Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра “Машинобудування, мехатроніки і робототехніки”

«Допущено до захисту»
Завідувач кафедри ММіР
к.т.н., доцент
_____ Андрій ГРЕЧКА
«____» _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Підвищення точності обробки шліцьових поверхонь методом черв’ячного фрезерування»

«Improving the accuracy of spline surface machining using worm milling»

Виконав здобувач вищої освіти 2-го року
магістратури групи ГМ-24М-3
ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»
_____ Денис ЛІСОВИЙ

Керівник роботи к.т.н., доцент
_____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ

Рецензент: _____
_____ _____

Кропивницький – 2026

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет	Механіко-технологічний
Кафедра	Машинобудування, мехатроніки і робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Галузь знань	13 Механічна інженерія
Спеціальність	133 Галузеве машинобудування
Освітньо-наукова програма	Галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ММР
_____ Андрій ГРЕЧКА

«____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЗДОБУВАЧА
Дениса ЛІСОВОГО
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Підвищення точності обробки шліцьових поверхонь методом черв'ячного фрезерування
2. Керівник роботи: к.т.н., доц., Олександр СКІБІНСЬКИЙ
3. Строк подання роботи до захисту « » _____ 2026 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи:

Метою роботи є: підвищення точності обробки шліцьових поверхонь шляхом вдосконалення конструкції черв'ячної фрези та оптимізації умов формування зрізуваного шару.

Завдання:

– виконати опис процесу фрезерування шліців черв'ячними фрезами та різального інструменту для його реалізації;
– проаналізувати чинники, що мають вплив на точність обробки;
– дослідити шляхи підвищення точності обробки шліцьових поверхонь, зосередивши увагу на геометричних параметрах черв'ячної фрези;
– виконати аналіз відомих конструкцій черв'ячних фрез, які завдяки своїм конструктивним особливостям здатні покращити точність обробки поверхонь шліців методом обкатки;
– розробити удосконалену конструкцію шліцьової черв'ячної фрези для обробки шліцьової поверхні деталі вал, яка забезпечить підвищення точності обробки;
– провести теоретичний експеримент, виконати оцінку точності обробки запропонованою удосконаленою конструкцією шліцьової черв'ячної фрези;
– виконати необхідні економічні розрахунки.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
РОЗДІЛ 1	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 2	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 3	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 4	Олександр СКІБІНСЬКИЙ		
РОЗДІЛ 5	Ірина ЖУРИЛО		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	Січень 2026	вик.
2	РОЗДІЛ 1	Січень-лютий 2026	вик.
3	РОЗДІЛ 2	Березень 2026	вик.
4	РОЗДІЛ 3	Березень-квітень 2026	вик.
5	РОЗДІЛ 4	Квітень 2026	вик.
6	РОЗДІЛ 5	Квітень 2026	вик.
7	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	Квітень-травень 2026	вик.
8	Графічна частина	Квітень-травень 2026	вик.

Дата видачі завдання «_____» _____ 2026 р.

Керівник роботи _____ Олександр СКІБІНСЬКИЙ
(підпис)

Завдання прийнято до виконання «____» _____ 2026 р.

Здобувач _____ Денис ЛІСОВИЙ
(підпис)

Анотація

Лісовий Д.О. Підвищення точності обробки шліцьових поверхонь методом черв'ячного фрезерування: кваліфікаційна робота для освітнього ступеня «магістр»: спец. 133 «Галузеве машинобудування» / наук. кер. О. І. Скібінський; Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2026. – 94 с. Матеріали презентації 9 креслень.

Метою роботи є дослідження процесу черв'ячного фрезерування шліців, виявлення негативних особливостей даного процесу, що впливають на точність оброблених поверхонь. Дослідження шляхів підвищення точності обробки шліцьових поверхонь, із зосередженням уваги на геометричних параметрах черв'ячної фрези.

В роботі виконано: опис процесу фрезерування шліців черв'ячними фрезами та різального інструменту для його реалізації; аналіз чинників, що мають вплив на точність обробки; дослідження шляхів підвищення точності обробки шліцьових поверхонь, із зосередженням уваги на геометричних параметрах черв'ячної фрези; аналіз відомих конструкцій черв'ячних фрез, які завдяки своїм конструктивним особливостям здатні покращити точність обробки поверхонь шліців методом обкатки; розробку удосконаленої конструкції шліцьової черв'ячної фрези для обробки шліцьової поверхні деталі вал, яка забезпечить підвищення точності обробки; теоретичний експеримент та оцінку точності обробки запропонованою удосконаленою конструкцією шліцьової черв'ячної фрези; необхідні економічні розрахунки.

Актуальність: необхідність зниження похибок профілю шліців через оптимізацію кінематики та геометрії різання. Стабільна точність шліцьових з'єднань безпосередньо визначає надійність та безшумність роботи високонавантажених механізмів.

Наукова новизна: отримано розвиток математичної моделі формоутворення шліців, що враховує динамічну зміну геометрії зрізуваного шару. Встановлено залежність між конструктивними параметрами вдосконаленої черв'ячної фрези та силовим навантаженням у процесі обробки, що дозволяє прогнозувати похибки профілю на етапі проектування інструменту.

Ключові слова: шліці, прямобічні шліці, черв'ячна фреза, стружка, канавка.

Annotation

Denys LISOVYI. Improving the accuracy of spline surface machining using worm milling. Master's Thesis: CNTU, 2026. - 94 p. Presentation materials 9 il.

The purpose of the work is to study the process of worm milling of slots, identify negative features of this process that affect the accuracy of the machined surfaces. Research on ways to increase the accuracy of machining of slotted surfaces, with a focus on the geometric parameters of the worm cutter.

The work includes: a description of the process of milling slots with worm cutters and a cutting tool for its implementation; analysis of factors that affect the accuracy of machining; research on ways to increase the accuracy of machining of slotted surfaces, with a focus on the geometric parameters of the worm cutter; analysis of known designs of worm cutters, which, due to their design features, are able to improve the accuracy of machining of slotted surfaces by the running-in method; development of an improved design of a slotted worm cutter for machining the slotted surface of a shaft part, which will ensure increased machining accuracy; theoretical experiment and assessment of machining accuracy with the proposed improved design of a slotted worm cutter; economic calculations are necessary.

Relevance: the need to reduce the errors of the spline profile through the optimization of kinematics and cutting geometry. Stable accuracy of spline connections directly determines the reliability and noiselessness of highly loaded mechanisms.

Scientific novelty: the development of a mathematical model of spline formation was obtained, which takes into account the dynamic change in the geometry of the cut layer. The dependence between the design parameters of the improved worm cutter and the force load during the machining process was established, which allows predicting profile errors at the tool design stage.

Keywords: splines, straight-sided splines, spline hob, chips, groove.

ЗМІСТ

ВСТУП…..... 7
РОЗДІЛ 1. ШЛІЦЬОВІ ПОВЕРХНІ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ.. 8
1.1. Призначення та конструктивні особливості шліцьових з'єднань..... 8
1.2. Методи виготовлення шліцьових поверхонь……..…….. 10
1.3. Кінематична модель обкатки при черв'ячному фрезеруванні шліців ……. 14
1.4. Математична модель формоутворення шліців при черв'ячному фрезеруванні…….…… 16
1.5. Геометрія зрізуваного шару при черв'ячному фрезеруванні шліців…… 18
1.6. Виявлення головних чинників, що обмежують точність обробки…… 20
1.7. Постановка задач дослідження……. 21
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ…… 22
2.1. Аналіз дії сил різання під час черв'ячного фрезерування..... 22
2.2. Конструкції черв'ячних фрез, що покращують точність обробки……... 24
2.3. Висновки…… 30
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ШЛІЦЬОВОЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ..... 32
3.1. Характеристика шліцьової поверхні..……...…… 32
3.2. Профілювання черв'ячної шліцьової фрези..... 34
3.3. Конструктивні параметри фрези…..... 49
3.4. Проєктування та розрахунок черв'ячної шліцьової фрези для чорнової обробки…… 51
3.5. Розробка креслень шліцьових черв'ячних фрез……... 54
3.6. Вдосконалення конструкції черв'ячної фрези…… 56
3.7. Висновки…… 59
РОЗДІЛ 4. ТОЧНІСТЬ ОБРОБКИ ЗАПРОПОНОВАНОЮ УДОСКОНАЛЕНОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ ШЛІЦЬОВОЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ…...…… 61
4.1. Форма стружки, що утворюється удосконаленою черв'ячною фрезою….. 61
4.2. Залежність сил різання від форми стружки…… 63
4.3. Визначення сил різання при обробці запропонованим інструментом…… 65
4.4. Математичне моделювання та теоретичне дослідження процесу фрезерування шліців……... 68
4.5. Висновки……..... 74
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ШЛІЦЬОВОЇ ФРЕЗИ……. 76
5.1. Загальні вихідні дані…… 76
5.2. Визначення витрат на підготовку виробництва…… 77
5.3. Визначення собівартості та оптової ціни інструменту…….. 78
5.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)……... 81
5.5. Розрахунок показників економічної ефективності…… 85
5.6. Висновки……... 87
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ..... 88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 89

ВСТУП

У сучасному машинобудуванні шліцьові з’єднання є одними з найбільш відповідальних елементів трансмісій та приводів, що забезпечують передачу значних крутних моментів при високих вимогах до співвісності. Основним методом виготовлення шліців на валах залишається черв’ячне фрезерування, яке характеризується високою продуктивністю. Проте традиційні методи обробки часто не забезпечують необхідної точності через складну кінематику процесу, нерівномірність зрізуваного шару та виникнення значних сил різання, що спричиняють пружні деформації системи.

З огляду на тенденції до посилення вимог щодо точності шліцьових поверхонь та необхідність зменшення подальшої фінішної обробки (шліфування), розробка вдосконалених конструкцій черв’ячних фрез та дослідження закономірностей формування похибок є актуальним науково-технічним завданням для галузевого машинобудування.

В роботі необхідно виконати опис процесу фрезерування шліців черв’ячними фрезами та різального інструменту для його реалізації. Виконати аналіз чинників, що мають вплив на точність обробки. Дослідити шляхи підвищення точності обробки шліцьових поверхонь, зосередивши увагу на геометричних параметрах черв’ячної фрези. Виконати пошук та аналіз відомих конструкцій черв’ячних фрез, які завдяки своїм конструктивним особливостям здатні покращити точність обробки поверхонь шліців методом обкатки. Виконати розробку удосконаленої конструкції шліцьової черв’ячної фрези для обробки шліцьової поверхні деталі вал, яка забезпечить підвищення точності обробки. Виконати теоретичний експеримент та провести оцінку точності обробки запропонованою удосконаленою конструкцією шліцьової черв’ячної фрези.

РОЗДІЛ 1. ШЛІЦЬОВІ ПОВЕРХНІ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

1.1. Призначення та конструктивні особливості шліцьових з’єднань

Шліцьові з’єднання є одними з найбільш відповідальних вузлів у сучасному машинобудуванні. Вони призначені для передачі крутного моменту між валом і встановленою на ньому деталлю (зубчастим колесом, муфтою, шківом тощо) (рис. 1.1), забезпечуючи при цьому сувору співвісність або, за потреби, можливість осьового переміщення деталі вздовж вала.

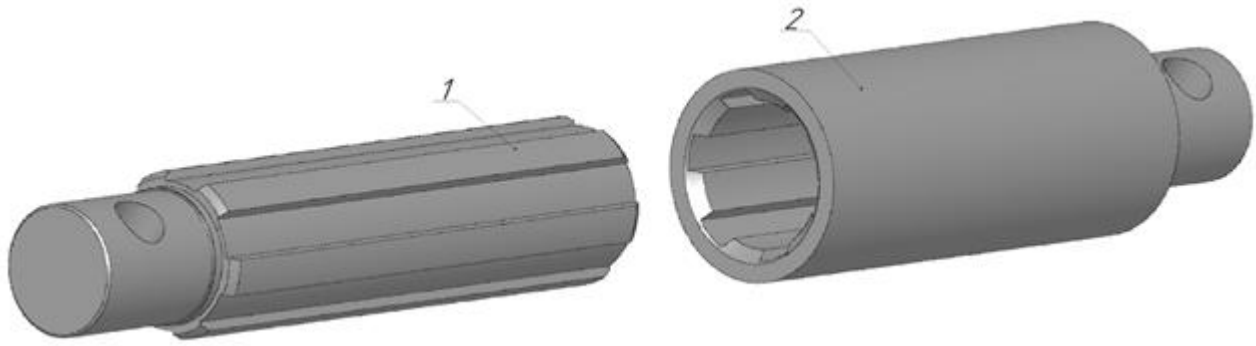


Рис. 1.1 Шліцьове з’єднання:
1 – вал; 2 – втулка

Порівняно зі шпонковими з’єднаннями мають такі основні переваги:

- завдяки більшій кількості зубців та більшій площі контакту шліци можуть передавати значно більші моменти;
- шліці забезпечують кращу співвісність вала та втулки, що важливо для високооборотних вузлів;
- менша концентрація напружень у порівнянні з глибокими шпонковими пазами;
- відсутність люфтів (при належній точності обробки) дозволяє вузлу працювати стабільно при зміні напрямку обертання.

У сучасному машинобудуванні вибір профілю шліців визначається призначенням вузла, величиною крутного моменту та вимогами до точності центрування. Основними є три типи профілів шліців: прямобічні, евольвентні, трикутні (рис. 1.2).



а) б) в)

Рис. 1.2 Типи профілів шліців:
а – прямобічний; б – евольвентний; в – трикутний

Прямобічні шліці є найбільш розповсюдженим типом у загальному машинобудуванні (верстати, сільгосптехніка). Профіль зуба має прямокутну форму, а бокові поверхні паралельні осі симетрії зуба. Простота контролю розмірів та відносна дешевизна виготовлення є суттєвою перевагою даного типу шліців.

Евольвентні шліці, з точки зору геометрії – це фактично зубчасте колесо з дуже коротким зубом. Профіль окреслений евольвентою з кутом профілю переважно $\alpha = 30°$ (рідше $37{,}5°$ або $45°$). Товщина зуба збільшується до основи, що мінімізує концентрацію напружень і робить його значно міцнішим за прямобічний ($40 - 60\%$ вища навантажувальна здатність).

Трикутні шліці мають профіль у вигляді рівнобедреного трикутника з кутом при вершині $60°$, $72°$ або $90°$. Кількість зубців зазвичай велика (до 70 і більше), а їх висота мала. Застосовуються переважно в нерухомих з'єднаннях. Використовуються для передачі невеликих моментів у приладобудуванні, для кріплення важелів, сошок рульового керування або в тонкостінних деталях, де неможливо нарізати глибокі шліці. Дозволяють здійснювати дуже точне кутове регулювання деталей одна відносно одної (за рахунок великої кількості дрібних зубців).

1.2. Методи виготовлення шліцьових поверхонь

Вибір методу виготовлення шліцьових поверхонь є визначальним етапом проектування технологічного процесу, оскільки він безпосередньо впливає на продуктивність, собівартість та експлуатаційні характеристики готового виробу. У сучасному машинобудуванні застосовують різноманітні способи обробки, серед яких найбільш розповсюдженими є накатування, стругання, протягування та фрезерування, кожен з яких має свою специфічну сферу раціонального використання.

Процес холодного накатування шліців ґрунтується на пластичній деформації металу заготовки під дією накатувальних роликів або рейок. Цей метод характеризується найвищою продуктивністю та дозволяє отримати зміцнений поверхневий шар із підвищеною втомною міцністю. Проте накатування обмежене пластичністю матеріалу заготовки та складністю виготовлення високоточного інструменту, що робить його ефективним переважно в умовах великосерійного та масового виробництва для обробки евольвентних профілів.

Стругання шліцьових поверхонь виконується спеціальними головками або набором різців на шліцестругальних верстатах. Цей метод забезпечує високу точність кроку та концентричність поверхонь, проте через низьку продуктивність та високі динамічні навантаження на інструмент його використання наразі є обмеженим. Переважно стругання застосовують при обробці глухих шліців або у випадках, коли вихід інструменту суттєво обмежений конструкцією деталі.

Протягування вважається одним із найбільш ефективних методів обробки внутрішніх шліцьових поверхонь у втулках та зубчастих колесах. Висока кінематична точність та низька шорсткість поверхні досягаються за рахунок багатолезової конструкції інструменту. Однак для зовнішніх шліцьових валів протягування застосовується рідше через значну вартість протяжок та складність налагодження обладнання, що економічно виправдано лише при значних обсягах випуску продукції.

Фрезерування шліців дисковими або черв’ячними фрезами залишається найбільш універсальним методом, який широко застосовується в одиничному та серійному виробництві. Використання дискових фрез дозволяє обробляти шліці за методом ділення, проте цей спосіб має низьку продуктивність та недостатню точність

профілю. На відміну від нього, черв'ячне фрезерування, що працює за принципом обкатки, забезпечує безперервність процесу та високу точність взаємного розташування зубців. Саме метод черв'ячного фрезерування є найбільш перспективним для дослідження в контексті підвищення точності обробки, оскільки він дозволяє гнучко керувати параметрами процесу та адаптувати його до вимог сучасних прецизійних з'єднань.

Черв'ячне фрезерування є найбільш поширеним методом обробки зовнішніх шліцьових поверхонь завдяки реалізації принципу обкатки, що дозволяє отримувати точний профіль зубців незалежно від їх кількості на заготовці. Основним робочим інструментом у цьому процесі є черв'ячна шліцева фреза (рис. 1.3), яка конструктивно являє собою черв'як із прорізаними стружковими канавками, що формують різальні леза. На відміну від зуборізних фрез для коліс, шліцеві фрези часто мають модифікований профіль (наприклад, із «вусиками» для формування проточок біля основи шліців), що необхідно для подальшого шліфування бокових поверхонь.



а) б)



в) г)

Рис. 1.3 Черв'ячні фрези:

а – зуборізна; б – шліцьова; в – евольвентна шліцьова; г – прямобічна шліцьова

Кінематика процесу нарізання шліців базується на суворому узгодженні рухів інструменту та заготовки. Основним рухом різання (головним рухом) є обертання черв'ячної фрези ($n_{\text{фр}}$). Одночасно з цим заготовка здійснює обертальний рух кругової подачі ($n_{\text{заг}}$), який кінематично пов'язаний з обертанням фрези через ділильний ланцюг верстата: за один оберт фрези заготовка повинна повернутися на кут, що відповідає кількості заходів фрези, поділеній на кількість шліців. Для формування шліців по всій довжині вала використовується рух поздовжньої подачі ($s_{\text{пр}}$), при якому фрезерний супорт переміщується вздовж осі заготовки. У випадках обробки косозубих (спіральних) шліців додається додатковий рух диференціала для забезпечення потрібного кута нахилу.

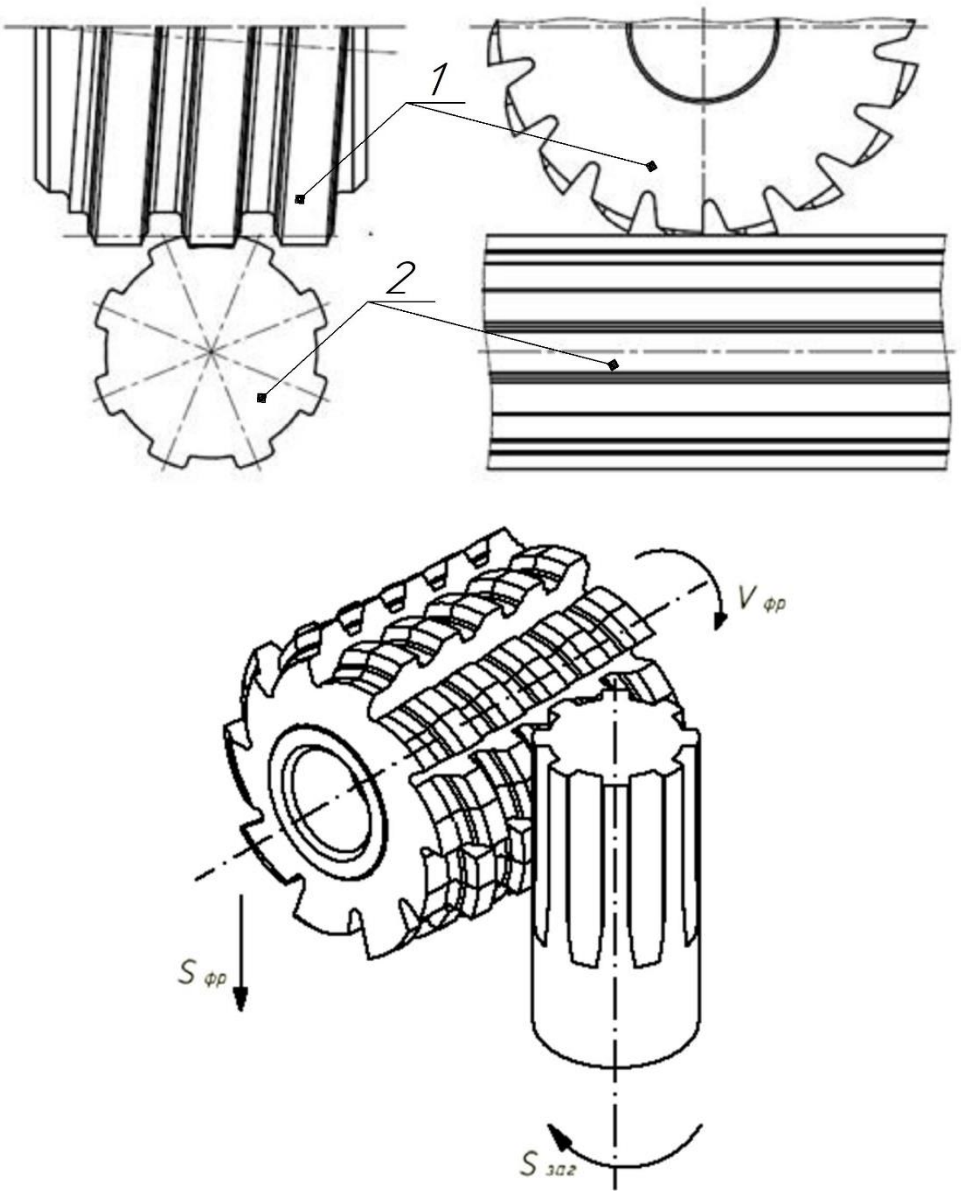


Рис. 1.4 Шліцефрезерна обробка черв'ячною фрезою:

1 – черв'ячна шліцьова фреза; 2 – заготовка

Обробка виконується на спеціалізованих шліцефрезерних або зубофрезерних верстатах (наприклад, моделей 53А50, 5К32 або сучасних центрах із ЧПУ). Верстати з ЧПУ дозволяють відмовитися від складних гітар змінних коліс, замінюючи механічні зв'язки «електронною гітарою», що суттєво підвищує точність обробки за рахунок виключення накопичених похибок механічних передач.

Якість та точність поверхні при черв'ячному фрезеруванні залежать від жорсткості системи ВПІД та режимів різання. Зазвичай метод дозволяє досягати 7-9 ступеня точності. Параметри шорсткості поверхні Ra варіюються в межах 1,6–6,3 мкм. Однією зі специфічних особливостей якості поверхні є наявність мікрохвилястості (граней), що виникає через дискретність процесу обкатки різальними кромками. Висота цих нерівностей залежить від діаметра фрези та величини подачі. Для підвищення точності та зниження шорсткості часто застосовують чистове фрезерування на підвищених швидкостях із використанням фрез із твердосплавними пластинами або інструментальної сталі з PVD-покриттям.

