$ - радіус кривини активного профілю в нижній точці шестерні

$\rho_{a2} := 0.5 \cdot d_{b2} \cdot \tan(\alpha_{a2})$ $\rho_{a2} = 19.621$ - радіус кривини активного профілю в точці вершин зубців колеса

$\rho_{p2} := a_\omega \cdot \sin(\alpha_{t\omega}) - \rho_{a2}$ $\rho_{p2} = 0.437$ - радіус кривини активного профілю в нижній точці колеса

$c_{12} := 0.5 \cdot \left[2 \cdot a_\omega - (d_{a1} + d_{f2})\right]$ $c_{12} = 0.888$ - радіальний зазор в передачі

Розрахунок параметрів довбача в висхідному перетині

$d_{ном} := 80$ - номінальний діаметр довбача

$z_0 := \text{round}\left(\frac{d_{ном} \cdot \cos(\beta)}{m_n}, 0\right)$ $z_0 = 32$ - число зубців довбача

$d_0 := \frac{m_n \cdot z_0}{\cos(\beta)}$ $d_0 = 80$ - ділильний діаметр довбача

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

$d_{b0} := d_0 \cdot \cos(\alpha_{t0})$ $d_{b0} = 77.274$ - основний діаметр довбача

Розрахунок параметрів нового довбача

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

$S_{ta0n} = 0.782$ - товщина зуба на вершині нового довбача

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

$alf := 1$ Given

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

$\alpha_{ta0n} := \text{Find}(alf)$ $\alpha_{ta0n} \cdot \frac{180}{\pi} = 30.253$ - кут профілю на поверхні вершин (I-е наближення)

$d_{a0n} := \frac{d_{b0}}{\cos(\alpha_{ta0n})}$ $d_{a0n} = 89.457$ - діаметр поверхні вершин (I-е наближення)

$X_{0n} := \frac{z_0 \cdot S_{ta0n}}{2 \cdot d_{a0n} \cdot \tan(\alpha_{ta0n})}$ $X_{0n} = 0.24$ - коефіцієнт зміщення нового довбача (I-е наближення)

$alf := 1$ Given

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

$\alpha_{tw01n} := \text{Find}(alf)$ $\alpha_{tw01n} \cdot \frac{180}{\pi} = 16.537$ - кут зачеплення нового довбача з колесом

$a_{w01n} := \frac{d_{b1} + d_{b0}}{2 \cdot \cos(\alpha_{tw01n})}$ $a_{w01n} = 75.57$ - верстатна міжосьова відстань

$d_{a0n} := d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0n} + c)$ $d_{a0n} = 88.974$ - діаметр поверхні вершин при прийнятому коефіцієнті зміщення

$\rho_{a0n} := 0.5 \cdot \sqrt{d_{a0n}^2 - d_{b0}^2}$ $\rho_{a0n} = 22.051$ - радіус кривини профілю на поверхні вершин

$\rho_{l1} := a_{w01n} \cdot \sin(\alpha_{tw01n}) - \rho_{a0n}$ $\rho_{l1} = -0.541$ - радіус кривини в граничній точці профілю колеса

Перевірка

$per1 := \text{if}(\rho_{l1} > 0, \text{"Умова виконується"}, \text{"Умова не виконується"})$ $per1 = \text{"Умова не виконується"}$

$per2 := \text{if}(\rho_{l1} < \rho_{p1}, \text{"Умова виконується"}, \text{"Умова не виконується"})$ $per2 = \text{"Умова виконується"}$

Перша умова не виконується. Коригуємо коефіцієнт змішення

$X_{0n} := 0.5$ - новий коефіцієнт зміщення

$alf := 1$ Given

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

$\alpha_{tw01n} := Find(alf)$ $\alpha_{tw01n} \cdot \frac{180}{\pi} = 17.921$

$a_{w01n} := \frac{d_{b1} + d_{b0}}{2 \cdot \cos(\alpha_{tw01n})}$ $a_{w01n} = 76.139$

$d_{a0n} := d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0n} + c)$ $d_{a0n} = 90.275$

$\rho_{a0n} := 0.5 \cdot \sqrt{d_{a0n}^2 - d_{b0}^2}$ $\rho_{a0n} = 23.336$

$\rho_{l1} := a_{w01n} \cdot \sin(\alpha_{tw01n}) - \rho_{a0n}$ $\rho_{l1} = 0.092$

Повторна перевірка

$per1 := if(\rho_{l1} > 0, "Умова виконується", "Умова не виконується")$ per1 = "Умова виконується"

$per2 := if(\rho_{l1} < \rho_{p1}, "Умова виконується", "Умова не виконується")$ per2 = "Умова виконується"

Обидві умови виконуються.