Аналіз технологічних можливостей черв'ячного фрезерування в порівнянні з іншими методами лезової обробки дозволяє виділити цей спосіб як найбільш збалансований за критеріями «точність-універсальність-продуктивність». Основна відмінність черв'ячного фрезерування полягає у використанні принципу обкатки, що забезпечує безперервність кінематичного ланцюга між інструментом і заготовкою. Це нівелює похибки, пов'язані з дискретним діленням, яке властиве обробці дисковими фрезами, і дозволяє досягати 7-8 ступеня точності за показниками накопиченої похибки кроку та профілю.

З точки зору продуктивності, метод обкатки суттєво перевершує фрезерування дисковими фрезами та стругання за рахунок безперервності процесу різання та одночасної участі декількох різальних кромок у формуванні профілю. Хоча протягування може забезпечувати вищу швидкість обробки на одиницю деталі в умовах масового виробництва, черв'ячне фрезерування виграє за рахунок значно менших витрат на підготовку виробництва та можливість обробки валів різної довжини одним стандартним інструментом. Це робить метод економічно доцільним не лише в серійному, а й в індивідуальному виробництві при виготовленні відповідальних вузлів.

Точність черв’ячного фрезерування визначається сукупністю геометричних та кінематичних чинників. Основними показниками точності при цьому методі є відхилення кроку, непаралельність зубців осі вала та похибка профілю. На відміну від методів пластичної деформації (накатування), де точність обмежена пружними відскоками металу та нерівномірністю структури заготовки, фрезерування забезпечує стабільне отримання розмірів незалежно від коливань твердості матеріалу. Проте, метод має і свої обмеження: специфіка формування поверхні різальними кромками призводить до появи мікроскопічної «гранності» або хвилястості на евольвентних поверхнях, що вимагає ретельного підбору режимів різання та геометрії фрези.

У порівняльному аспекті черв’ячне фрезерування є базовим методом, який часто виступає як попередній етап перед шліфуванням для загартованих валів або як фінішний етап для поліпшених сталей.

1.3. Кінематична модель обкатки при черв’ячному фрезеруванні шліців

В основі методу черв’ячного фрезерування лежить аналогія з черв’ячною передачею: фреза відіграє роль черв’яка, а заготовка – черв’ячного колеса. При обертанні фрези на один оберт уявний рейковий профіль (утворений різальними кромками) зміщується на величину одного кроку нарізки фрези. Заготовка при цьому повертається на кут, що відповідає одному кроку ділення [12, с. 220].

Умова кінематичного зв’язку між кутом повороту фрези та кутом повороту заготовки:

$$\varphi_з = \frac{k}{z} \cdot \varphi_ф \qquad (1.1)$$

де $\varphi_ф$ – кут повороту фрези, рад;

$\varphi_з$ – кут повороту заготовки, рад;

k – число заходів фрези (для стандартних шліцьових фрез $k = 1$);

z – число шліців заготовки.

Ця умова реалізується кінематичним ланцюгом обкатки верстата через гітару змінних коліс або ЧПУ.

Передаточне відношення обкатки:

$$i = \frac{n_з}{n_ф} = \frac{k}{z} \quad (1.2)$$

Тобто за один оберт фрези заготовка повертається на k/z частки оберту.

Осьова подача $S_о$ (мм на один оберт заготовки) визначає товщину зрізуваного шару за один прохід. При збільшенні $S_о$ зростає продуктивність, але збільшуються сили різання і шорсткість поверхні. Подачу на зуб S_z (мм/зуб) пов'язано з осьовою подачею та числом зубів фрези $z_ф$.

Нарізання шліців виконують за один або два проходи залежно від величини припуску та вимог до точності. При двопрохідній схемі перший прохід – чорновий (більша подача, знімається основний припуск), другий – чистовий (менша подача, забезпечується точність розміру та шорсткість поверхні).

Вісь черв'ячної шліцьової фрези встановлюється під кутом Σ до площини, перпендикулярної до осі заготовки. Цей кут визначається кутом підйому гвинтової лінії фрези λ та кутом нахилу шліців $\beta_з$ (для прямобічних шліців $\beta_з = 0°$):

$$\Sigma = \lambda \pm \beta_з \quad (1.3)$$

де λ – кут підйому гвинтової лінії фрези на ділильному циліндрі;

знак «+» або «-» залежить від напрямку гвинтової лінії фрези та напрямку шліців заготовки [12, с. 221]. Для прямих шліців $\beta_з = 0°$.

Правильне встановлення кута Σ є необхідною умовою паралельності різальних кромок фрези до осі заготовки. При похибці встановлення кута виникає похибка напрямку шліця (нахил бічних поверхонь), що нормується допуском на паралельність за DIN 5463 [28].

Профіль прямобічного шліця формується як огинаюча послідовних положень різальних кромок фрези у системі координат заготовки. Оскільки різальна кромка фрези у нормальному перерізі є прямолінійною, а рух обкатки є обертальним, кожне окреме положення кромки у системі координат заготовки є прямою лінією. Огинаюча сімейства прямих ліній є прямою лінією [34, с. 81] – звідси теоретична точність прямолінійного профілю шліця.

Практично профіль формується не безперервно, а дискретно: кожен зуб фрези залишає окремий слід різання. Чим більше число зубів фрези $z_ф$, тим менше

відхилення дискретної огинаючої від теоретично точного прямолінійного профілю. Ця похибка дискретності є одним із джерел шорсткості бічних поверхонь шліця.

1.4. Математична модель формоутворення шліців при черв'ячному фрезеруванні

Математична модель формоутворення описує геометрично точний зв'язок між формою різальної кромки інструменту та формою обробленої поверхні заготовки з урахуванням кінематики відносного руху. Для черв'ячного фрезерування така модель будується на апараті систем координат та теорії огинаючих поверхонь [34].

Для опису відносного руху фрези і заготовки вводяться три системи координат:

$S_ф\left(x_ф, y_ф, z_ф\right)$ – система координат, жорстко пов'язана з фрезою; вісь $z_ф$ збігається з віссю обертання фрези;

$S_з\left(x_з, y_з, z_з\right)$ – система координат, жорстко пов'язана із заготовкою; вісь $z_з$ збігається з віссю шліцьового вала;

$S_0\left(x_0, y_0, z_0\right)$ – нерухома (верстатна) система координат.

Осі фрези та заготовки схрещуються у просторі під кутом Σ (кут встановлення фрези, формула 1.3) і розділені міжосьовою відстанню a_ω (відстань між осями фрези та заготовки у нормальній площині до загального перпендикуляра).

Перетворення координат між системами $S_ф$ та $S_з$ виконується через нерухому систему S_0 за допомогою матриць однорідних перетворень [34]. Загальний вигляд матриці переходу від $S_ф$ до $S_з$:

$$M_{зф} = M_{з0} \cdot M_{0ф} \tag{1.4}$$

де $M_{з0}$ – матриця переходу від $S_з$ до S_0, Ця матриця описує поворот заготовки на кут $\varphi_з$;

$M_{0ф}$ – матриця переходу від S_0 до $S_ф$ (включає поворот фрези на кут $\varphi_з$, нахил на кут Σ та зсув на a_ω).

Матриця $M_{з0}$ описує поворот заготовки навколо осі $z_з$ на кут $\varphi_з$:

$$M_{з0} = \begin{pmatrix} \cos\varphi_з & \sin\varphi_з & 0 & 0 \\ -\sin\varphi_з & \cos\varphi_з & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1.5}$$

Матриця $M_{0ф}$ описує поворот фрези навколо осі $z_з$ на кут $\varphi_ф$ з урахуванням нахилу осей:

$$M_{0ф} = \begin{pmatrix} \cos\Sigma & 0 & \sin\Sigma & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -a_w \\ -\sin\Sigma & 0 & \cos\Sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \begin{pmatrix} \cos\varphi_ф & \sin\varphi_ф & 0 & 0 \\ -\sin\varphi_ф & \cos\varphi_ф & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{1.6}$$

де $\varphi_ф$ – поточний кут повороту фрези.

Рівняння різальної кромки у системі координат фрези. Бічна різальна кромка черв'ячної шліцьової фрези у нормальному перерізі є прямолінійною. У системі координат фрези $S_ф$ вона описується параметричним рівнянням прямої [34]:

$$r_ф(\mathrm{t}) = r_0 + \mathrm{t} \cdot n \tag{1.7}$$

де t – параметр, що пробігає значення від 0 до $h_ф$ (висота зуба фрези);

n – одиничний вектор напрямку різальної кромки у нормальному перерізі;

r_0 – радіус-вектор початкової точки кромки (на ділильному циліндрі фрези). Для прямобічного профілю вектор n паралельний осі заготовки, тобто кромка паралельна осі $z_з$ після правильного встановлення фрези під кутом Σ.

Сімейство положень різальної кромки у системі координат заготовки. При обертанні фрези на кут $\varphi_ф$ різальна кромка займає нове положення у просторі. Координати точки різальної кромки у системі $S_з$ при поточному куті обкатки $\varphi_ф$ визначаються через матрицю перетворення:

$$r_з(\mathrm{t},\ \varphi_ф) = M_{зф}(\varphi_ф) \cdot r_ф(\mathrm{t}) \tag{1.8}$$

де $r_ф(\mathrm{t})$ – радіус-вектор точки різальної кромки у системі $S_ф$;

$M_{зф}(\varphi_ф)$ – матриця перетворення при поточному куті $\varphi_ф$. При зміні $\varphi_ф$ від 0 до 2π рівняння (1.8) задає сімейство положень різальної кромки у системі координат заготовки. Параметр $\varphi_ф$ є параметром сімейства.

Поверхня шліця є огинаючою сімейства положень різальної кромки. За теоремою про огинаючу поверхонь [12], огинаюча існує у тих точках, де одночасно виконуються два рівняння:

$$F = 0, \qquad \frac{\partial F}{\partial \varphi_ф} = 0 \tag{1.9}$$

де $F(x_з, y_з, z_з, \varphi_ф) = 0$ – рівняння сімейства поверхонь у системі $S_з$;

$\frac{\partial F}{\partial \varphi_ф} = 0$ – умова огинаючої (рівняння зачеплення) [12].

В точці контакту різальної кромки з огинаючою поверхнею відносна швидкість v_{12} лежить у дотичній площині до поверхні інструменту, або еквівалентно:

$$n_ф \cdot v_{12} = 0 \tag{1.10}$$

де $n_ф$ – одиничний вектор нормалі до поверхні інструменту у точці контакту;

v_{12} – вектор відносної швидкості інструменту відносно заготовки у тій самій точці.

1.5. Геометрія зрізуваного шару при черв'ячному фрезеруванні шліців

Геометрія зрізуваного шару визначає форму і розміри стружки, що утворюється кожним зубом фрези. Від цих параметрів залежать сили різання, температура в зоні різання та знос різальних кромок. Основними геометричними характеристиками зрізуваного шару при черв'ячному фрезеруванні шліців є: довжина дуги контакту фрези із заготовкою, максимальна товщина недеформованої стружки, ширина зрізуваного шару.

При черв'ячному фрезеруванні кожен зуб фрези знаходиться у контакті із заготовкою на дузі, довжина якої визначається глибиною різання t та радіусом фрези $R_ф$. Довжина дуги контакту $l_к$ – відстань, яку проходить вершинна різальна кромка зуба у матеріалі заготовки за один прохід [12]:

$$l_к = \sqrt{t \cdot R_ф} \tag{1.4}$$

де t – глибина різання (для нарізання шліців за один прохід $t = h_ф$ – повна висота зуба фрези), мм;

$R_ф$ – радіус фрези по вершинах зубів, мм.

Товщина недеформованої стружки a_{max} – максимальна відстань між двома послідовними положеннями різальної кромки у напрямку, перпендикулярному до поверхні різання. Вона визначає навантаження на різальну кромку і є головним параметром для розрахунку сил різання [12]:

$$a_{max} = S_z \cdot \sqrt{\frac{t}{R_ф}} \tag{1.5}$$

Кількість зубів фрези, що одночасно перебувають у контакті із заготовкою, визначає рівномірність процесу різання та амплітуду коливань сил різання. Для черв'ячної фрези із $z_ф$ зубами (різальними рейками) кількість одночасно ріжучих зубів [12]:

$$z_o = \frac{l_к}{t_р} \tag{1.6}$$

де $l_к$ – довжина дуги контакту;

$t_р$ – осьовий крок між зубами фрези (відстань між сусідніми зубами вздовж осі фрези):

$$t_р = \frac{\pi \cdot d_0}{z_ф \cdot cos\lambda} \tag{1.7}$$

де d_0 – ділильний діаметр фрези;

λ – кут підйому гвинтової лінії [12].

Більша кількість одночасно ріжучих зубів z_o забезпечує рівномірніше навантаження на фрезу і зменшує амплітуду коливань сили різання, що позитивно впливає на точність розміру западини шліця та шорсткість поверхні.

Ширина зрізуваного шару $b_{стр}$ – розмір шару у напрямку, паралельному до різальної кромки. Для вершинної різальної кромки зуба черв'ячної шліцьової фрези ширина зрізуваного шару дорівнює ширині зуба фрези $b_ф$. Для бічної різальної кромки ширина зрізуваного шару змінюється від нуля на вершині зуба до максимуму біля основи і визначається висотою шліця h [12]:

$$b_{стр} \approx \frac{h \cdot a_{max}}{t} \tag{1.8}$$

де h – висота шліця.

Таким чином, бічна різальна кромка працює у більш важких умовах: при значній ширині зрізуваного шару і водночас змінній товщині стружки вздовж кромки.

При типових параметрах у різанні одночасно перебуває менше одного зуба фрези ($z_o < 1$). Це означає переривчастий характер різання: є моменти, коли жоден зуб не контактує із заготовкою. Такий режим є типовим для черв'ячного фрезерування і визначає імпульсний характер навантаження на технологічну систему [12].

1.6. Виявлення головних чинників, що обмежують точність обробки

На основі проведеного аналізу сучасного стану технології черв'ячного фрезерування шліців можна констатувати, що не зважаючи на високу універсальність методу, досягнення прецизійної точності (6–7 ступеня) залишається складним науково-технічним завданням. Виявлення та систематизація чинників, що обмежують точність обробки, є необхідною умовою для розробки заходів щодо її підвищення. Основними групами факторів, що спричиняють похибки при фрезеруванні, є наступні:

- похибки, що зумовлені геометричною та кінематичною точністю верстата. Оскільки процес базується на методі обкатки, будь-яка неточність у ділильному ланцюзі або биття шпинделя безпосередньо трансформується у накопичену похибку кроку та відхилення від паралельності шліців осі вала. Особливе значення має стан опорних вузлів та напрямних верстата, знос яких призводить до геометричних відхилень положення інструменту відносно заготовки;
- похибки самого інструменту – черв'ячної фрези. Сюди відносяться як похибки виготовлення профілю зубців, так і помилки, що виникають під час встановлення та закріплення фрези на оправці (радіальне та торцеве биття). Оскільки профіль шліца є результатом огинання різальних кромок, будь-яке відхилення кромок від теоретичної гвинтової лінії призводить до спотворення евольвентного або прямобічного профілю деталі;
- точність суттєво обмежується пружними деформаціями технологічної системи верстат-пристосування-інструмент-деталь (ВПІД) під дією сил різання. Процес

фрезерування характеризується значною нерівномірністю навантаження на зубці, що викликає вібрації та відтискання заготовки. Це особливо актуально для нежорстких шліцьових валів великої довжини, де радіальна складова сили різання спричиняє прогин вала, що стає причиною похибки розміру та форми (бочкоподібності);

- теплові явища в зоні різання. Нерівномірний нагрів заготовки та елементів верстата призводить до температурних деформацій, які «зміщують» налаштовані розміри в процесі тривалої обробки партії деталей. Також не варто ігнорувати вплив зносу різальних кромок фрези, який змінює не тільки розмірну точність, а й якісні показники поверхні (шорсткість та стан поверхневого шару).

1.7. Постановка задач дослідження

В роботі необхідно дослідити шляхи підвищення точності обробки шліцьових поверхонь, зосередивши увагу на конструктивних елементах та геометричних параметрах черв'ячної фрези, а також на пружних деформаціях технологічної системи ВІПД та зносі зубців інструменту.

Виконати аналіз відомих конструкцій черв'ячних фрез, які завдяки своїм конструктивним особливостям здатні покращити точність обробки поверхонь шліців методом обкатки.

Виконати аналіз креслення шліцьової поверхні деталі. Розробити маршрут обробки шліців. Розрахувати та спроєктувати черв'ячну шліцьову фрезу для заданої деталі. Визначити шляхи підвищення точності обробки шліцьової поверхні деталі та запропонувати удосконалену конструкцію шліцьової черв'ячної фрези.

Шляхом проведення теоретичного експерименту, виконати оцінку точності обробки запропонованою удосконаленою конструкцією шліцьової черв'ячної фрези.

Виконати економічні розрахунки.

РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД КОНСТРУКЦІЙ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ

2.1. Аналіз дії сил різання під час черв'ячного фрезерування

Під час черв'ячного фрезерування на фрезу і заготовку діють сили різання, що спричиняють пружні деформації технологічної системи верстат-пристосування-інструмент-деталь (ВПІД). Ці деформації є одним із джерел похибок розмірів і форми оброблених поверхонь.

При черв'ячному фрезеруванні розрізняють три складові сили різання (рис. 2.1):

- колова сила Pz (тангенціальна) – діє у напрямку головного руху різання; визначає потужність різання;

- радіальна сила Py – діє у напрямку від заготовки до фрези (або навпаки), перпендикулярно до осі заготовки; є основним джерелом пружного відтискання фрези від заготовки;

- осьова сила Px – діє вздовж осі фрези.

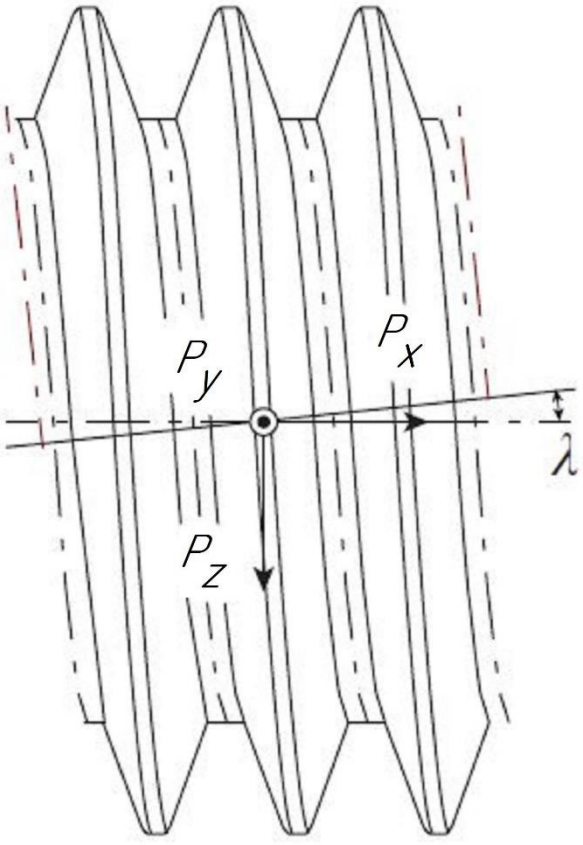


Рис. 2.1 Сили різання

Для точності ширини западини прямобічного шліця визначальною є саме радіальна складова Ру, оскільки вона діє у напрямку, що безпосередньо впливає на глибину занурення фрези в заготовку і, відповідно, на ширину западини.

Під дією радіальної сили Ру технологічна система деформується: фреза відтискається від заготовки у радіальному напрямку. Це призводить до того, що фактична глибина різання є меншою від заданої, а ширина западини шліця – більшою від номінальної. Похибка ширини западини від пружних деформацій:

$$\Delta b_{\text{пр}} = \frac{P_y}{j} \qquad (2.1)$$

де Ру – радіальна складова сили різання, Н;

j – жорсткість технологічної системи у радіальному напрямку, Н/мм.

Жорсткість j є комплексною характеристикою, що враховує піддатливість усіх ланок системи ВПІД. Для зубофрезерних верстатів нормальної точності жорсткість системи у радіальному напрямку становить j=15...25 Н/мкм.

Радіальна складова сили різання Ру залежить від таких технологічних факторів:

- подача на зуб Sz – при збільшенні подачі Ру зростає;

- глибина різання (припуск) – при чорновому нарізанні Ру значно більша, ніж при чистовому;

- твердість матеріалу заготовки – при вищій твердості Ру більша;

- передній кут фрези γ – при збільшенні γ Ру зменшується.

Стійкість черв'ячної шліцьової фрези – це тривалість її роботи до досягнення допустимого зносу. Зі зносом різальних кромок безпосередньо пов'язані три механізми виникнення похибок при обробці шліців.

При зносі бічних різальних кромок фрези по задній поверхні на величину hз різальна кромка геометрично зміщується вглиб матеріалу зуба фрези. Через наявність заднього кута α_6 на бічній кромці це зміщення у радіальному напрямку призводить до збільшення ефективної ширини різання і, відповідно, ширини западини шліця.

При нерівномірному зносі лівої та правої бічних різальних кромок одного зуба їх зміщення відрізняються. Це призводить до зміщення осі западини відносно теоретичного положення – виникає похибка симетрії шліця. Нерівномірний знос є

неминучим у виробничих умовах і залежить від якості заточування фрези, рівномірності припуску на заготовці та умов охолодження. Для зменшення Δh_3 необхідне симетричне заточування обох бічних кромок з допуском на різнобіжність не більше 0,01 мм.

Зношена різальна кромка має закруглення або сколи, що призводить до зростання радіальної складової сили різання Ру порівняно з гострозаточеною фрезою. Зростання Ру спричиняє збільшення пружного відтискання системи і, відповідно, збільшення похибки. Таким чином, знос фрези одночасно діє через два незалежних механізми: безпосередньо (зміщення кромки) та опосередковано (через зростання Ру).

Таким чином, оптимізація конструктивних параметрів черв'ячної шліцьової фрези є реальним засобом підвищення стійкості, що безпосередньо відображається на точності обробки шліцьових поверхонь.

2.2. Конструкції черв'ячних фрез, що покращують точність обробки

Для аналізу відомих конструкцій черв'ячних фрез, які завдяки своїм конструктивним особливостям здатні покращити точність обробки поверхонь методом обкатки, виконано патентний пошук, а також пошук серед наукових публікацій. Розглядалися як шліцьові черв'ячні фрези, так і зубчасті черв'ячні фрези для нарізання шестерень.

Відома конструкція черв'ячної фрези [8] у середній частині зубця 1 якої виконана додаткова стружкова канавка 3 (рис. 2.1), яка сегментує його на передню 4 та тилову 5 ділянки. Обидві ділянки 4 і 5 виконані з затилуванням «К», що є критично важливим для збереження профілю при переточуваннях інструменту по передній поверхні. Також на передній ділянці 4 виконано поздовжню стружкорозподільну канавку 6 трикутної форми. Напрямок канавки суворо збігається з напрямком гвинтової лінії зубців 1.

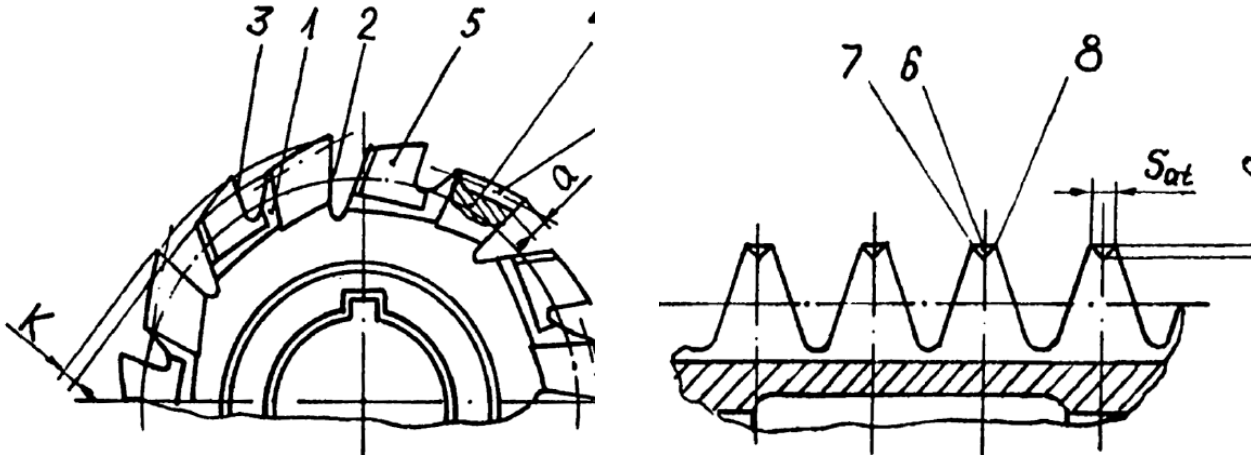


Рис. 2.1 Черв’ячна фреза із стружкорозподільними канавками

Канавка 6 розділяє колишнє вершинне лезо передньої ділянки на дві дискретні вершини: ліву 7 та праву 8.

Глибина стружкорозподільної канавки:

$$З = 0{,}5 \cdot S_{at} \tag{2.2}$$

де S_{at} – ширина вершинного леза зубця фрези.

Завдяки відсутності центральної частини вершинного леза (видаленої канавкою 6), інструмент працює як два окремих різці. У роботу вступають ліва 7 та права 8 вершини разом із боковими лезами передньої ділянки 4. Вершинне лезо тилової ділянки 5 вступає в контакт із заготовкою із затримкою, завершуючи формування дна западини зуба. Стружка від вершинного леза тилової ділянки має власний шлях відведення через допоміжну канавку 3. Така послідовність запобігає зіткненню стружкових потоків, що зазвичай призводить до підвищеного тепловиділення та вібрацій.

Перевагами даної конструкції фрези є: усунення Г- та П-подібних елементів стружки, що різко знижує термічне навантаження; зменшення радіального опору через розподіл навантаження між ділянками 4 та 5, що зменшує відгин інструменту; зниження сил різання та покращення тепловідведення забезпечує підвищення стійкості.

Відома конструкція черв’ячної фрези [7] яка має стружкороздільні канавки, виконані безпосередньо на вершині кожного різального зубця.

Ці канавки розташовуються ближче до бічної сторони різальної кромки та чергуються в шаховому порядку відносно гвинтової лінії фрези. Глибина канавок становить 0,1-0,3 модуля, а їх форма може бути трапецієподібною, коловою або трикутною (рис. 2.2). Технологічно такі канавки створюються шляхом радіального затилування, причому геометрія різальної частини самої канавки може бути незалежною від основної геометрії зубця, що дозволяє отримати оптимальні (більші) задні кути на бокових сторонах.

Дана конструкція забезпечує поділ складної П-подібної стружки на простішу Г-подібну на всіх стадіях процесу. Створення незалежної працездатної геометрії на стружкороздільних елементах покращує умови зрізання шару припуску.

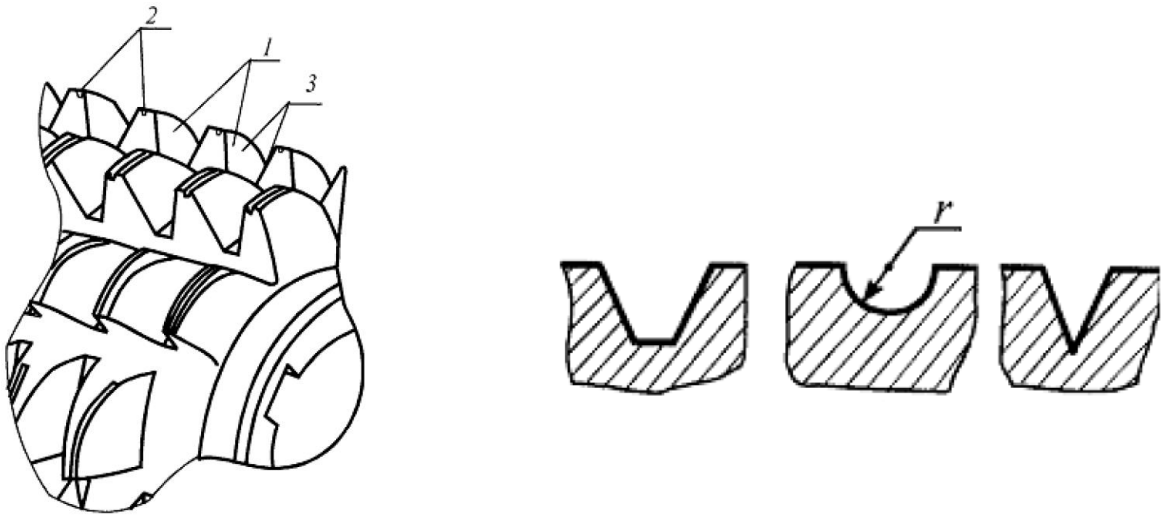


Рис. 2.2 Черв’ячна фреза із стружкорозподільними канавками

Відома конструкція черв’ячної фрези [9] яка теж передбачає поділ зубця на дві функціональні зони: передню ділянку 4 та тилову ділянку 5 із утворенням додаткової стружкової канавки 3 між ними (рис. 2.3).

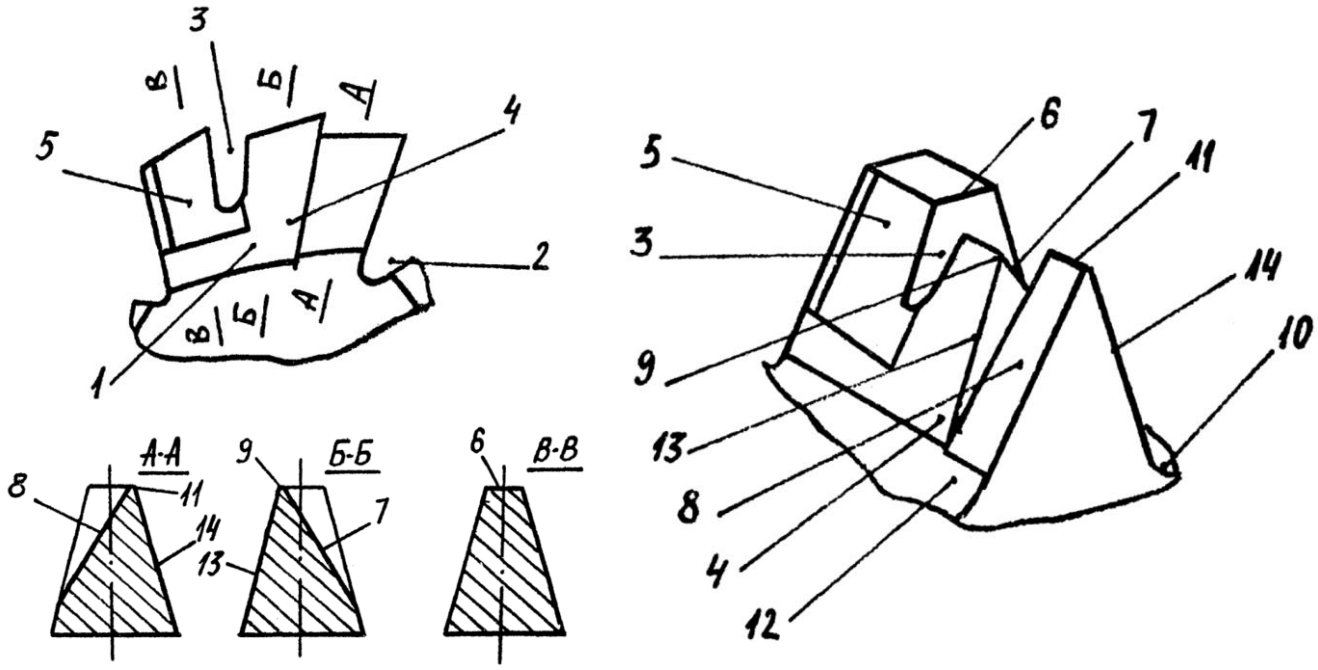


Рис. 2.3 Черв’ячна фреза із фасками

Передня ділянка зубця умовно поділена на дві частини. На першій частині довжини сформована фаска 8, що проходить від правої вершини 11 до лівої ніжки 12. На другій частині довжини сформована фаска 7 від лівої вершини 9 до правої ніжки 10. Така геометрія перетворює бокові леза 13, 14 на високоефективні різальні кромки з малим кутом у плані та забезпечує послідовний розподіл стружки за рахунок двох протилежно спрямованих фасок. Вершинне різальне лезо 6 тилової ділянки 5 є цілісним і паралельним до ділильної прямої, що гарантує отримання чистої прямолінійної поверхні дна впадини колеса.

Перевагами даної конструкції інструменту є: зниження радіальної складової сили різання та вібрації через те, що бокові леза працюють у режимі, наближеному до вільного різання; зростання стійкості інструменту завдяки розподілу навантаження на кожному зубці та зменшення тертя по задніх поверхнях.

Відома конструкція черв’ячної фрези [4] яка теж передбачає поділ зубця на дві функціональні зони: передню ділянку 3 та тилову ділянку 4 із утворенням додаткової стружкової канавки 2 між ними (рис. 2.4).

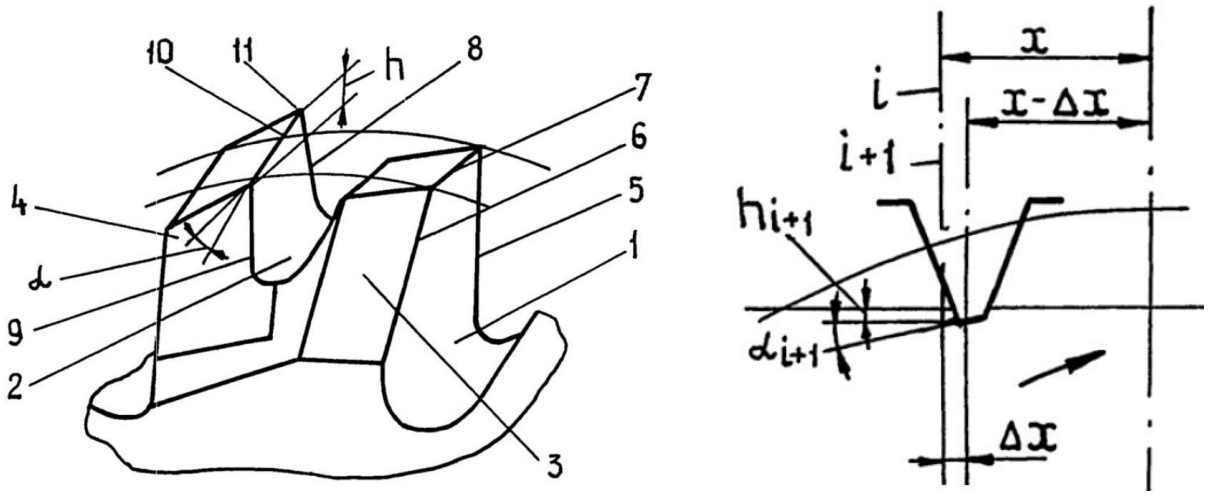


Рис. 2.4 Черв’ячна фреза

Геометрія вершинного леза 10 тилової ділянки 4 передбачає підйом на висоту h та кут α відносно дна канавок. Висота h та кут α є змінними параметрами для кожної тилової ділянки 10 зубців. Всі зубці знаходяться на різній відстані відносно міжосьового перпендикуляра.

Переваги даної конструкції зуборізної черв’ячної фрези: в 1,5-2 рази підвищується стійкість черв’ячної фрези, покращується якість поверхні западин зубчастих коліс; відсутність виникнення П- та Г-подібних стружок; рівномірне зношування різальних кромок.

Відома черв’ячна фреза [10] конструкція якої базується на принципі секційного розподілу навантаження вздовж однієї гвинтової поверхні 1 (рис. 2.5). Фреза містить послідовні групи зубців для трьох проходів: першого 2, другого 3 та третього 6. Всі зубці мають уніфікований діаметр западин, проте відрізняються зовнішніми діаметрами.

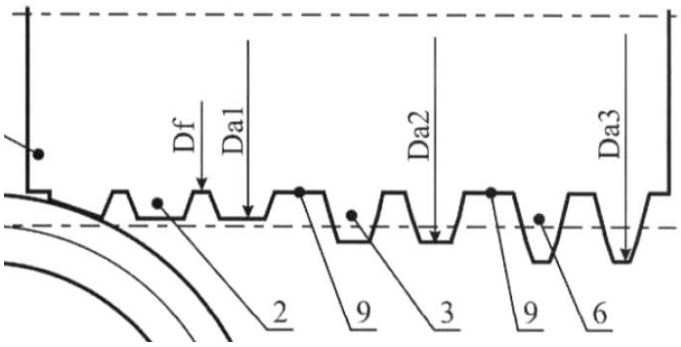


Рис. 2.5 Черв’ячна фреза

Зубці 1-го проходу формують нижню третину активного профілю. Головки зубців 2-го проходу відповідають середній третині. Головки зубців 3-го проходу завершують обробку, формуючи верхню третину. Ніжки зубців другого та третього проходів мають трапецеїдальну форму. Важливою особливістю є те, що вони не виходять за межі вихідного контуру 12 і не беруть участі в процесі різання, що запобігає пошкодженню вже оброблених ділянок заготовки 11.

Оскільки вершинні леза виконують основну роботу (знімаючи понад 50% об'єму металу), конструкція забезпечує рівність їхніх часток у периметрі різання для всіх секцій.

Відома черв'ячна фреза [5] конструкція якої передбачає наявність позитивних передніх кутів прорізних зубців 7 вставних рейок 6 (рис. 2.6), що забезпечує зменшення сил різання та зношування інструменту.

Висота кожного наступного прорізного зубця в блоці поступово зростає, що забезпечує поділ великої товщини зрізу на декілька тонких шарів. Кожен наступний прорізний зубець виконано звуженим і зсунутим у бік вхідних бокових різальних кромок. Дане зміщення перетворює складну П-подібну профільну стружку на просту прямокутну. Це усуває защемлення стружки в западині та запобігає перевантаженню куточків зубців.

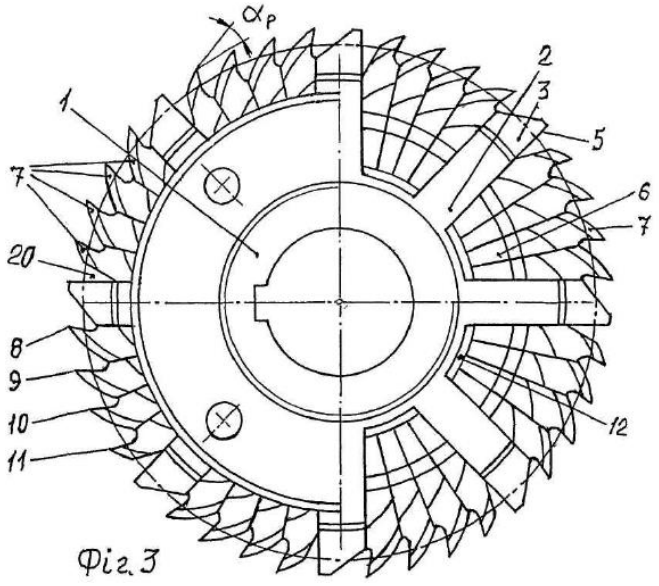


Рис. 2.6 Збірна черв'ячна фреза

Відома черв’ячна фреза [6] різальна кромка якої реалізована як просторова крива з випуклим профілем (рис. 2.7). Це дозволяє компенсувати спотворення, притаманні інструментам із плоскими або прямолінійними гранями. Твірна задньої поверхні 5 зубців фрези повністю збігається з твірною конволютного черв’яка, що створює оптимальну кінематику затилування.

Координати точок кромки (X, Y, Z) визначаються як результат аналітичного перетину передньої гвинтової поверхні та задньої затилованої поверхні. У розрахунках використовуються незалежні змінні параметри.

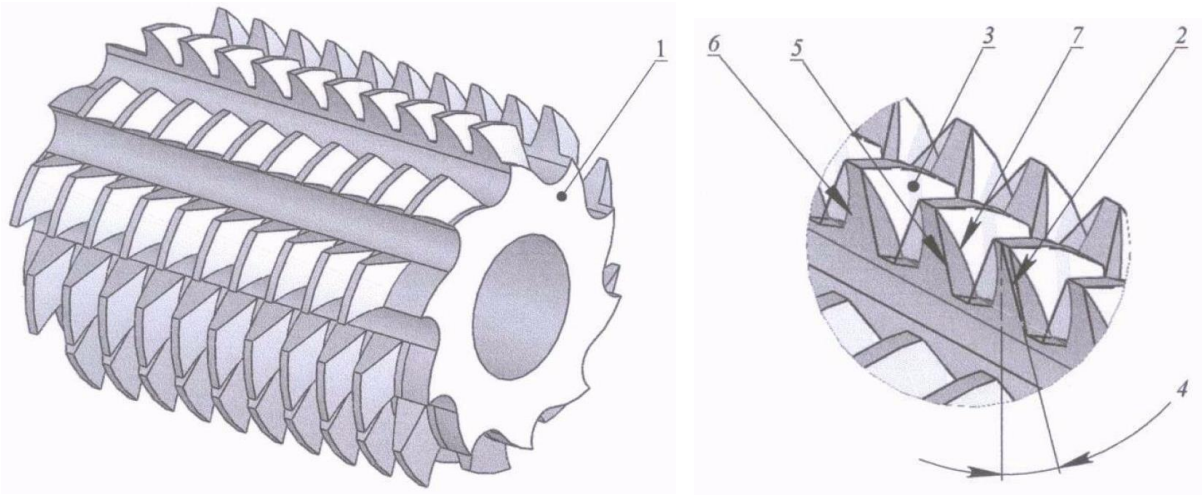


Рис. 2.7 Черв’ячна фреза

Наявність додатного переднього інструментального кута (елемент 4) оптимізує процес стружкоутворення, знижує силові навантаження та підвищує стійкість різальної частини.

2.3. Висновки

Виконано аналіз сил різання, що діють на фрезу та заготовку. Розглянуто фактори, що впливають на збільшення сил різання та на точність обробки шліцьових поверхонь.

Виконано аналіз відомих конструкцій черв’ячних фрез, які завдяки своїм конструктивним особливостям здатні покращити точність обробки поверхонь методом обкатки. Виконано патентний пошук, а також пошук серед наукових публікацій. Завдяки своїй конструктивній схожості та подібності принципу обробки

за методом обкату, до розгляду приймалися, як шліцьові черв’ячні фрези, так і зубчасті черв’ячні фрези для нарізання шестерень.

Серед відомих конструктивних особливостей черв’ячних фрез, які підвищують стійкість інструменту, зменшують сили різання, покращують подрібнення та відведення стружки, можна виділити: додаткова стружкова канавка, яка розділяє зуб на передню та тилову ділянки; стужкорозподільна канавка, що розділяє колишнє вершинне лезо передньої ділянки на дві дискретні вершини та може бути трикутної, трапецієподібної або колової форми; зуб із передньою та тиловою ділянками, передня ділянка якого поділена на дві частини кожна з яких має фаску із протилежних боків; зуб із передньою та тиловою ділянками, вершинне лезо тилової ділянки якого передбачає його підйом на кут α відносно дна канавок; наявність позитивних передніх кутів; різна висота кожного зуба інструменту, що забезпечує поділ великої товщини зрізу на декілька тонких шарів. Виконано опис черв’ячних фрез, що мають вищезазначені конструктивні особливості.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ШЛІЦЬОВОЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ

3.1. Характеристика шліцьової поверхні

Конструкція деталі вал має у своєму складі шліцьову поверхню, що позначається $d - 8 \times 52e8 \times 58a11 \times 10f8$. Матеріалом деталі обрано Сталь 40Х. Профіль шліців деталі представлено на рисунку 3.1.

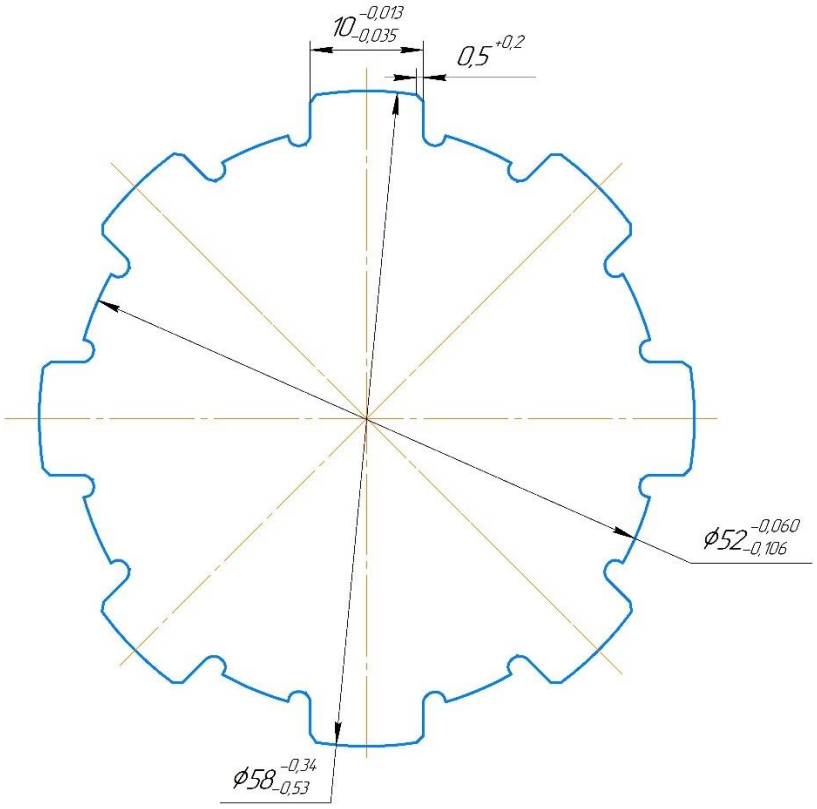


Рис. 3.1 Шліцьовий профіль валу

Центрування шліцьового з'єднань за внутрішнім діаметром є одним із найбільш точних методів базування втулки на валу. При такому способі основною контактною поверхнею, що визначає співвісність деталей, є дно западин шліців вала та відповідні їм циліндричні пояски в отворі втулки. Цей метод вважається найбільш технологічним для виробів, що проходять термічну обробку, оскільки внутрішній діаметр вала можна легко довести до потрібних параметрів точного шліфування після гартування. На відміну від центрування по зовнішньому діаметру, цей варіант забезпечує мінімальне радіальне биття, що є важливим для механізмів, які працюють на високих швидкостях.