Розрахунок параметрів сточеного довбача

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

$\alpha_{tw01c} := atan\left[\frac{2 \cdot (\rho_{a1} + \rho_{p0})}{d_{b1} + d_{b0}}\right]$ $\alpha_{tw01c} \cdot \frac{180}{\pi} = 15.691$ - кут зачеплення сточеного довбача з колесом

$X_{0c} := \frac{(inv(\alpha_{tw01c}) - inv(\alpha_{t0})) \cdot (z_1 + z_0)}{2 \cdot \tan(\alpha)} - X_1$ $X_{0c} = 0.102$ - коефіцієнт зміщення сточеного довбача (І-е наближення)

$d_{a0c} := d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0c} + c)$ $d_{a0c} = 88.284$ - діаметр поверхні вершин при прийнятому коефіцієнті зміщення

$a_{w01c} := \frac{d_{b1} + d_{b0}}{2 \cdot \cos(\alpha_{tw01c})}$ $a_{w01c} = 75.249$ - верстатна міжосьова відстань

$\rho_{a0c} := 0.5 \cdot \sqrt{d_{a0c}^2 - d_{b0}^2}$ $\rho_{a0c} = 21.347$ - радіус кривини профілю на поверхні вершин

$\rho_{l1} := a_{w01c} \cdot \sin(\alpha_{tw01c}) - \rho_{a0c}$ $\rho_{l1} = -0.996$ - радіус кривини в граничній точці профілю колеса

Перевірка

$per1 := if(\rho_{l1} > 0, "Умова виконується", "Умова не виконується")$ per1 = "Умова не виконується"

$per2 := if(\rho_{l1} < \rho_{p1}, "Умова виконується", "Умова не виконується")$ per2 = "Умова виконується"

Перша умова не виконується. Коригуємо коефіцієнт змішення

$X_{0c} := -0.1$ - коефіцієнт зміщення сточеного довбача

$d_{a0c} := d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0c} + c)$ $d_{a0c} = 87.275$

$a_{w01c} := \frac{d_{b1} + d_{b0}}{2 \cdot \cos(\alpha_{tw01c})}$ $a_{w01c} = 75.249$

$\rho_{a0c} := 0.5 \cdot \sqrt{d_{a0c}^2 - d_{b0}^2}$ $\rho_{a0c} = 20.283$

$\rho_{l1} := a_{w01c} \cdot \sin(\alpha_{tw01c}) - \rho_{a0c}$ $\rho_{l1} = 0.068$

Повторна перевірка

$per1 := \text{if}(\rho_{l1} > 0, \text{"Умова виконується"}, \text{"Умова не виконується"})$ per1 = "Умова виконується"

$per2 := \text{if}(\rho_{l1} < \rho_{p1}, \text{"Умова виконується"}, \text{"Умова не виконується"})$ per2 = "Умова виконується"

Обидві умови виконуються.

Розрахунок і призначення параметрів ріжучої частини і виконавчих розмірів довбача

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

$p := \frac{d_{b0}}{\tan(\varepsilon)}$ $p = 1.474 \times 10^3$ - гвинтовий параметр задньої поверхні

$a_{nmax} := \frac{2 \cdot p \cdot X_{0n} \cdot \tan(\alpha)}{z_0}$ $a_{nmax} = 12.346$ - можлива висхідна відстань нового довбача

$a_{cmax} := \frac{2 \cdot p \cdot X_{0c} \cdot \tan(\alpha)}{z_0}$ $a_{cmax} = -2.469$ - можлива висхідна відстань сточеного довбача

$H_{max} := \frac{2 \cdot p \cdot (X_{0n} - X_{0c}) \cdot \tan(\alpha)}{z_0}$ $H_{max} = 14.816$ - можлива висота сточування довбача

$B_p := 10$ - висота сточування, обмежена технологічними умовами виготовлення довбача

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

Умова не виконується. Коригуємо висхідні відстані

$a_n := 5$ - висхідна відстань нового довбача

$a_c := -5$ - висхідна відстань сточеного довбача

$H := a_n - a_c$ $H = 10$ - 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

$d_{a0n} := d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0n} + c)$ $d_{a0n} = 88.787$ - діаметр поверхні вершин нового довбача при прийнятому коефіцієнті зміщення

$d_{a0c} := d_0 + 2 \cdot m_n \cdot (h_a + X_{0c} + c)$ $d_{a0c} = 86.763$ - 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 крайці

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

$E_{HS} := 0.14$ - найменше додаткове зміщення вихідного контуру

$\Delta S := 2 \cdot E_{HS} \cdot \tan(\alpha)$ $\Delta S = 0.075$ - допустиме найменше зміщення вихідного контура

$S_{t0n} := \frac{d_0 \cdot \left(0.5 \cdot \pi + 2 \cdot X_{0n} \cdot \tan(\alpha)\right)}{z_0} + \Delta S$ $S_{t0n} = 4.273$ - ділильна товщина зуба нового довбача

$h_{a0} := 0.5 \cdot \left(d_{a0n} - d_0\right)$ $h_{a0} = 4.394$ - висота ділильної головки зуба нового довбача

$b_0 := H + 6$ $b_0 = 16$ - ширина вінця довбача

$B_0 := b_0 + 5$ $B_0 = 21$ - висота довбача дискового

$h_0 := 2 \cdot m_n \cdot \left(h_a + c\right)$ $h_0 = 7.775$ - висота зуба нового довбача