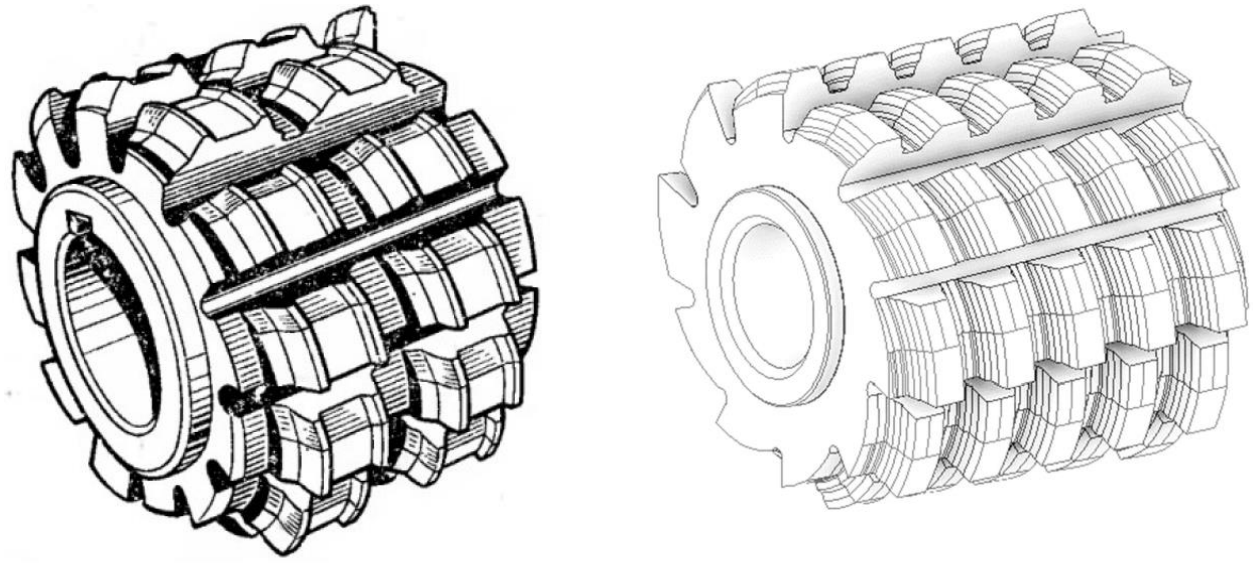
Такий тип з’єднання широко застосовується в авіабудуванні, автомобілебудуванні та верстатобудуванні. Його використовують у відповідальних вузлах трансмісій, коробках передач автомобілів і тракторів, а також у приводах металорізальних верстатів. Оскільки цей спосіб дозволяє досягти високої точності розташування осей навіть при значній твердості деталей, він є незамінним для механізмів, де шестерні або муфти повинні переміщатися вздовж вала без перекосів.

Шліцьові вали, які центруються за внутрішнім діаметром, вимагають особливої уваги до точності виготовлення та якості поверхні саме на дні западин між зубами. Оскільки ця поверхня є базовою для забезпечення співвісності втулки та вала, вона повинна мати мінімальні відхилення за формою та низьку шорсткість. Через високі вимоги до точності такі поверхні зазвичай підлягають шліфуванню, особливо якщо деталь пройшла термічну обробку. Для того, щоб шліфувальний круг міг обробити внутрішню поверхню по всій ширині без перешкод і вийти «в упор» до бічної грані шліца не пошкоджуючи її, в кутах западин передбачають спеціальні перехідні канавки. Ці канавки призначені для виходу шліфувального круга, що дозволяє уникнути появи радіусних заокруглень у кутах, які могли б заважати правильній посадці втулки.

Для нарізання шліців із такими канавками використовують спеціальні черв’ячні фрези з «вусиками» (рис. 3.2, а) (протуберанцями). Ці вусики є невеликими виступами на вершинах різальних зубів фрези, які заглиблюються в тіло вала нижче основного внутрішнього діаметра, формуючи необхідне піднутріння. Такі фрези застосовуються саме для чистової обробки під подальше шліфування, оскільки їхня геометрія розрахована на створення точного профілю з припуском.

Використовувати фрези з вусиками для чорнового зняття великого об’єму матеріалу небажано через їхню низьку стійкість та конструктивну вразливість. Вусики є найтоншою та найбільш навантаженою частиною різального інструменту; при великих подачах і глибині різання вони швидко перегріваються, сколюються або зношуються, що призводить до втрати форми канавки та псування фрези. Тому для чорнової обробки, де потрібно зняти основний об’єм металу, застосовують звичайні черв’ячні шліцьові фрези без вусиків (рис. 3.2, б). Це дозволяє зберегти ресурс

точного чистового інструменту і забезпечити стабільну якість перехідних поверхонь перед фінішною операцією шліфування.



а) б)

Рис. 3.2 Черв’ячні шліцьові фрези для обробки:
а – чистової (з вусиками); б –чорнової

3.2. Профілювання черв’ячної шліцьової фрези

Основне завдання профілювання полягає у визначенні такої форми різальної кромки інструмента, яка при обкатці (імітації зачеплення) відтворить необхідний профіль на деталі.

Процес проектування черв’ячної шліцьової фрези має такі етапи:

1. Обчислення радіуса початкового кола на основі параметрів деталі.
2. Визначення геометрії різальних кромок (профілювання).
3. Розрахунок основних конструктивних параметрів інструмента.
4. Підготовка графічної документації (креслень).

Обчислення радіуса початкового кола на основі параметрів деталі. Це коло, по якому фреза «котиться» по заготовці без ковзання. Для шліцьових з’єднань радіус початкового кола зазвичай збігається з ділильним радіусом або розраховується через середній радіус шліців:

$$r_n = \frac{D}{2} \cdot \sqrt{1 - 0{,}75 \cdot \left(\frac{B}{D}\right)^2} \quad (3.1)$$

де D – зовнішній діаметр шліців;

B – ширина шліців.

$$r_n = \frac{58}{2} \cdot \sqrt{1 - 0{,}75 \cdot \left(\frac{8}{58}\right)^2} = 28{,}6 \text{ мм}$$

Існує три основні теоретичні підходи до визначення профілю: аналітичний метод, графоаналітичний метод, метод заміни.

Аналітичний метод (метод огинаючих) базується на рівняннях теорії зачеплення (теорема Майнарда-Ейлера). Профіль деталі задається функцією f(x, y), а профіль фрези шукається як обгортка сімейства кривих, що утворюються при відносному русі інструмента та заготовки. В точці контакту нормаль до профілю деталі повинна проходити через полюс зачеплення.

За графоаналітичним методом профіль будується шляхом накладання послідовних положень інструмента відносно деталі. Профіль деталі розбивається на ряд точок. Для кожної точки розраховуються координати в системі координат фрези з урахуванням кута повороту. Отримана сукупність точок з'єднується плавною лінією.

Метод заміни (апроксимація). Для спрощення виготовлення складний теоретичний профіль іноді замінюють дугами кола або відрізками прямих, якщо похибка не перевищує допуск на виготовлення.

3.2.1. Графоаналітичний методом профілювання

Профілювання шліцьової фрези є одним із ключових завдань інструментального виробництва, оскільки від точності визначення профілю різального інструменту безпосередньо залежить якість формування шліцьового з'єднання деталі. Серед існуючих підходів до розв'язання цієї задачі графоаналітичний метод займає особливе місце як метод, що поєднує наочність геометричного моделювання з достатньою для практичних цілей точністю отримуваних результатів.

Сутність графоаналітичного методу полягає у побудові в масштабі профілю шліця, що обробляється, та подальшому графічному визначенні профілю інструменту шляхом застосування кінематичних залежностей, які описують відносний рух фрези та заготовки у процесі різання. Метод ґрунтується на теорії огинаючих поверхонь: профіль оброблюваного шліця розглядається як огинаюча сімейства послідовних положень різальних кромок фрези у системі координат заготовки. Відповідно, зворотна задача – визначення профілю інструменту – зводиться до знаходження такої кривої в системі координат фрези, сімейство послідовних положень якої утворювало б огинаючу, що збігається із заданим профілем шліця.

На першому етапі роботи за графоаналітичним методом будується точна розгортка профілю шліця в нормальному перерізі (рис. 3.3). Для прямобічних шліців профіль задається безпосередньо шириною та висотою шліца, фаскою шліця, а також канавками для виходу шліфувального круга. Ця попередня геометрична побудова є принципово важливою, оскільки будь-яка похибка у побудові профілю деталі прямо переноситься на профіль інструменту.

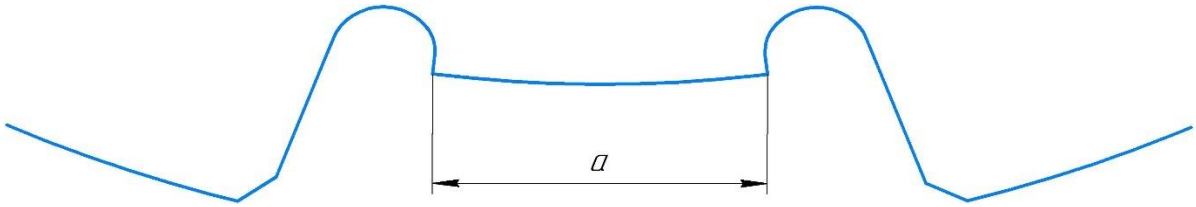


Рис. 3.3 Профіль шліця в нормальному перерізі

Розміри канавки, яка є перехідним елементом між бічною поверхнею шліця та внутрішнім діаметром не задаються на кресленні, оскільки вона не виконує ніякої функції у шліцьовому з’єднанні, а призначена лише для виходу шліфувального круга. Тому, її розміри обираються конструктивно, при цьому має виконуватись умова: довжина дуги западини a між шліцями прямобічного шліцевого вала $d - 8 \times 52 \times 58$ має бути не менше 4,89 мм.

На другому етапі вводиться система відліку, пов’язана з осьовим перерізом фрези. У загальному випадку черв’ячної шліцьової фрези між фрезою та заготовкою реалізується зачеплення за принципом, аналогічним зубчастій передачі «черв’як – черв’ячне колесо», що дозволяє виразити взаємне положення ріжучих кромок через

кут повороту заготовки та відповідний кут повороту фрези із урахуванням передаточного відношення.

Визначення профілю черв'ячної шліцьової фрези графоаналітичним методом передбачає послідовне нанесення на листі кресленика ряду положень профілю шліця, повернутих на кути Δφ відносно осі заготовки, де Δφ вибирається достатньо малим для забезпечення потрібної точності огинаючої. Зазвичай задовільна точність забезпечується при кількості положень від 15 до 30 по половині профілю. Для кожного положення у системі координат фрези відмічається точка контакту, що визначається із умови перпендикулярності нормалі до профілю деталі у точці контакту до вектора відносної швидкості в цій точці – так звана умова контакту або умова обвідної. Геометричне місце знайдених таким чином точок контакту і є шуканим профілем різальної кромки фрези в її осьовому перерізі.

Практична реалізація умови контакту в графоаналітичному методі здійснюється за допомогою допоміжних побудов. Для кожного положення профілю деталі проводяться нормалі до його характерних точок, після чого знаходяться точки, у яких нормаль паралельна лінії центрів у даний момент часу або задовольняє іншій геометричній умові, що випливає з кінематики конкретного верстата. Знайдені точки переносяться в систему координат фрези з урахуванням масштабу і взаємного розташування осей. Суттєвою перевагою графоаналітичного методу є можливість безпосередньої наочної перевірки правильності отримуваного профілю на кожному етапі побудови.

Першим кроком прямої задачі графічного профілювання є побудова шаблону відомого профілю деталі із прив'язкою до початкового кола r_n. Шаблон впадини шліця шліцьового валу представлено на рисунку 3.4.

Побудуємо шаблон для подальших креслень (рис. 3.5). Для цього спочатку проведемо горизонтальну лінію, яку будемо вважати початковою прямою. Далі розділимо цю пряму на рівні відрізки так, щоб довжина кожного з них дорівнювала довжині дугових поділок на початковому колі.

Після цього через отримані точки проведемо перпендикуляри до початкової прямої. Потім на відстані, що дорівнює r_n від початкової прямої, проведемо лінію центрів О-О, яка буде паралельною до початкової прямої.

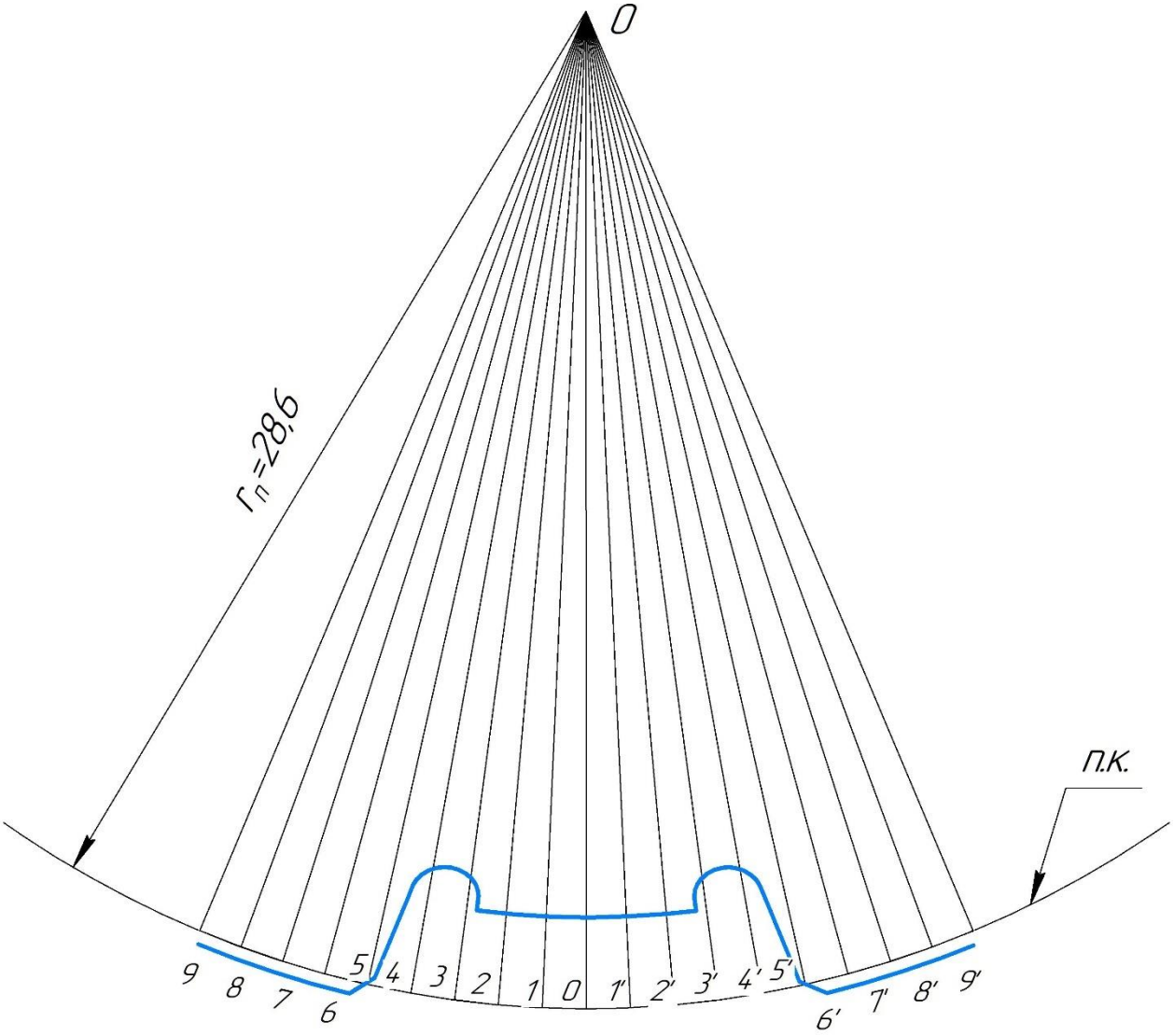


Рис. 3.4 Шаблон профілю шліців деталі

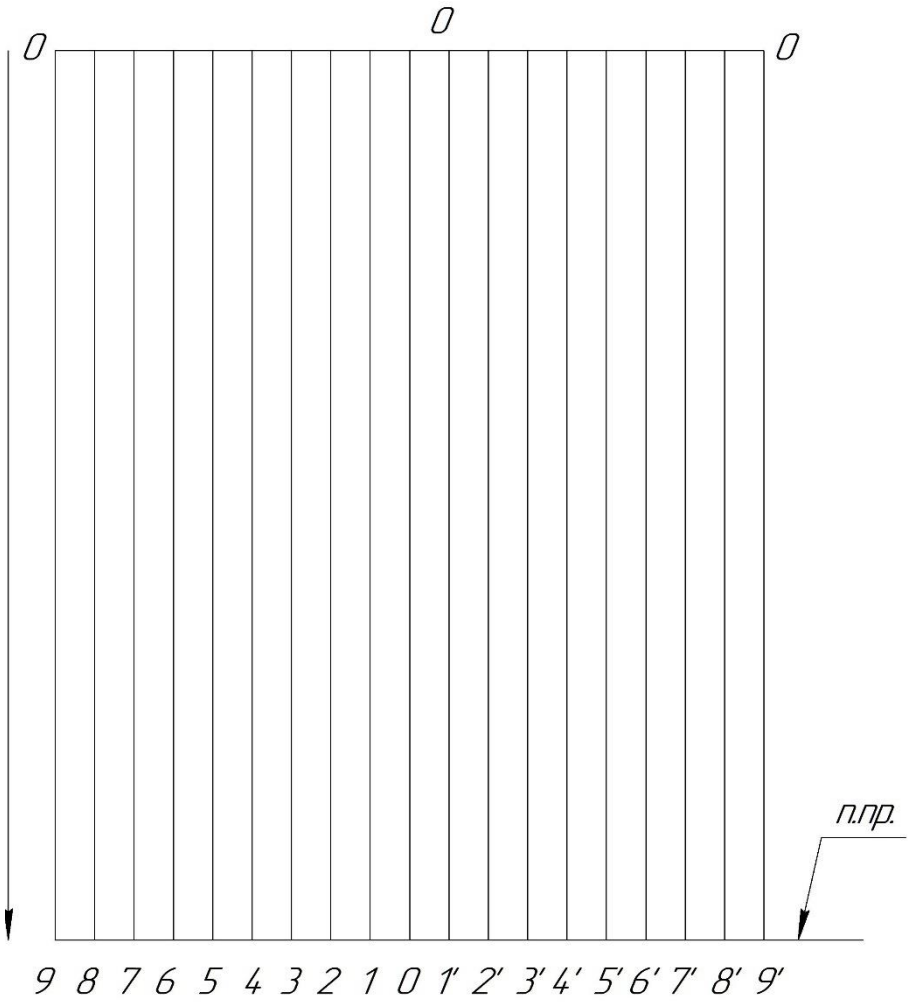


Рис. 3.5 Шаблон побудов

Профілювання виконуємо на підготовленому шаблоні, дотримуючись такої послідовності. Спочатку накладаємо шаблон відомого профілю деталі на шаблон побудов і поєднуємо точку 0’ шаблону деталі з точкою 0 на шаблоні побудов (рис. 3.6).

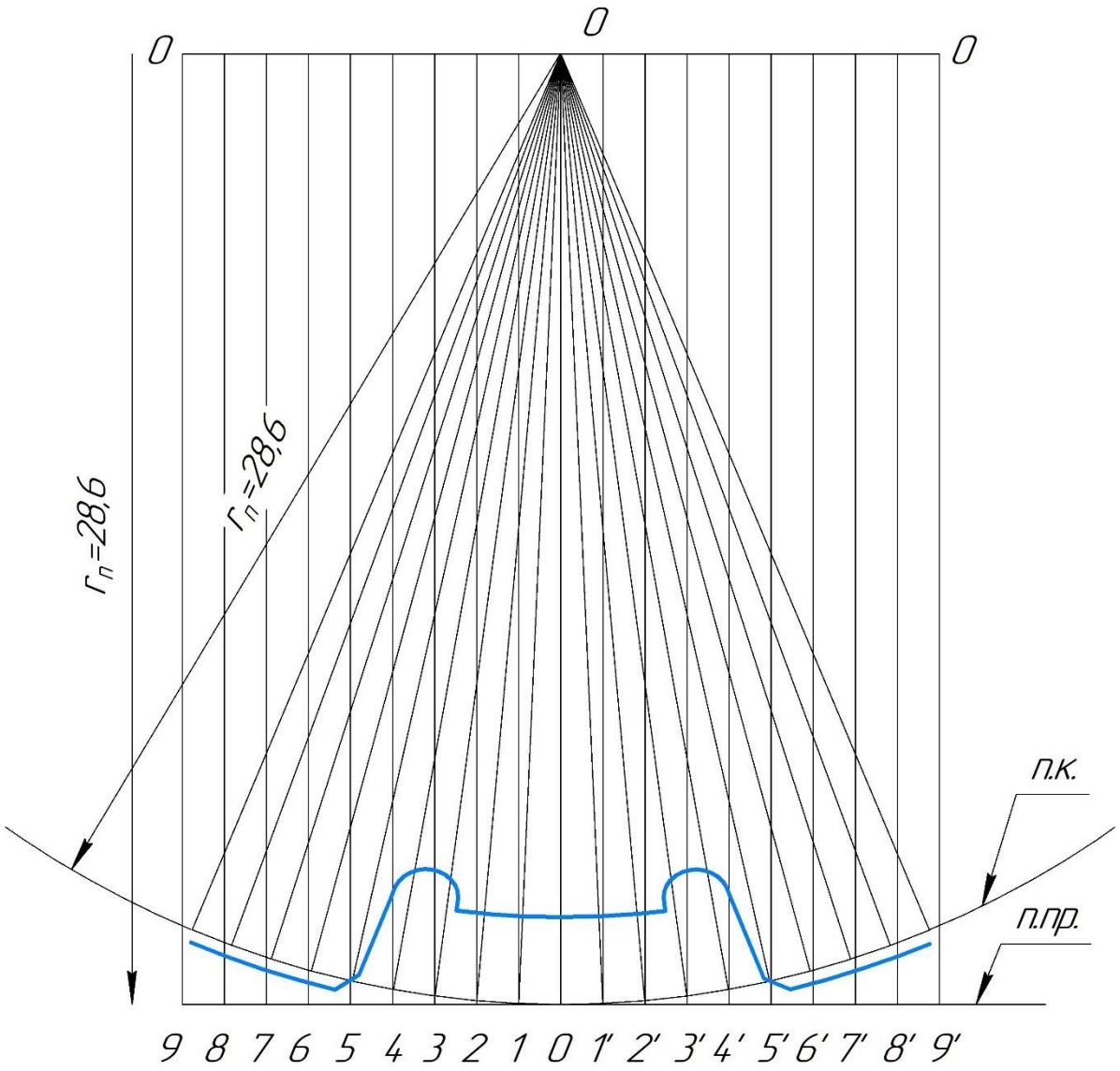


Рис. 3.6 Поєднання шаблонів

Далі суміщаємо перпендикуляр до початкової прямої з радіусним променем у відповідних точках 9 і 9’. Після цього копіюємо шаблон і зберігаємо його.

Потім по черзі суміщаємо відповідні позначки на початковому колі та на початковій прямій, і щоразу копіюємо та зберігаємо отриманий шаблон (рис. 3.7).

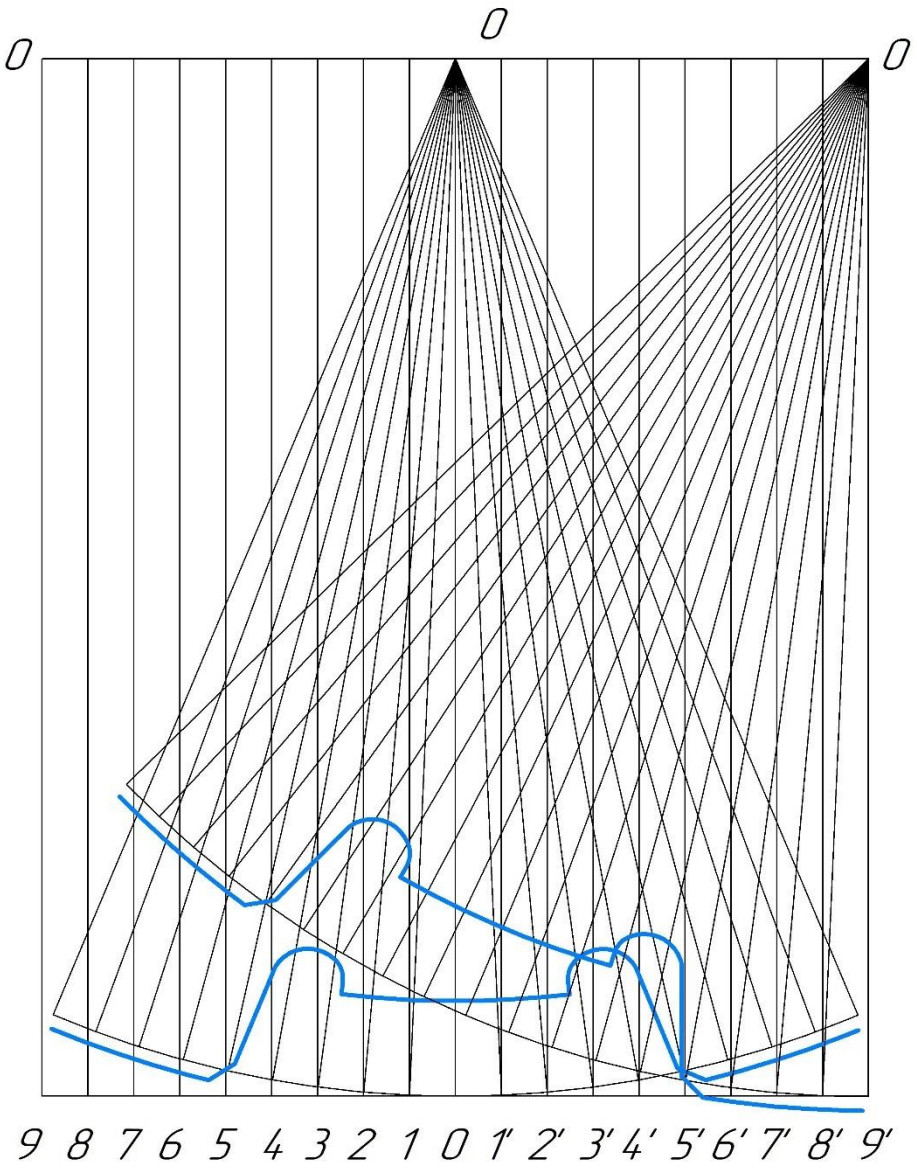


Рис. 3.7 Побудова

У результаті виконаних дій отримуємо графічне зображення сукупності кривих (рис. 3.8), де початкове положення профілю деталі показане товстою лінією. Лінія, яка огинає всі послідовні положення, і є профілем черв’ячної фрези, необхідної для виготовлення заданого шліцьового валу.

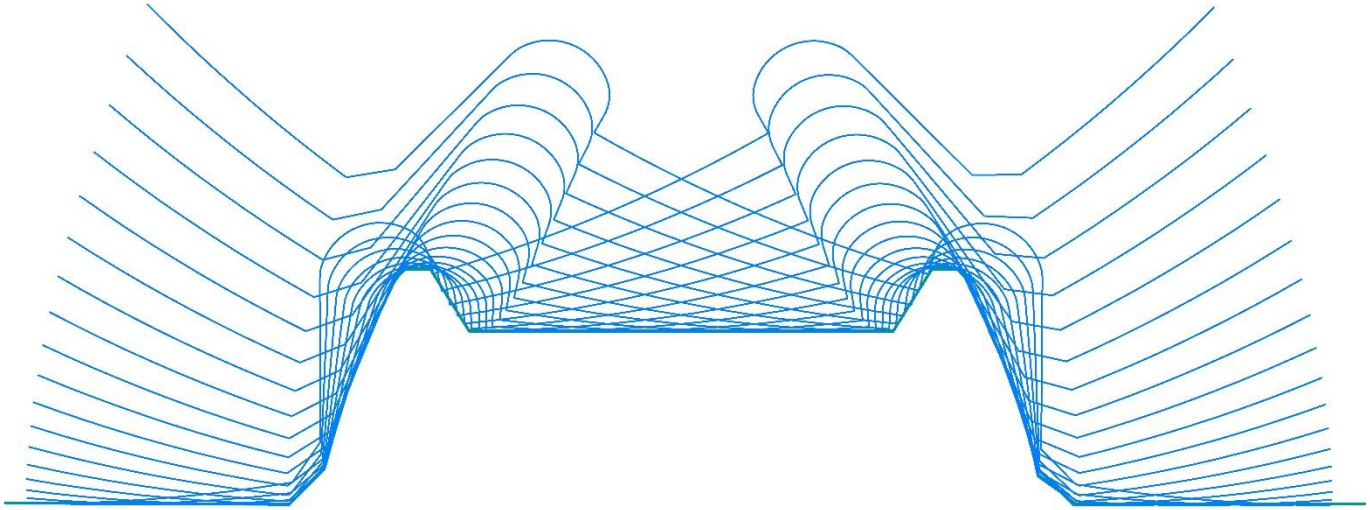


Рис. 3.8 Профілювання

Вирішення зворотної задачі профілювання дозволяє перевірити правильність вирішення прямої задачі та знайти профіль шліцьового валу, який буде виготовлений фрезою із профілем, що представлено на рисунку 3.8.

Спочатку креслимо шаблон відомого профілю інструмента (рис. 3.9) і нумеруємо його поділки. Потім будуємо шаблон початкового кола із розміром r_n.

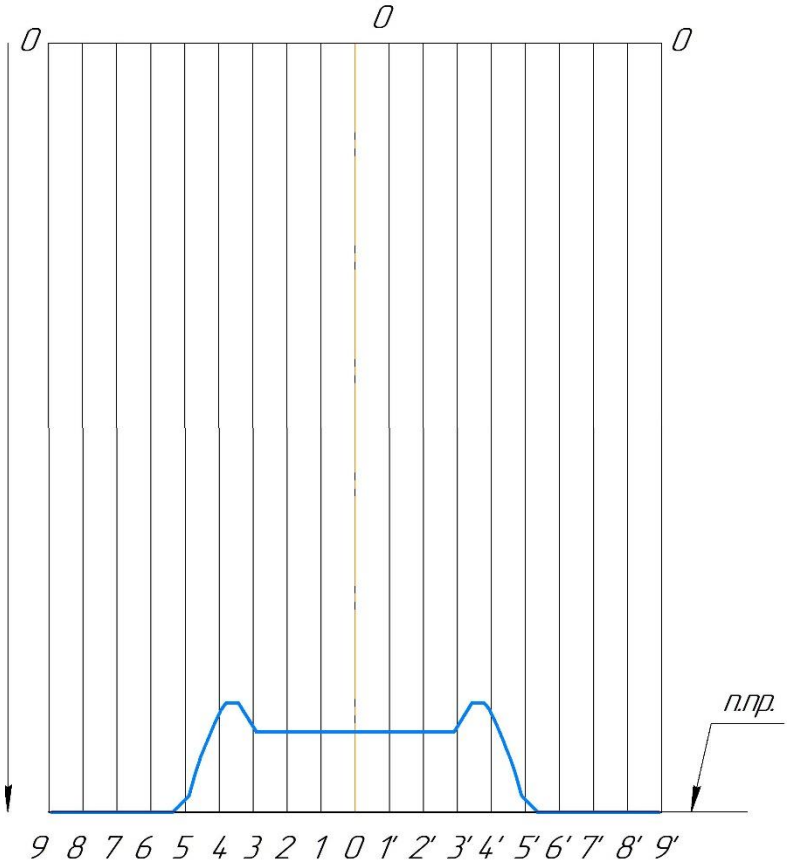


Рис. 3.9 Шаблон профілю інструмента

Далі обидва шаблони накладаємо один на одного (рис. 3.10). Після цього виконуємо обкатування шаблону інструмента (тобто початкової прямої) по початковому колу деталі. Для цього послідовно суміщаємо позначки з однаковими номерами, а також відповідні радіуси з перпендикулярами.

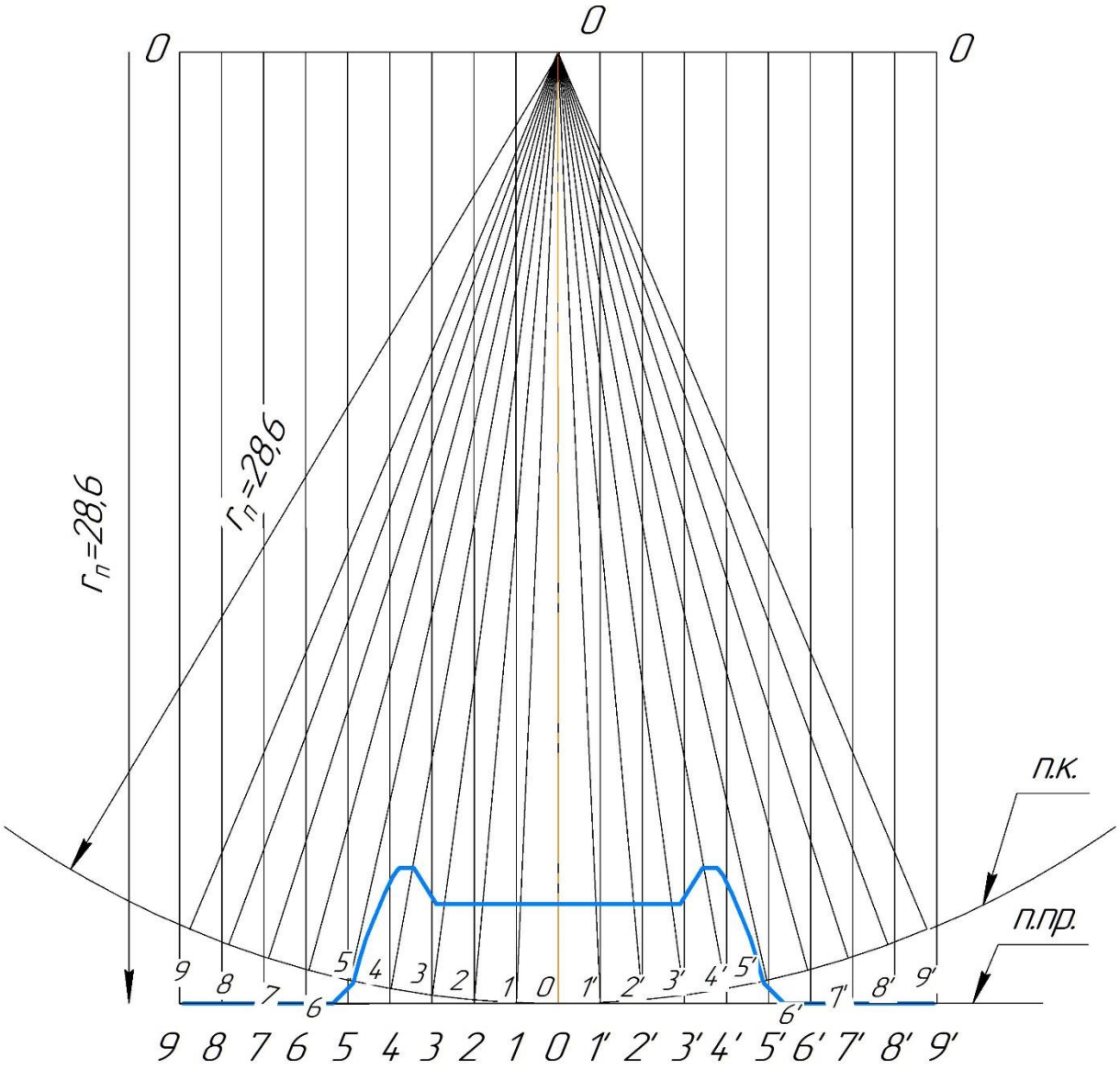


Рис. 3.10 Поєднання шаблонів

У результаті такого обкатування отримують профіль впадини шліця валу в її торцевому перерізі (рис. 3.11).

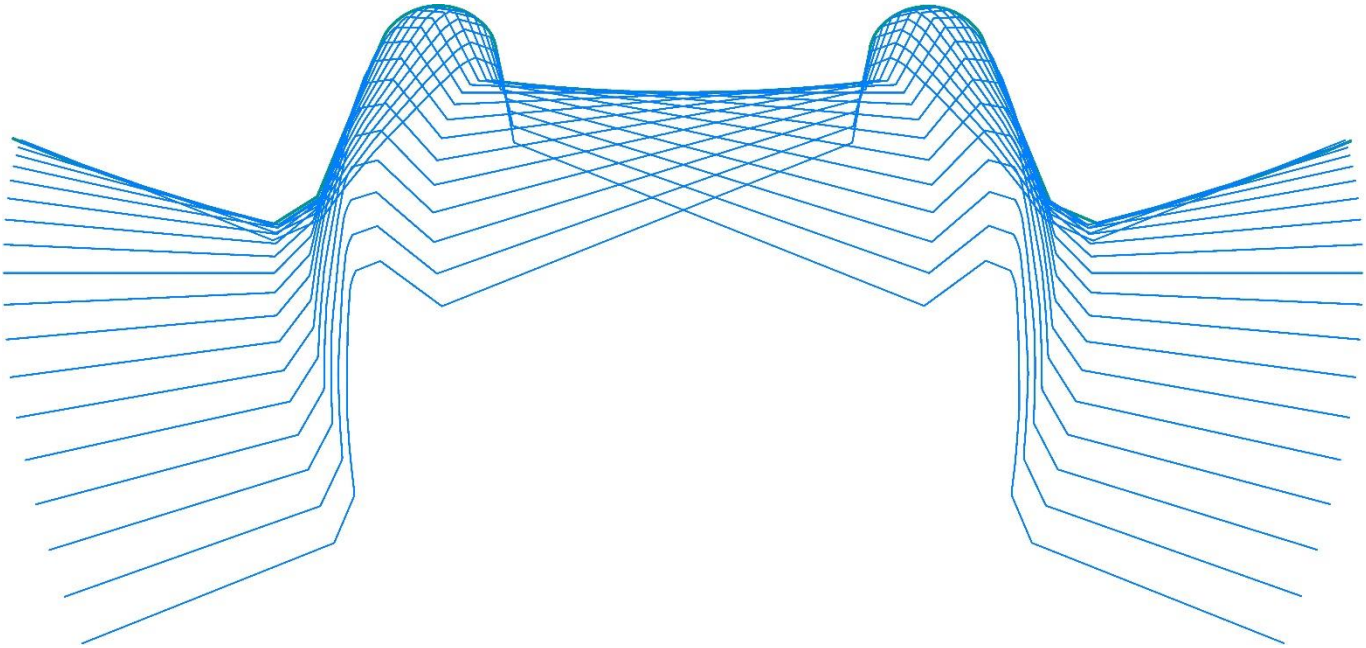


Рис. 3.11 Профілювання шліцьової поверхні

3.2.2. Аналітичний метод профілювання

На відміну від графічного чи наближеного числового підходів, аналітичний метод дозволяє отримати точні аналітичні залежності між параметрами шліцьового з'єднання та геометрією фрези.

Вхідними параметрами (табл. 3.1) для розрахунку є геометричні параметри шліцьової поверхні валу, а також маршрут виготовлення шліців. Обробка шліцьової поверхні складається з трьох операцій механічної обробки – черв'ячне шліцефрезерування та подальше шліфування. Шліцефрезерування виконується в два переходи: чорнове та чистове.

Таблиця 3.1

Вхідні параметри

Параметр	Позначення	Величина, од. вимірювання
Зовнішній діаметр валу	D	58 мм
Верхнє граничне відхилення зовнішнього діаметру	ES_D	-0,34 мм
Нижнє граничне відхилення зовнішнього діаметру	EI_D	-0,53мм
Діаметр западин шліців	d	52 мм

Верхнє граничне відхилення діаметру западин шліців	ES_d	-0,06 мм
Нижнє граничне відхилення діаметру западин шліців	EI_d	-0,106 мм
Ширина шліца	b	10
Верхнє граничне відхилення ширини шліца	ES_b	-0,013
Нижнє граничне відхилення ширини шліца	EI_b	-0,035
Кількість шліців	N	8
Величина фаски	f	0,5 мм
Припуск під шліфування, на діаметр	P_r	0,4 мм
Припуск під чистове шліцефрезерування, на сторону	P_{r1}	0,4 мм

3.2.2.1. Розрахунок розмірів шліцьового валу

Виконуємо розрахунок для чистової шліцьової черв'ячної фрези з вусиками.

Розрахунковий зовнішній діаметр:

$$D_p = D_{max} - 2C, \tag{3.2}$$

де D_{max} – найбільший граничний розмір зовнішнього діаметру;

C – розмір фаски.

$$D_P = 58 - 0{,}34 - 2 \cdot 0{,}5 = 56{,}66 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр западин:

$$d_p = d_{min} + 0{,}25Td, \tag{3.3}$$

де d_{min} – найменший граничний розмір діаметру западин, мм;

Td – допуск на виготовлення діаметру западин, мм.

$$d_P = 52 - 0{,}106 + 0{,}25 \cdot 0{,}046 = 51{,}501 \text{ мм}$$

Розрахункова ширина шліця:

$$b_p = b_{min} + 0{,}25Tb, \tag{3.4}$$

де b_{min} – найменший граничний розмір ширини шліця;

Tb – допуск на ширину шліця, мм.

$$b_P = 10 - 0{,}035 + 0{,}25 \cdot 0{,}023 = 9{,}9705 \text{ мм}$$

Діаметр початкового кола:

$$D_н = \sqrt{D_p^2 - 0{,}75b_p^2} \tag{3.5}$$

$$D_n = \sqrt{56{,}66^2 - 0{,}75 \cdot 9{,}9705^2} = 57{,}211 \approx 57{,}2 \text{ мм}$$

Радіус початкового кола:

$$R_{\text{п}} = \frac{D_{\text{п}}}{2} \tag{3.6}$$

$$R_n = \frac{57{,}2}{2} = 28{,}6 \text{ мм}$$

Кут профілю шліця:

$$sin\,\gamma = \frac{b_p}{D_{\text{н}}} \tag{3.7}$$

$$sin\,\gamma = \frac{9{,}9705}{57{,}2} = 0{,}1742759$$

$$\gamma = arcsin\frac{b_p}{D_{\text{н}}} \tag{3.8}$$

$$\gamma = arcsin\frac{9{,}9705}{57{,}2} = 10°$$

3.2.2.2. Заміна профілю інструменту дугою кола

Висота профілю шліця:

$$h = \frac{D_{\text{н}} - d_p}{2} \tag{3.9}$$

$$h = \frac{57{,}2 - 51{,}501}{2} = 2{,}855 \text{ мм}$$

Ординати точок A_1 та A_2:

$$Y_1 = 0{,}45h, \tag{3.10}$$

$$Y_1 = 0{,}45 \cdot 2{,}855 = 1{,}28$$

$$Y_2 = 0{,}9h. \tag{3.11}$$

$$Y_2 = 0{,}9 \cdot 2{,}855 = 2{,}57$$

Кут повороту заготовки валу φ_1 та φ_2 при відповідних ординатах Y_1 *та* Y_2:

$$sin(\gamma + \varphi_1) = \frac{sin\,\gamma}{2} + \sqrt{\frac{sin^2\gamma}{4} + \frac{Y_1}{R_n}} \tag{3.12}$$

$$sin(\gamma + \varphi_2) = \frac{sin\,\gamma}{2} + \sqrt{\frac{sin^2\gamma}{4} + \frac{Y_2}{R_n}} \tag{3.13}$$

$$sin(\gamma + \varphi_1) = \frac{sin\,10}{2} + \sqrt{\frac{sin^2\,10}{4} + \frac{1{,}28}{28{,}6}} = 0{,}3155$$

$$sin(\gamma + \varphi_2) = \frac{sin\,10}{2} + \sqrt{\frac{sin^2\,10}{4} + \frac{2{,}57}{28{,}6}} = 0{,}4933$$

$$\varphi_1 = arcsin[\,sin(\gamma + \varphi_1)] - \gamma \tag{3.14}$$

$$\varphi_1 = arcsin[0{,}3155] - 0{,}1742759 = 0{,}141241$$

$$\varphi_2 = arcsin[\,sin(\gamma + \varphi_2)] - \gamma \tag{3.15}$$

$$\varphi_2 = arcsin[0{,}4933] - 0{,}1742759 = 0{,}1742759$$

Абсциси точок A_1 та A_2:

$$X_1 = (\varphi_1 - [\sin(\gamma + \varphi_1) - \sin\gamma]\cos(\gamma + \varphi_1))\,R_п \tag{3.16}$$

$$X_2 = (\varphi_2 - [\sin(\gamma + \varphi_2) - \sin\gamma]\cos(\gamma + \varphi_2))\,R_п \tag{3.17}$$

$$X_1 = (0{,}141241 - (0{,}3155 - 0{,}1742759) \cdot 0{,}3155) \cdot 28{,}6 = 0{,}448$$

$$X_2 = (0{,}1742759 - (0{,}4933 - 0{,}1742759) \cdot 0{,}4933) \cdot 28{,}6 = 0{,}895$$

Координати центру кола, що замінює профіль:

$$X_0 = \frac{(X_2^2 + Y_2^2) \cdot Y_1 - (X_1^2 + Y_1^2) \cdot Y_2}{2 \cdot (X_2 \cdot Y_1 - X_1 \cdot Y_2)} \tag{3.18}$$

$$X_0 = 18{,}665\text{ мм}$$

$$Y_0 = \frac{(X_2^2 + Y_2^2) \cdot X_1 - (X_1^2 + Y_1^2) \cdot X_2}{2 \cdot (X_1 \cdot Y_2 - X_2 \cdot Y_1)} \tag{3.19}$$

$$Y_0 = 5{,}842\text{ мм}$$

Радіус кола, що замінює профіль:

$$r_0 = \sqrt{X_0^2 + Y_0^2} \tag{3.20}$$

$$r_0 = \sqrt{18{,}665^2 + 5{,}842^2} = 19{,}558\text{ мм}$$

3.2.2.3. Розрахунок профілю фрези

Під час фрезерування шліцьового валу черв'ячною фрезою біля основи шліца утворюються так звані перехідні криві – тобто бічна поверхня шліца плавно спрягається з циліндричною поверхнею діаметра западин *d* по кривій (галтелі).

Для валів, що центруються у шліцьовому отворі по діаметру западин *d*, наявність таких перехідних кривих на робочій ділянці бічної поверхні шліца є неприпустимою. У цьому випадку на вершинах профілю фрези необхідно передбачати виступи, які називаються вусиками. Вусики формують біля основи шліца валу спеціальні канавки,

що забезпечують чисте спряження бічної поверхні шліца з поверхнею діаметра западин без перехідних кривих на робочій ділянці.