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

$\delta_n := \operatorname{atan}\left(\tan\left(\delta_{бок}\right) \cdot \cos\left(\alpha_{t0}\right)\right)$ $\delta_n \cdot \frac{180}{\pi} = 3$ - боковий задній кут на ділильному циліндрі в нормальному перетині бокового леза

$\alpha_{0k} := \operatorname{atan}\left(\frac{\tan(\alpha)}{1 - \tan(\gamma) \cdot \tan\left(\delta_a\right)}\right)$ $\alpha_{0k} \cdot \frac{180}{\pi} = 15.128$ - скоригований кут профілю довбача

$d_{b0} := d_0 \cdot \cos\left(\alpha_{0k}\right)$ $d_{b0} = 77.228$ - діаметр основного циліндру довбача при шліфуванні профілю

ВИСНОВКИ

Циліндричне зубчасте колесо є деталлю типу тіла обертання, що має форму диска із замкненою системою зубів, розташованих на зовнішній циліндричній поверхні. Основними конструктивними елементами є корпус, зубчастий вінець і центральний посадковий отвір, який виконує функцію основної технологічної та конструкторської бази. Технологія виготовлення зубчастого колеса значною мірою зводиться до раціонального вибору способів оброблення двох найбільш відповідальних елементів деталі: посадкового центрувального отвору та зубчастого вінця.

Вибір технологічної бази під час оброблення зубчастого колеса залежить від конструкції його центрального посадкового отвору. У випадку наявності у центральному отворі шліців прямокутного профілю центрування може здійснюватися за найбільшим або найменшим діаметром шліцьового з'єднання, а також за бічними поверхнями шліців. Такий вибір базування залежить від конструктивних вимог до з'єднання та умов подальшої експлуатації деталі.

Для виготовлення шліцьових отворів застосовують спеціальний багатолезовий інструмент – шліцьові протяжки. Розрахована та спроєктована у роботі конструкція шліцьової протяжки дає змогу виконувати оброблення шліцьових центрувальних отворів у зубчастих колесах із забезпеченням необхідної точності профілю, розмірів і якості поверхні.

Другим відповідальним конструктивним елементом зубчастого колеса є зубчастий вінець. Для нарізування зубів застосовують різні види зубообробного інструменту. До таких інструментів належить зубонарізний довбач, робота якого імітує взаємодію пари «шестерня – зубчасте колесо». Розрахована та спроєктована конструкція зубонарізного довбача забезпечує можливість нарізування зубів евольвентного профілю на зубчастих колесах із дотриманням необхідних геометричних параметрів і вимог до точності.

Отже, у роботі розглянуто основні конструктивні та технологічні особливості виготовлення зубчастого колеса, а також виконано проєктування двох інструментів: шліцьової протяжки для оброблення центрального посадкового отвору та зубонарізного довбача для формоутворення зубчастого вінця методом обкатування. Запропоновані конструкції інструментів дають змогу вирішити виробниче завдання виготовлення зубчастого колеса із заданою якістю профілю, необхідною точністю основних поверхонь і порівняно високою продуктивністю оброблення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гнатюк А. О., Скібінський О. І., Кириченко А. М. Теоретичні та експериментальні дослідження показників шорсткості профілю цівкового колеса героторної пари, що забезпечуються шліфуванням в умовах обкату // Mechanics and Advanced Technologies. – К. : НТУУ «КПІ», 2018. – № 1 (82). – С. 12-19.

2. Зубовецька Н. Т. Проектування та технологія виготовлення металорізальних інструментів [Електронний ресурс] : Посібник / Н. Т. Зубовецька.– Луцьк, 2018 р.

3. Ігнатьєв Е. С., Лисенко О. В. Основні тенденції розвитку сучасного ріжучого інструменту // Наукові записки : зб. наук. пр. - Кіровоград : КНТУ, 2011. - Вип. 11, ч. 1. - С. 221-225.

4. Кривошея А. В., Пащенко Є. О., Мельник В. Є., Щербина К. К. Дослідження впливу процесу зубохонінгування алмазними червячними хонами на параметри шоркості зубчатих коліс / // Опір матеріалів і теорія споруд. – Київ: КНУБА, 2021. – Вип. 106. – С. 296-311.

5. Металорізальні інструменти: навчальний посібник / С. В. Швець. – Суми: Сумський державний університет, 2019. – 272 с.

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

7. Лисенко О. В., Єрьомін П. М. 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.

8. Лисенко О. В., Лисенко В. М. 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.] ; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. металорізальних верстатів та систем. – Кропивницький : ЦНТУ, 2018. – 96 с.

9. 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.

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

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

12. 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.

13. 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.

14. Щербина, К., Заїка, А., Заїка, С., Мажара, В., & Скібінський, Я. (2025). Управління точністю нарізання черв'ячних коліс збірними черв'ячними фрезами з поділеним на дві частини профілем інструментальної рейки. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 349(2), 364-370.

15. 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.

16. Мажара В. А., Гречка А. І., Святський В. В., Щербина К. К., Мірзак В. Я., Селєхова В. М., ... & Шмельов В. М. (2024). Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти. Спец. 131 «Прикладна механіка». Кропивницький : ЦНТУ, 2024 – 40 с.