Крок витків по нормалі – крок шліців по початковому колу:

$$P = \frac{\pi D_н}{n} \tag{3.21}$$

де n – кількість шліців.

$$P = \frac{3{,}14 \cdot 57{,}2}{8} = 22{,}455 \text{ мм}$$

Товщина зуба фрези по початковій прямій (дорівнює ширині западини між шліцями вала по початковому колу):

$$S = D_н \left(\frac{\pi}{n} - \gamma\right) \tag{3.22}$$

$$S = 57{,}211 \left(\frac{3{,}14}{8} - 0{,}1742759\right) = 12{,}485$$

Висота криволінійної ділянки профілю (без урахування висоти вусиків):

$$h_1 = \frac{D_p - d_p}{2} \tag{3.23}$$

$$h_1 = \frac{57{,}211 - 51{,}501}{2} = 2{,}855 \text{ мм}$$

Приймаємо $h_1 = 2{,}855$ мм.

Загальна висота профілю:

$$h_0 = h_1 + h_y + C + (1{,}5 \div 3) \tag{3.24}$$

де h_y – висота вусиків:

$$h_y = R_n \ sin\ \alpha_к \ (sin\ \alpha_к - sin\ \gamma_к) - h \tag{3.25}$$

де $\alpha_к$ – критичний кут, при якому може відбуватися профілювання вусиків в точці К:

$$\alpha_к = \arccos \frac{d_p \cos\gamma_к}{D_n} \tag{3.26}$$

$$\cos\alpha_к = \frac{d_p \cos\gamma_к}{D_n} \tag{3.27}$$

$\gamma_к$ – кут профілю шліца біля його основи:

$$\gamma_к = arcsin \frac{b_p}{d_p} \tag{3.28}$$

$$\gamma_к = arcsin\frac{9{,}9705}{51{,}501} = 0{,}1936$$

$$\alpha_к = \arccos\frac{51{,}501 \cdot 0{,}1936}{57{,}211} = 0{,}1742$$

$$h_y = 28{,}6 \cdot \sin 79{,}9\,(\sin 79{,}9 - \sin 11{,}16) - 2{,}855 = 0{,}95 \text{ мм}$$

Приймаємо $h_y = 1$ мм.

$$h_0 = 2{,}855+1{,}1+0{,}5+2{,}4 = 6{,}855 \text{ мм}$$

Ширина канавки по дну западини:

$$V = P - S - 2C, \tag{3.29}$$

$$V = 22{,}455 - 12{,}485 = 8{,}97 \text{ мм}$$

3.3. Конструктивні параметри фрези

Розміри профілю фрези залежать від кроку P. При $P = 22{,}455$ мм:

- діаметр отвору $d_0 = 32$ мм;
- діаметр буртиків $d_б = 48$ мм;
- ширина буртиків $b_б = 3{,}5$ мм.

Зовнішній діаметр фрези:

$$D_{\text{фр}} = 3 \cdot d_0 \tag{3.30}$$

$$D_{\text{фр}} = 3 \cdot 32 = 96 \text{ мм}$$

Приймаємо за нормативами $D_{\text{фр}} = 110$ мм.

Довжина фрези:

$$L \geq 2 \cdot \sqrt{h_1 \cdot (D - h_1)} + 2\text{P} + 2\text{b}_б, \tag{3.31}$$

$$L \geq 2 \cdot \sqrt{2{,}5 \cdot (58 - 2{,}855)} + 2{\cdot}22{,}455 + 2{\cdot}3{,}5{=}77 \text{ мм}$$

Приймаємо довжину фрези $L = 100$ мм.

Довжина посадкового отвору:

$$l = \frac{L}{3} = \frac{100}{3} = 33 \text{ мм}$$

Приймаємо довжину посадкового отвору $l = 30$ мм.

Кількість зубців фрези приймаємо $Z = 12$.

Визначаємо значення першого затилування:

$$К = \frac{\pi \cdot D_{фр}}{Z} \text{tg}\alpha_в \quad (3.32)$$

де $\alpha_в$ – задній кут при вершині зуба

$$К = \frac{3{,}14 \cdot 110}{12} \text{tg}10° = 4{,}35 \text{ мм}$$

Приймаємо $К = 4{,}5$ мм.

Дійсне значення заднього кута із корекцією величини першого затилування:

$$\alpha_{вк} = atan\left(\frac{K \cdot Z}{\pi \cdot D_{фр}}\right) \quad (3.33)$$

$$\alpha_{вк} = atan\left(\frac{4{,}5 \cdot 12}{3{,}14 \cdot 110}\right) = 10{,}337°$$

Визначаємо значення другого затилування:

$$K1 = 1{,}4 \cdot K \quad (3.34)$$

$$K1 = 1{,}4 \cdot 4{,}5 = 6{,}35 \text{ мм}$$

Приймаємо $К1 = 6{,}5$ мм.

Визначаємо довжину шліфованої частини зуба фрези:

$$С_Ш = \frac{P_{кол}}{3} \quad (3.35)$$

де $P_{кол}$ – коловий крок зубців, мм

$$P_{кол} = \frac{\pi \cdot D_{фр}}{Z}$$

$$P_{кол} = \frac{3{,}14 \cdot 110}{12} = 24{,}67$$

$$С_Ш = \frac{24{,}67}{3} = 8{,}22 \text{ мм}$$

Визначаємо глибину стружкової канавки:

$$H = h_0 + \frac{К + К_1}{2} + r \quad (3.36)$$

$$H = 6{,}855 + \frac{4{,}5 + 6{,}5}{2} + 3 = 15{,}355 \text{ мм}$$

Приймаємо глибину стружкової канавки $H = 16$ мм.

Середній розрахунковий розмір:

$$D_{ср} = D_{фр} - 2\ (h + h_y) - 0{,}25\ K \quad (3.37)$$

$$D_{\text{ср}} = 110 - 2 \cdot (2{,}85 + 1{,}1) - 0{,}25 \cdot 4{,}5 = 103{,}24 \text{ мм}$$

Визначаємо кут нахилу стружкової канавки:

$$\omega = \arcsin\frac{P}{\pi \cdot D_{\text{ср}}} \tag{3.38}$$

$$\omega = \arcsin\frac{22{,}455}{3{,}14 \cdot 103} = 3{,}98°$$

Визначаємо крок витків по осі фрези:

$$P_o = \frac{P}{\cos\omega} \tag{3.39}$$

$$P_o = \frac{22{,}455}{cos3{,}98°} = 22{,}51 \text{ мм}$$

Визначаємо крок гвинтових стружкових канавок:

$$T = P_o \operatorname{ctg}^2\tau. \tag{3.40}$$

$$T = 22{,}51 \cdot ctg^2 3{,}98° = 4637 \text{ мм}$$

3.4. Проєктування та розрахунок черв'ячної шліцьової фрези для чорнової обробки

Розв'язком прямої задачі графічного профілювання є побудова шаблону відомого профілю деталі із прив'язкою до початкового кола r_n. Шаблон впадини шліця (рис. 3.12), що утвориться в процесі обкату чорнової фрези проєктуємо виходячи із міркувань, що припуск на чистову фрезерну обробку рівний 0,4 мм на сторону як для внутрішнього діаметру, так і для бічних поверхонь шліців.



Рис. 3.12. Чорновий профіль впадини шліця

Із врахуванням початкового радіусу будуємо шаблони побудов та профілю шліців, що утвориться після чорнової обробки (рис. 3.13).

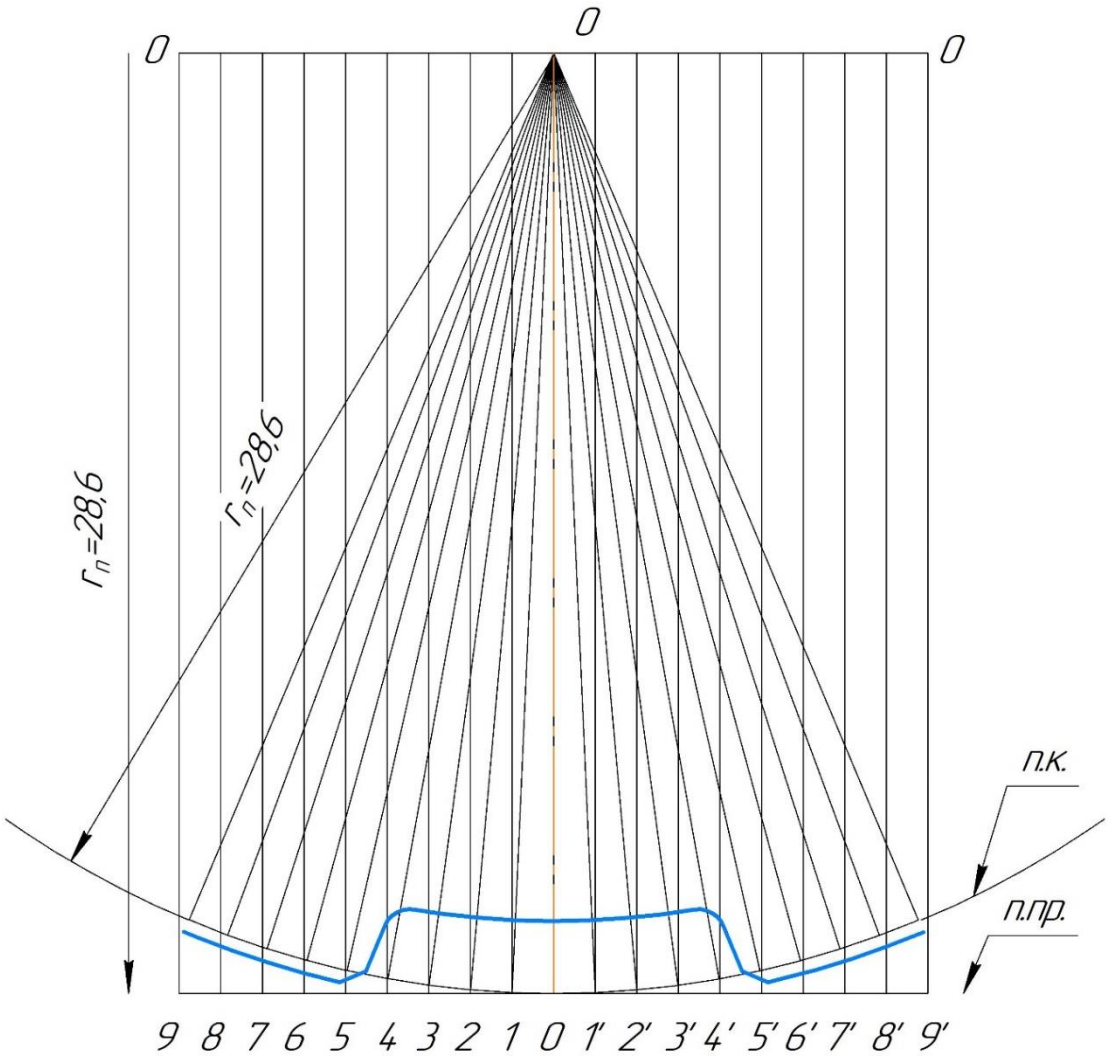


Рис. 3.13 Шаблон побудов та шаблон профілю шліців після чорнової обробки

У результаті обкатування отримуємо графічне зображення сукупності кривих (рис. 3.14), де лінія, яка огинає всі послідовні положення деталі, і є профілем чорнової черв’ячної фрези.

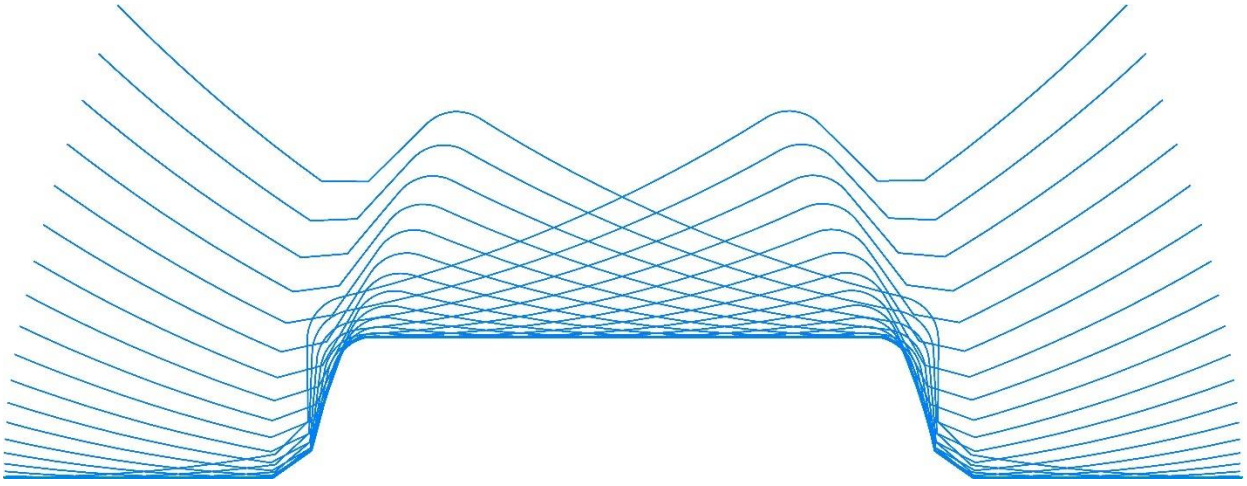


Рис. 3.14 Профілювання чорнової черв’ячної фрези

Вирішенням зворотної задачі профілювання є знаходження профілю шліцьового валу, який буде виготовлений після чорнової обробки спрофільованою фрезою (рис. 3.14).

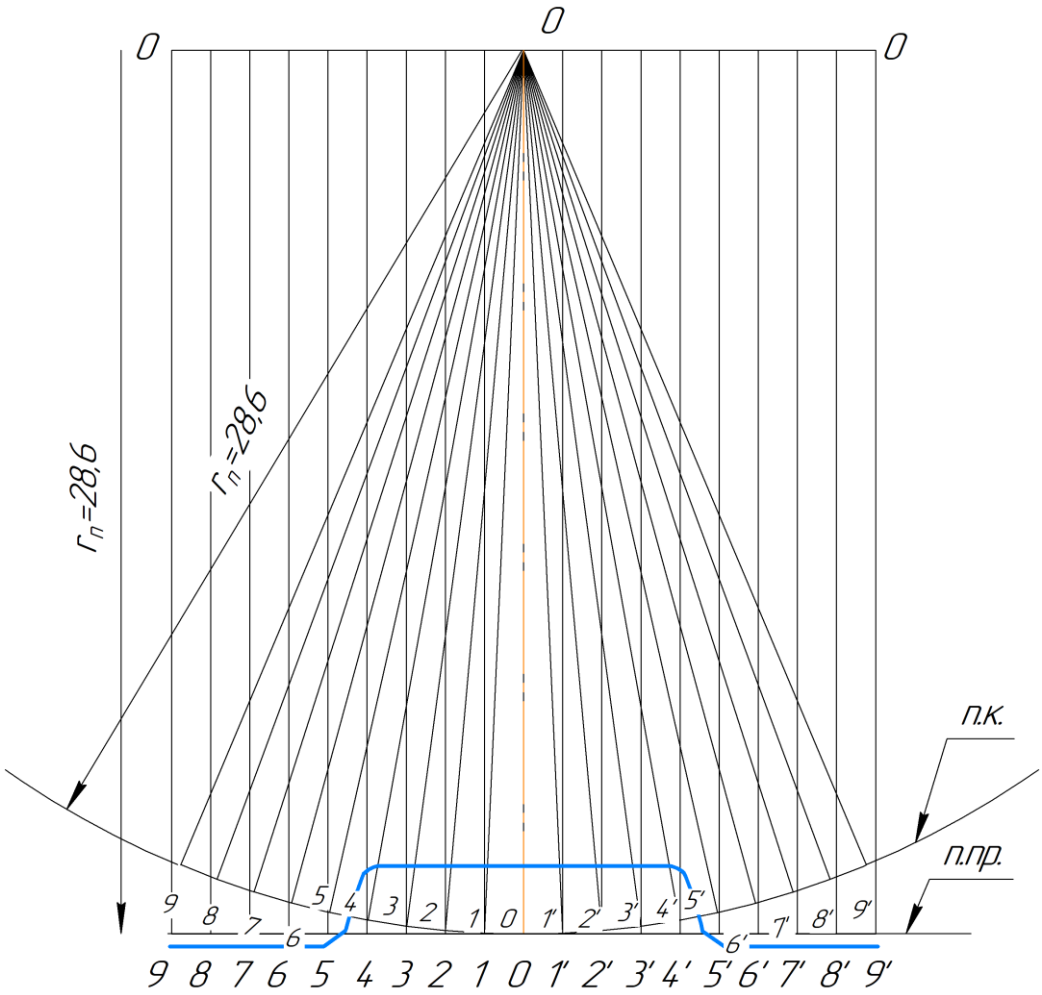


Рис. 3.15 Поєднання шаблонів

Виконуємо обкатування шаблону інструмента (тобто початкової прямої) по початковому колу деталі. Для цього послідовно суміщаємо позначки з однаковими номерами, а також відповідні радіуси з перпендикулярами. У результаті обкатування отримуємо профіль впадини шліця валу в його торцевому перерізі (рис. 3.16).

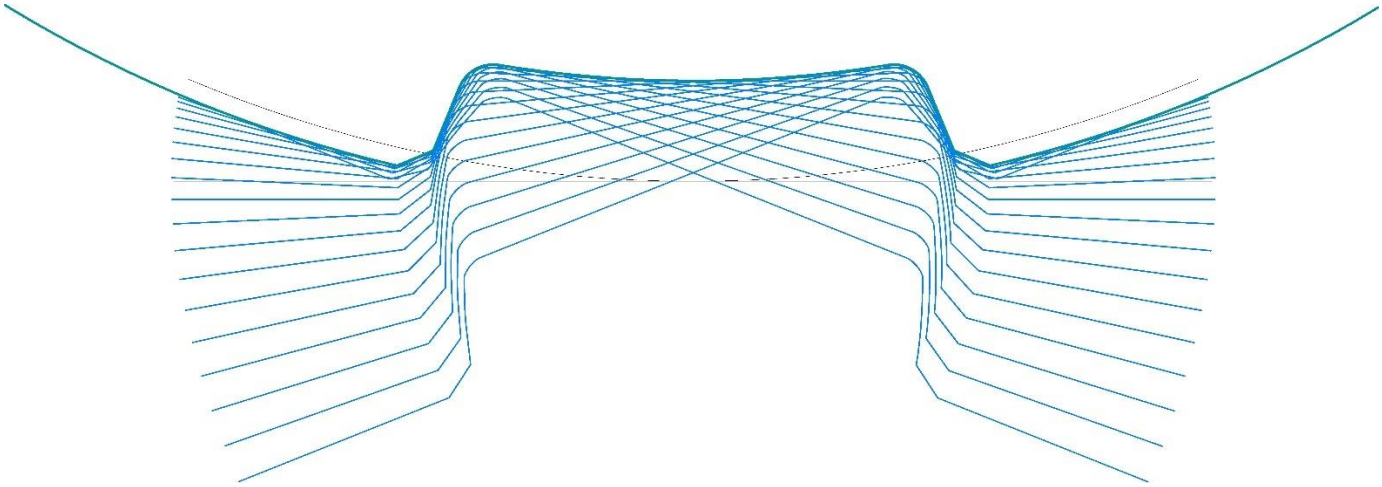


Рис. 3.16 Профілювання шліцьової поверхні після чорнової обробки

Розрахунковий діаметр западин:

$$d_P = 52 - 0{,}6 + 0{,}25 \cdot 1{,}2 + 0{,}8 = 52{,}8 \text{ мм}$$

Розрахункова ширина шліця:

$$b_p = b_{min} + 0{,}25Tb, \tag{3.4}$$

де b_{min} – найменший граничний розмір ширини шліця;

Tb – допуск на ширину шліця, мм.

$$b_P = 10 - 0{,}098 + 0{,}25 \cdot 0{,}058 + 0{,}8 = 10{,}76 \text{ мм}$$

3.5. Розробка креслень шліцьових черв'ячних фрез

Черв'ячна шліцьова фреза виготовляється із швидкорізальної сталі Р6М5.

На основі розрахунків та графічних побудов креслимо чорнову та чистову черв'ячні шліцьові фрези для обробки шліцьової поверхні (рис. 3.1). На кресленнях показуємо інструмент у необхідних проєкціях та з достатньою кількістю розрізів та видів. Вказуємо розміри із відхиленнями. Зазначаємо шорсткість поверхонь та вимоги щодо відхилень та допусків форми та розташування поверхонь.

Креслення спроєктованої чорнової шліцьової черв'ячної фрези представлено на рис. 3.17. На рис. 3.18 представлено креслення спроєктованої чистової шліцьової черв'ячної фрези з вусиками.

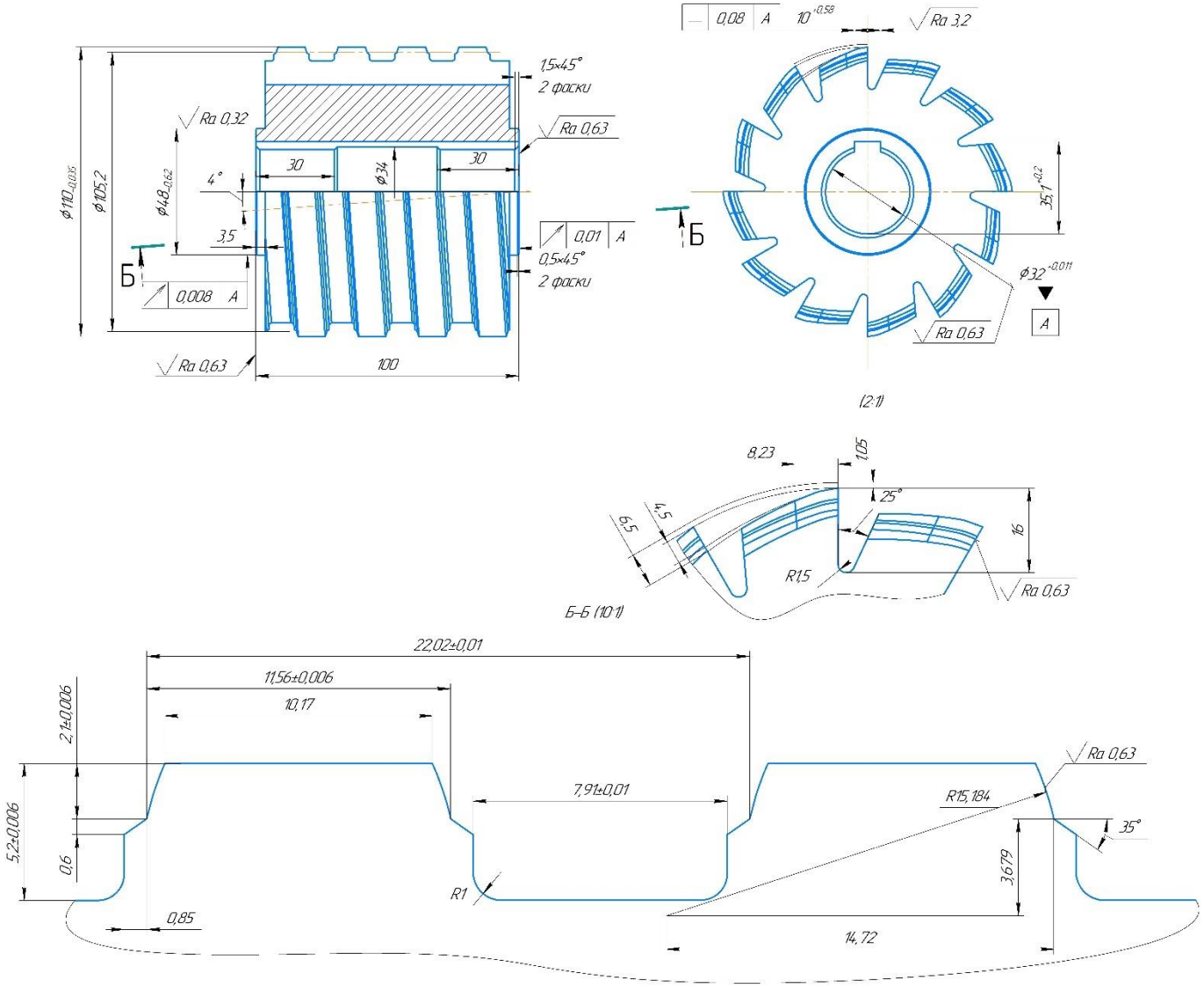


Рис. 3.17 Чорнова шліцьова черв’ячна фреза

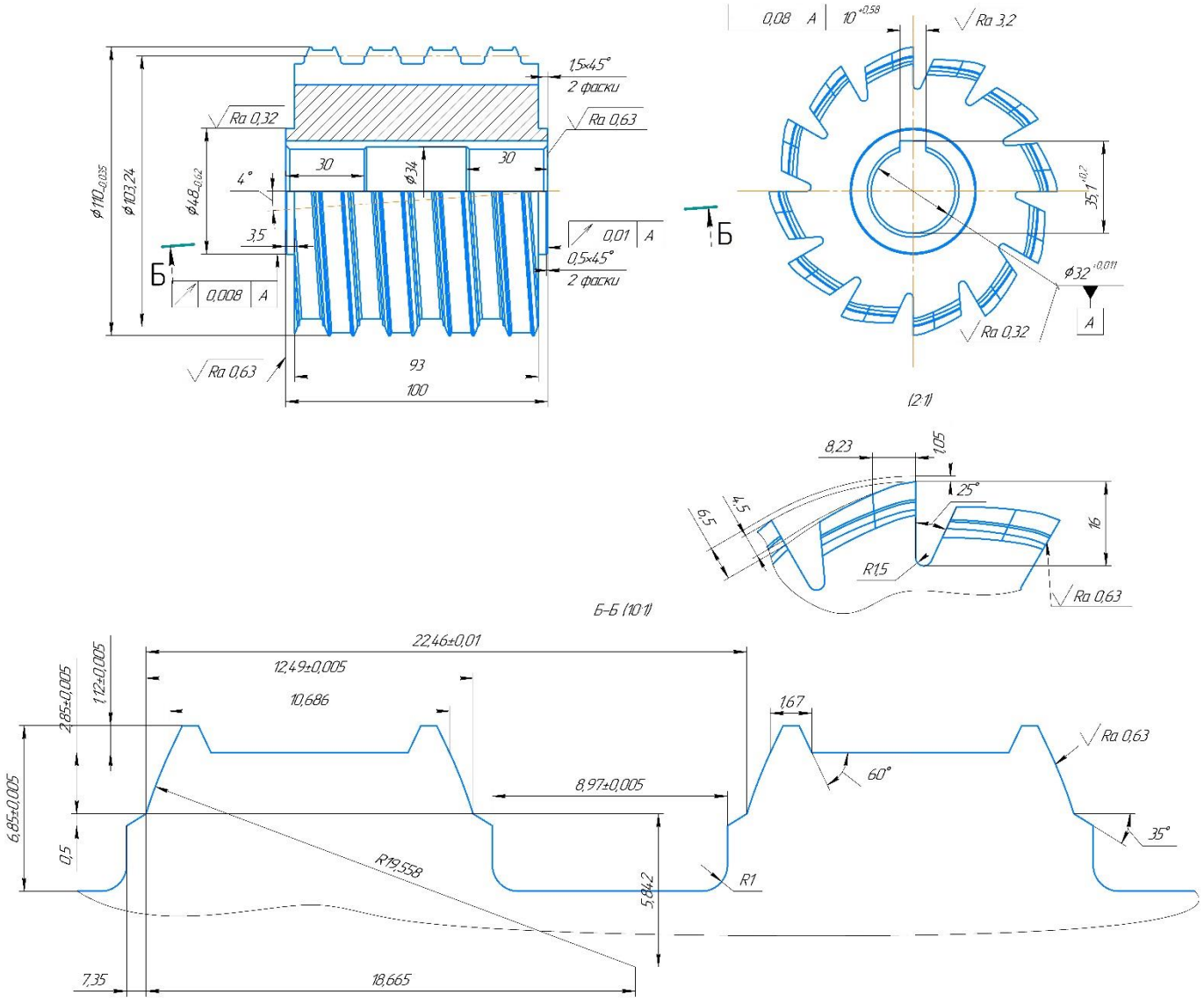


Рис. 3.18 Чистова шліцьова черв’ячна фреза

3.6. Вдосконалення конструкції черв’ячної фрези

При шліцефрезеруванні звичайною черв’ячною фрезою стружка має характерну П-подібну форму. П-подібна форма виникає тому, що зубець фрези при обкатуванні одночасно ріже трьома ділянками профілю: лівою бічною кромкою, яка формує ліву бічну поверхню шліца, вершинною кромкою, яка формує дно западини між шліцями, та правою бічною кромкою, яка формує праву бічну поверхню шліца. Всі три ділянки ріжуть одночасно, і стружка знімається як єдиний елемент П-подібного перерізу – дві бічні «ніжки» від бічних кромок і перемичка від вершинної кромки.

П-подібний переріз є жорстким профілем – така стружка чинить опір деформації при завиванні, що призводить до підвищених сил різання, вібрацій при врізанні та

виході зубця і нерівномірного навантаження на зубець фрези. Крім того, П-подібна стружка важко виходить із западини, оскільки її ширина майже дорівнює ширині западини між шліцями – вона защемлюється між бічними поверхнями западини і зубцем фрези, а при великих подачах стружка не встигає вийти до входу наступного зубця. Найтовстіша частина П-подібної стружки – перемичка від вершинної кромки – формується в найглибшій точці западини, де швидкість різання мінімальна, умови різання найгірші, і стружка найважче відходить.

Зубці фрези, що оснащені вусиками, які призначені для прорізання фасок або заокруглень біля основи шліца, формують стружку в якій до основної П-подібної скоби додаються бічні відгалуження на кутах. Стружка виглядає як широка скоба з додатковими «крильцями» по боках.

На основі проведеного патентного пошуку та аналізу відомих конструкцій черв'ячних фрез (пункт 2.3), вирішено вдосконалити різальний інструмент шляхом введення в його конструкцію стружколомних канавок за прикладом [7, 8].

Запропонована стружколомна канавка виготовляється таким чином, що поділяє вершинну кромку на дві частини. Завдяки цій канавці форма стружки трансформується з цілісної П-подібної скоби у два окремі фрагменти, що зазвичай нагадують Г-подібні елементи. Оскільки ширина зрізу для кожної частини зменшується, стружка втрачає свою надмірну жорсткість. Стружколомна канавка зменшує ширину контакту між вершиною зуба фрези та поверхнею деталі.

Така зміна геометрії суттєво покращує умови відведення стружки, адже розділені фрагменти мають менший опір і не забиваються в міжстружкових канавках фрези, що практично виключає ризик заклинювання та випадкової поломки інструменту. Оскільки розділена стружка займає менший об'єм і значно менше тисне на бічні стінки пазу, суттєво знижується ймовірність появи подряпин на чистовій поверхні шліців, а самі частинки металу вільно вимиваються змащувально-охолоджувальною рідиною із зони різання.

З точки зору стійкості фрези, канавка забезпечує важливе термічне розвантаження найбільш напруженої точки вершинної кромки. Це дозволяє розподілити тепло на дві окремі ділянки, захищаючи вершину зуба та «вусики» від перегріву і передчасного зносу.

На основі аналізу [7, 8] прийнято рішення виконувати стружколомні канавки трикутної форми. Параметри канавки прийнято технологічно із огляду на те, що її глибина має бути більшою ніж товщина зрізуваного шару металу.

Вирішено розташувати канавки в шаховому порядку. На парних зубцях (рис. 3.19, а) канавки розташовується на вершинній кромці в її центральній точці, на непарних зубцях (рис. 3.19, б) вирішено розташувати дві канавки, що будуть розташовані на вершинній кромці симетрично осі симетрії зубця. Завдяки наявності двох стружколомних канавок на вершинній кромці одного зубця ширина контакту між вершиною зуба фрези та поверхнею деталі буде зменшена, що забезпечить ще краще стружкодроблення та стружковідведення.

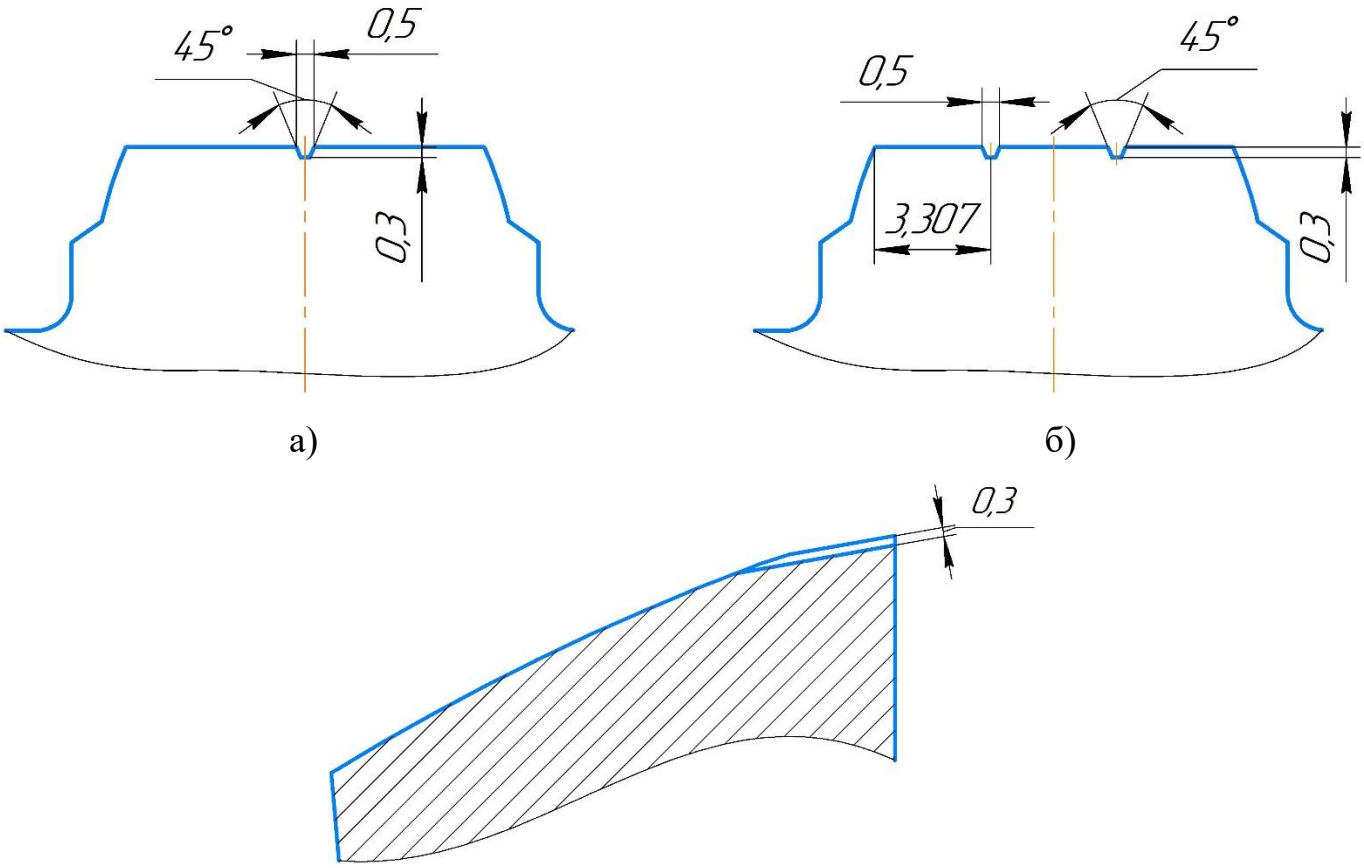


Рис. 3.19 Різальні кромки із стружколомними канавками чорнової фрези:
а – парного зубця; б – непарного

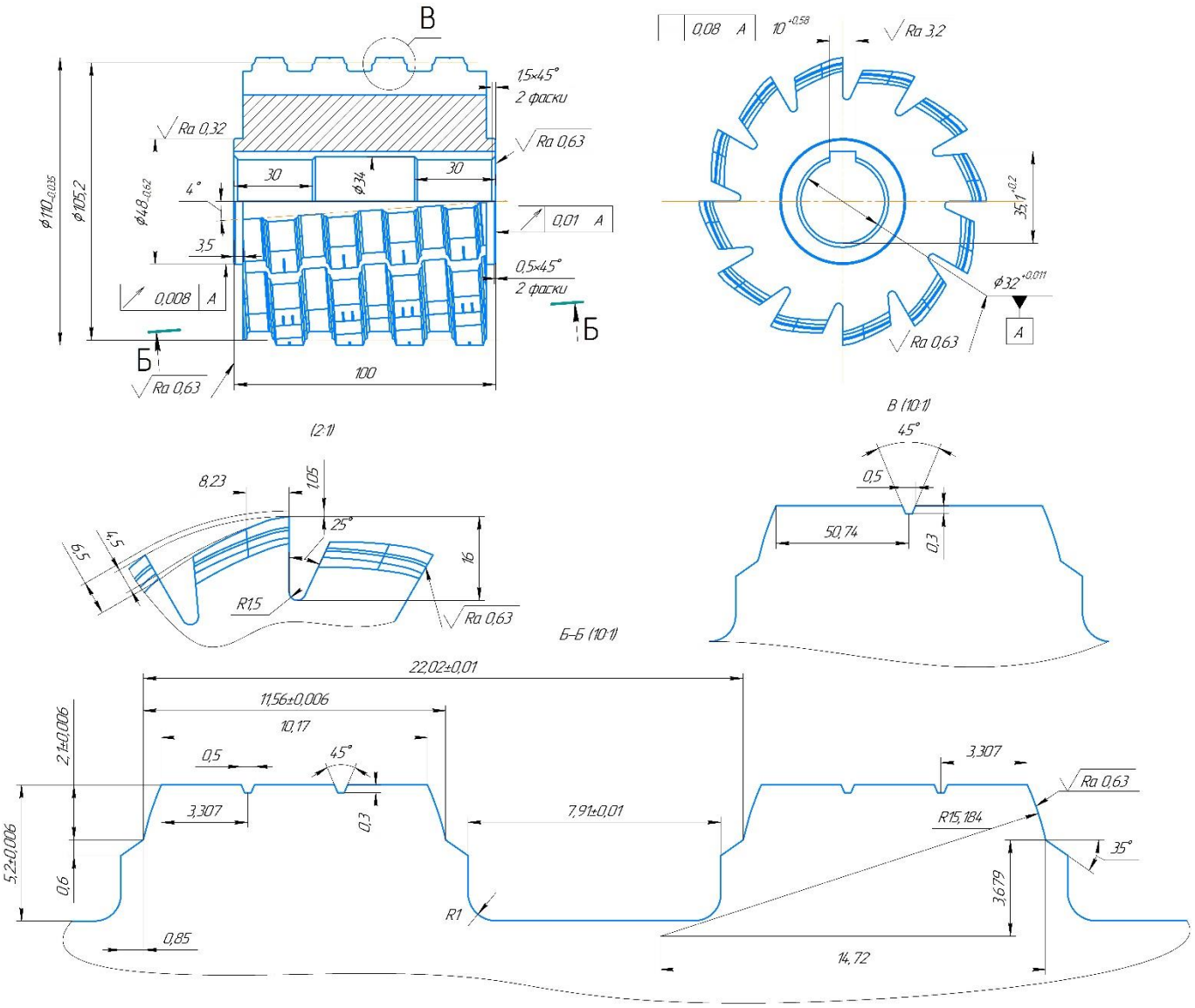


Рис. 3.20 Вдосконалена чорнова шліцьова черв’ячна фреза

3.7. Висновки

Розроблено маршрут обробки шліцьової поверхні валу. Центрування прямобічних шліців виконується за внутрішнім діаметром, тож в кутах западин шліців передбачені спеціальні перехідні канавки, які призначені для виходу шліфувального круга, що дозволяє уникнути появи радіусних заокруглень у кутах, які могли б заважати правильній посадці втулки. Згідно із маршрутом, шліці оброблюються чорновою черв’ячною шліцьовою фрезою, а потім чистовою, яка має у своїй конструкції вусики, за допомогою яких фрезеруються перехідні канавки, що призначені для виходу шліфувального круга, на операції шліфування, не

пошкоджуючи бічної грані шліца, що оброблюватиме внутрішню поверхню по всій ширині.

Графоаналітичним методом шляхом розв’язку прямої та зворотної задач профілювання спроєктовано профілі зуба черв’ячних фрез для чорнової та чистової стадії обробки. Аналітичним методом розраховано параметри інструментів. Розроблено креслення обох черв’ячних шліцьових фрез.

З метою зменшення жорсткості та ширини стружки, які впливають на опір деформації, що призводить до підвищення сил різання та вібрацій, запропоноване вдосконалення різального інструменту шляхом введення в його конструкцію стружколомних канавок.

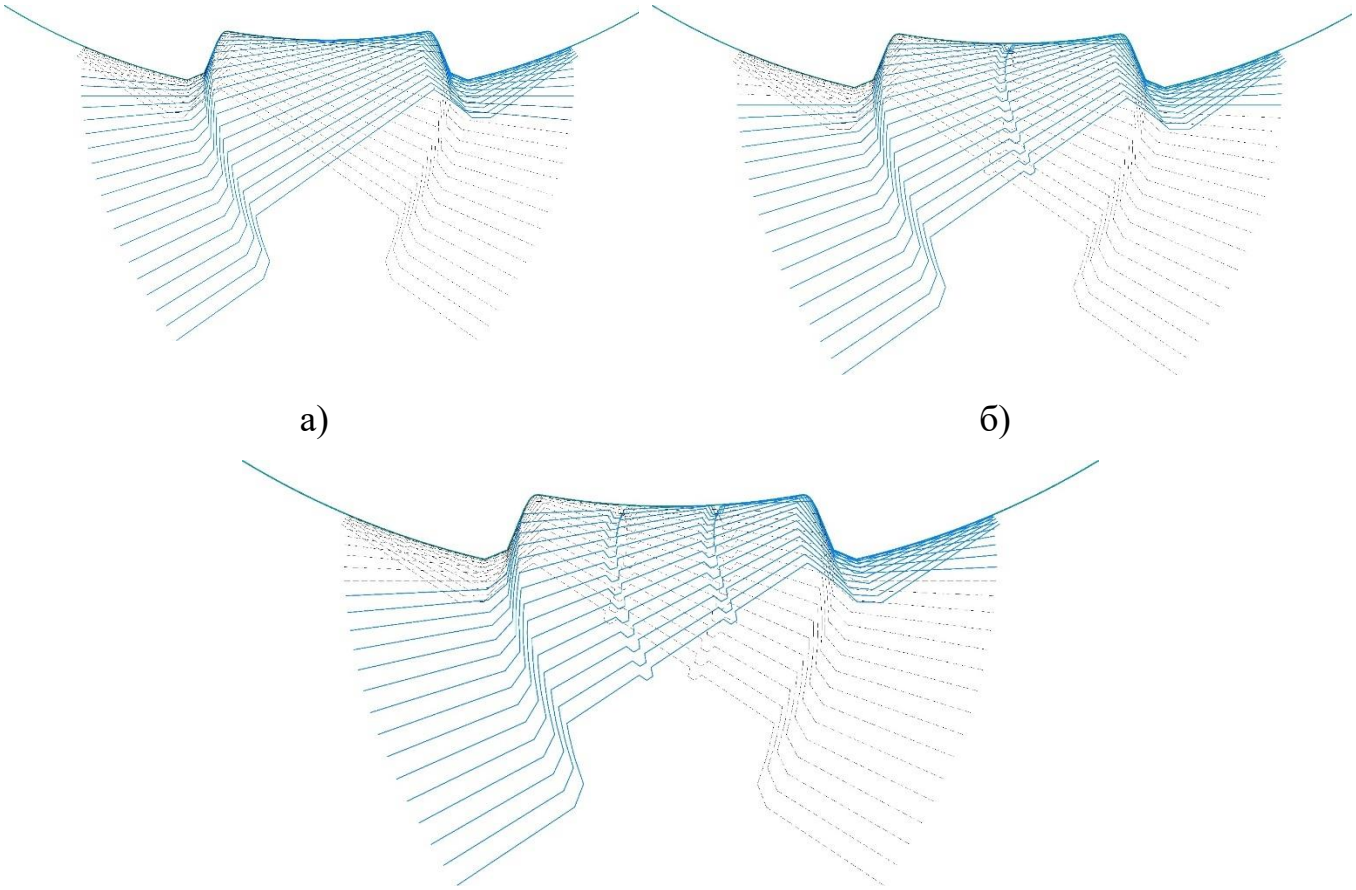
Стружколомна канавка поділяє вершинну кромку зубця чорнової черв’ячної шліцьової фрези на дві частини. Завдяки цій канавці форма стружки трансформується з цілісної П-подібної скоби у два окремі фрагменти, що зазвичай нагадують Г-подібні елементи. Оскільки ширина зрізу для кожної частини зменшується, стружка втрачає свою надмірну жорсткість. Стружколомна канавка зменшує ширину контакту між вершиною зуба фрези та поверхнею деталі.

Канавки розташовуються в шаховому порядку. На парних зубцях канавки розміщені на вершинній кромці в її центральній точці, на непарних зубцях виготовляються дві канавки, що розташовані на вершинній кромці симетрично осі симетрії зубця. Завдяки наявності двох стружколомних канавок на вершинній кромці одного зубця стружка, що зрізається таким зубом, поділяється на 3 частини, що забезпечує зменшення її ширини.

РОЗДІЛ 4. ТОЧНІСТЬ ОБРОБКИ ЗАПРОПОНОВАНОЮ УДОСКОНАЛЕНОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ ШЛІЦЬОВОЇ ЧЕРВ'ЯЧНОЇ ФРЕЗИ

4.1. Форма стружки, що утворюється удосконаленою черв'ячною фрезою

Для аналізу форми стружки, що утворюється в процесі різання, будуємо послідовні положення зуба фрези за методом обкату. На рисунку 4.1 представлено послідовні положення зуба стандартної черв'ячної шліцьової фрези (4.1, а) при формуванні заданого шліця розглядаємої деталі (рис. 3.1). Послідовні положення зубців фрези із однією та двома стужколомними канавками зображені на рисунках 4.1, б та 4.1, в відповідно.



а) б)

в)

Рис. 4.1 Послідовні положення зубця чорнової черв'ячної шліцьової фрези: а - стандартної геометрії; б - із стружколомною канавкою; в - із двома стружколомними канавками

Основною лінією показані положення зубця фрези при яких видаляється найбільша кількість матеріалу деталі в западинах шліців. Положення зубця фрези, що зображені штриховими лініями, відображають положення різальних кромок, які «підчищають» оброблювані поверхні при русі обкату та видаляють менший об’єм матеріалу деталі. Положення зубців фрези на рисунку 4.1 показані схематично та не в залежності від величини подачі при фрезеруванні. Отже, і товщина зрізів теж показана схематично, вона має бути меншою ніж глибина стружколомної канавки.

Для порівняння форми стружки, що утворюється різними геометріями вершинної кромки зубця фрези, та наочного зображення її подрібнення запропонованими канавками, обираємо два послідовних положення вершинної кромки. Ці положення обираємо (рис. 4.2) з умови, що вершинна кромка ріже матеріал всією своєю шириною та зубець в цих положеннях формує П-подібну стружку.

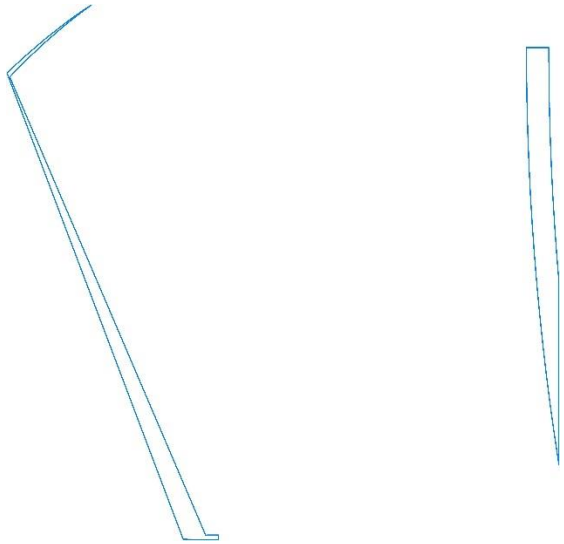
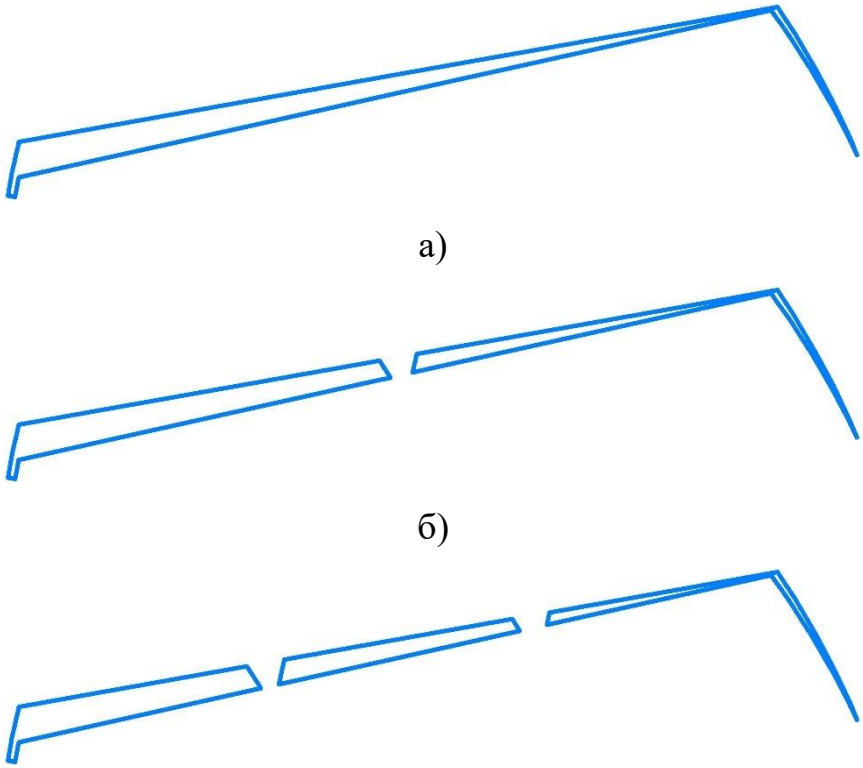


Рис. 4.2 Стружка в двох проєкціях

Форма стружки (рис. 4.3) демонструє вплив запропонованої канавки. П-подібна стружка розділяється канавкою на дві Г-подібних (рис. 4.3, б). Наявність двох стружкових канавок на вершинній кромці забезпечує поділ стружки на 3 частини: дві Г-подібні, та одну пряму (рис. 4.3, в).



а)

б)

в)

Рис. 4.3 Форма стружки при геометрії вершинної кромки:
а - стандартній; б - з однією канавкою; в - з двома канавками

4.2. Залежність сил різання від форми стружки

Процес фрезерування шліців є переривчастим і складним, тому важливо знати силу різання на кожному зубі. В роботі [49] розглянуто сили різання відносно товщини стружки. Сила різання dFc, що діє перпендикулярно до площини різання та сила dFt, що діє в площині різання перпендикулярно до ріжучої кромки [49]:

$$dF_c = \left(K_{c,c} h_e + K_{c,e}\right) w$$

$$dF_t = \left(K_{t,c} h_e + K_{t,e}\right) w$$

де $K_{c,c}$, $K_{t,c}$ – коефіцієнти сил різання [20];

$K_{c,e}$, $K_{t,e}$ – коефіцієнти сил різальної кромки [20];

h_e – середня товщина стружки;

w – ширина стружки.

В роботі [49] визначено, що навантаження на зуби фрези розподіляється вкрай нерівномірно. Найбільші сили різання (і, відповідно, найбільший знос) припадають

на вершини зубів, що знаходяться в зоні формування впадини шестерні. Знос на бокових кромках відрізняється від зносу на вершині через різну товщину стружки та швидкість деформації матеріалу в цих зонах.

Метод [37] базується на використанні питомої сили різання. Головна відмінність цього методу – врахування того, що опір металу зростає при зменшенні товщини стружки.

Тангенціальна сила різання визначається за формулою:

$$P_Z = A \cdot k_c \tag{4.1}$$

де A – сумарна площа поперечного перерізу шару, що зрізається, мм^2;

k_c – питома сила різання, Н/мм^2.

Площа поперечного перерізу шару A визначається через глибину різання та подачу:

$$A = a_p \cdot f_z \cdot z_n \tag{4.2}$$

де a_p – глибина різання;

f_z – подача на зуб;

z_n – кількість зубців в контакті (середнє значення).

Питома сила різання k_c – це сила, яку необхідно прикласти для зрізання шару металу площею поперечного перерізу 1 мм^2:

$$k_c = k_{c1} \cdot {h_m}^{-m_c} \tag{4.3}$$

де k_{c1} – величина, що показує опір матеріалу при товщині стружки 1 мм;

h_m – середня товщина стружки;

m_c – коефіцієнт кривої. Для сталі 0,2-0,25.

Середня товщина стружки h_m:

$$h_m = f_z \cdot \sqrt{\frac{a_e}{D}} \tag{4.4}$$

де a_e – ширина контакту;

D – діаметр фрези.

4.3. Визначення сил різання при обробці запропонованим інструментом

Введення стружколомних канавок впливає на два ключові фактори:

- розподіл ширини різання;
- зміну довжини вершинної кромки різального леза зубця фрези.

Стандартна вершинна кромка, вершинна кромка розділена стружковою канавкою, що розміщена на осі симетрії зубця, та вершинна кромка із двома стружковими канавками характеризуються різною шириною контакту a_e.

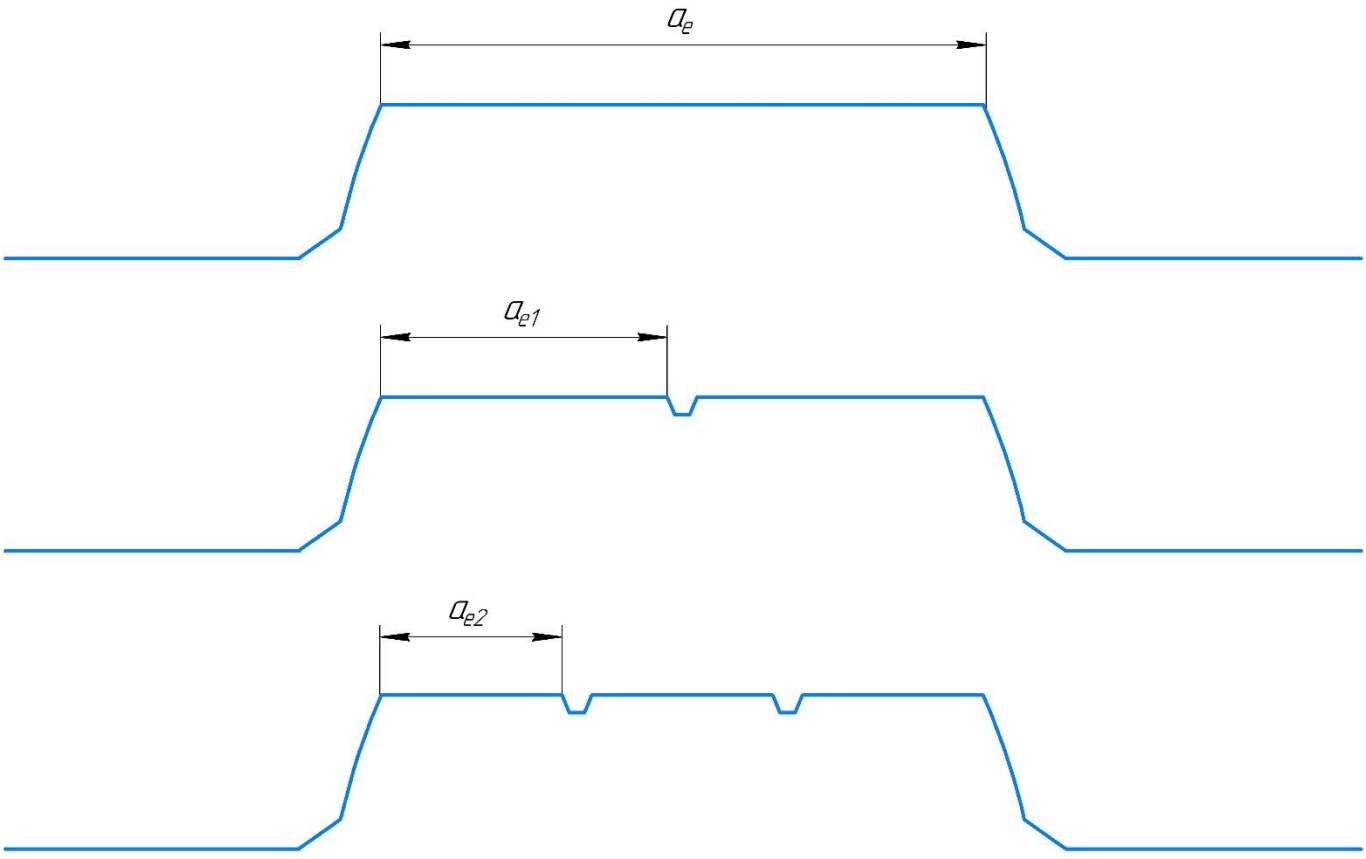


Рис. 4.4 Ширина контакту вершинної кромки

Вершинна кромка, розділена канавкою працює, як окремі різальні леза. Виконаємо розрахунок тангенціальної сили різання для всіх трьох типів вершинних кромок.

Розрахунок проводимо для стандартної вершинної кромки без канавки.

Середня товщина стружки:

$$h_m = 0{,}15 \cdot \sqrt{\frac{10{,}17}{110}} = 0{,}0754 \text{ мм}$$

Питома сила різання:

$$k_c = 1900 \cdot 0{,}0754^{-0{,}25} = 3625$$

Площа поперечного перерізу:

$$A = 2{,}6 \cdot 0{,}0754 = 0{,}196$$

Тангенціальна сила різання:

$$P_Z = 0{,}196 \cdot 3625 \cdot 1{,}8 = 1279$$

Розраховуємо тангенціальну силу різання для вершинної кромки, що розділена стружковою канавкою розміщеною на осі симетрії зубця.

Ширина контакту:

$$a_{e1} = \frac{a_e - 0{,}5}{2} = 4{,}835 \text{ мм}$$

Середня товщина стружки:

$$h_m = 0{,}15 \cdot \sqrt{\frac{4{,}835}{110}} = 0{,}052 \text{ мм}$$

Питома сила різання:

$$k_c = 1900 \cdot 0{,}052^{-0{,}25} = 3978$$

Площа поперечного перерізу:

$$A = 2{,}6 \cdot 0{,}052 = 0{,}1352$$

Тангенціальна сила різання:

$$P_Z = 0{,}1352 \cdot 3978 \cdot 1{,}8 = 968{,}3$$

Розраховуємо тангенціальну силу різання для вершинної кромки, що має дві стружкові канавки.

Ширина контакту:

$$a_{e2} = \frac{a_e - 0{,}5 \cdot 2}{3} = 3{,}057 \text{ мм}$$

Середня товщина стружки:

$$h_m = 0{,}15 \cdot \sqrt{\frac{3{,}057}{110}} = 0{,}0417 \text{ мм}$$

Питома сила різання:

$$k_c = 1900 \cdot 0{,}0417^{-0{,}25} = 4204{,}55$$

Площа поперечного перерізу:

$$A = 2{,}6 \cdot 0417 = 0{,}108$$

Тангенціальна сила різання:

$$P_Z = 0{,}108 \cdot 4204{,}55 \cdot 1{,}8 = 820{,}5$$

На основі наведених розрахунків видно, що наявність стружкоколомної канавки здатна знизити тангенціальну силу різання на 25%, а виконання двох стружколомних канавок на одній вершинній кромці - на 35%. Зниження тангенціальної сили має низку переваг:

- зменшення теплового зносу через зменшення тертя і, відповідно, нижчу температуру в зоні контакту;

- зменшення зносу через уповільнення абразивного та адгезійного зносу інструменту;

- мінімізація ризику викришування кромки та втомних поломок;

- відсутність «хвиль», тобто зниження шорсткості на бічних поверхнях шліця через зменшення або усунення автоколивань інструменту. Розділення зони різання на окремі ділянки змінює частотний спектр сил різання. Канавка діє як «демпфер», не дозволяючи коливанням увійти в резонанс;

- зниження навантаження на шпиндель, підшипники та коробку швидкостей верстату, що подовжує термін служби обладнання між ремонтами.

При звичайному фрезеруванні широка суцільна стружка (шириною 10 мм) створює ефект «клину» у вузькій западині шліца. Це спричиняє значний радіальний тиск, який намагається «відтиснути» фрезу від вала. Розділення стружки на дві або навіть на три вужчі частини різко знижує цей внутрішній тиск. Менша сила означає менші пружні деформації системи верстат-пристосування-інструмент-деталь.

Основна частина тепла (до 80%) йде у стружку. Широка стружка довше залишається в зоні різання, нагріваючи вал. Подрібнення стружки завдяки запропонованим канавкам забезпечує її краще відведення із зони оброки, що покращує відведення тепла. Велика, гаряча та жорстка стружка часто дряпає вже

оброблену бічну поверхню шліца під час виходу із зони різання. Дрібна стружка стає менш жорсткою і легко вимивається ЗОР. Менший контакт зрізаних частинок металу із обробленими поверхнями покращує якість обробки за рахунок зменшення шорсткість оброблених поверхонь. Також, зменшується термічне розширення вала під час обробки. Це запобігає похибкам взаємного розташування шліців, які виникають при нерівномірному нагріванні.

4.4. Математичне моделювання та теоретичне дослідження процесу фрезерування шліців

Ефективність впровадження нових конструктивних рішень у металорізальний інструмент потребує комплексного теоретичного обґрунтування. Основним показником якості процесу фрезерування шліцьових валів є точність формування профілю, яка безпосередньо залежить від силових параметрів взаємодії інструменту з деталлю. Метою даного пункту роботи є побудова математичної моделі, що описує вплив режимів різання та запропонованого геометричного вдосконалення фрези (наявності канавок для розділення стружки) на радіальну складову сили різання P_y. Зниження даної сили є важливим для зменшення пружних відтисків технологічної системи та забезпечення стабільного припуску під наступну операцію чистового фрезерування.

Для досягнення поставленої мети реалізовано методику повного факторного експерименту (ПФЕ 3^3). Використання трирівневого планування дозволяє не лише встановити лінійні залежності, а й виявити ефекти взаємодії факторів, а також можливу нелінійність процесу. В основу теоретичних розрахунків покладено фундаментальні принципи механіки деформівного твердого тіла та сучасні концепції питомої енергії різання (Specific Cutting Energy), що широко застосовуються в інженерній практиці провідними світовими виробниками інструменту, такими як Sandvik Coromant та Iscar.

Теоретичне моделювання базується на гіпотезі про дискретизацію зони стружкоутворення. Оскільки глибина запропонованих канавок ($h_k = 0{,}3$ мм)

перевищує максимальну товщину зрізу, відбувається повне розділення стружки на окремі сегменти. Це призводить до зниження роботи пластичної деформації та зменшення довжини контакту стружки з передньою поверхнею зуба, що інтегрально відображається у зниженні складових сил різання.

Отримана в результаті дослідження математична модель у вигляді полінома другого порядку дозволить прогнозувати точність обробки та встановити оптимальні режими фрезерування, що забезпечують максимальну продуктивність при дотриманні заданих технічних вимог до шліцьового з'єднання.

Для проведення розрахунків використано класичну емпіричну залежність для визначення головної складової сили різання — колової (тангенціальної) сили:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot {s_z}^y \cdot B^n \cdot z}{D^q \cdot n^w} \cdot K_{MP} \quad (4.5)$$

де D та z – діаметр та кількість зубців фрези відповідно;

t, s_z, B, n – глибина різання, подача на зуб фрези, ширина різання та частота обертання відповідно;

C_p, x, y, n, q, w, K_{MP} – коефіцієнти, що характеризують обробку та обираються з довідників.

Однак, з точки зору формування похибок обробки та пружних деформацій технологічної системи, визначальною є радіальна складова сили різання P_y. Саме вона діє перпендикулярно до осі заготовки, спричиняючи її відтиск та відхилення геометричних параметрів шліців. Згідно з рекомендаціями сучасних довідкових джерел та досліджень у галузі динаміки фрезерування [37], перехід від тангенціальної сили до радіальної здійснюється через коефіцієнт співвідношення сил:

$$P_y = P_z \cdot k_y \quad (4.6)$$

де k_y – коефіцієнт. Для заготовок зі сталі $k_y = 0{,}5 - 0{,}6$.

У якості основних факторів варіювання прийнято:

- швидкість різання (V);

- подачу на зуб (s_z);

- глибину конструктивної стружколомної канавки на різальній кромці (h_k).

Використання параметра h_k як змінного фактора дозволяє змоделювати ефект дискретизації зони стружкоутворення. Наукова гіпотеза полягає в тому, що розділення широкої стружки на окремі сегменти знижує питому енергію різання (Specific Cutting Energy) та зменшує сумарний опір деформуванню металу. Це призводить до пропорційного зниження як основної сили P_z, так і радіальної складової P_y, що безпосередньо покращує точність обробки.

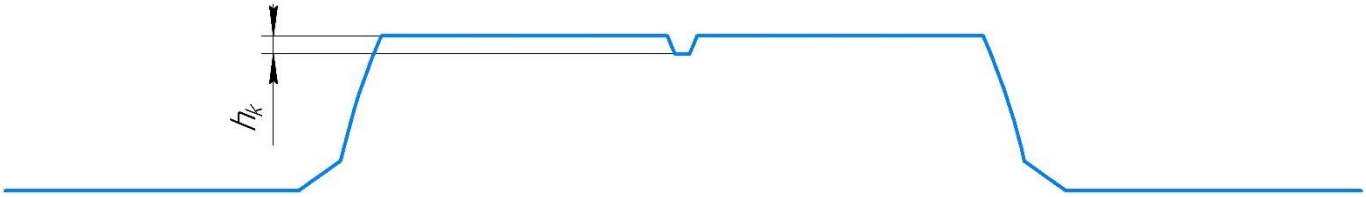


Рис. 4.5 Параметр глибини канавки

Для обгрунтування цієї гіпотези, стандартна формула сили різання P_y для запропонованої удосконаленої фрези доповнюється коефіцієнтом розділення стружки K_k. Завдяки канавкам стружка стає вужчою, що зменшує питому роботу деформації та силу тертя на передній поверхні зуба. Це призводить до зниження P_z, а відповідно і P_y на 15-25% порівняно зі стандартною фрезою на тих самих режимах (п. 4.3 даної роботи). Для теоретичного експерименту приймаємо значення коефіцієнта $K_k = 15\%$ для запропонованої стружколомної канавки.

Отримана в результаті моделювання математична залежність дозволить встановити оптимальні геометричні параметри інструменту та режими обробки, що забезпечать мінімальні пружні відтиски системи при максимальній продуктивності операції.

Межі варіювання параметрів:

- швидкість різання (V) 20-40 м/хв;

- подачу на зуб (s_z) 0,15-0,25 мм/зуб;

- глибину конструктивної стружколомної канавки на різальній кромці (h_k) 0-0,3 мм.

Матрицю планування теоретичного експерименту та результати представлено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Матриця планування та результати теоретичного експерименту

№	V (x1)	s_z (x2)	h_k (x3)	P_y, Н	Δ, мкм
1	20	0,15	0	424	13,7
2	20	0,15	0,15	390	12,6
3	20	0,15	0,30	360	11,7
4	20	0,20	0	524	17,0
5	20	0,20	0,15	483	15,6
6	20	0,20	0,30	446	14,4
7	20	0,25	0	619	20,1
8	20	0,25	0,15	571	18,5
9	20	0,25	0,30	527	17,1
10	30	0,15	0	412	13,7
11	30	0,15	0,15	379	12,6
12	30	0,15	0,30	350	11,7
13	30	0,20	0	510	17,0
14	30	0,20	0,15	469	15,6
15	30	0,20	0,30	433	14,4
16	30	0,25	0	602	20,1
17	30	0,25	0,15	554	18,5
18	30	0,25	0,30	512	17,1
19	40	0,15	0	399	13,7
20	40	0,15	0,15	367	12,6
21	40	0,15	0,30	340	11,7
22	40	0,20	0	495	17,0
23	40	0,20	0,15	455	15,6
24	40	0,20	0,30	420	14,4
25	40	0,25	0	583	20,1
26	40	0,25	0,15	537	18,5
27	40	0,25	0,30	497	17,1

На основі отриманих даних матриці планування за допомогою методу найменших квадратів було проведено статистичну обробку результатів та визначено коефіцієнти регресійного рівняння.

Математична модель рівняння для розрахунку радіальної сили має вигляд:

$$P_y = 469 - 13x_1 + 95x_2 - 51x_3 - 15x_2x_3 + 8x_3^2 \quad (4.7)$$

На основі аналізу вищенаведеного рівняння можна зробити наступні висновки:

- середнє значення сили в центрі плану рівне 469Н;

- збільшення швидкості позитивно впливає на радіальну силу ($-13x_1$);

- подача має найбільший вплив ($+95x_2$). При збільшенні подачі на один крок (0,05 мм/зуб) сила зростає в середньому на 95Н;

- збільшення глибини канавки стабільно знижує силу різання ($-51x_3$);

- ефект взаємодії ($-15x_2x_3$) свідчить про те, що стужкоподрібнююча канавка працює найбільш ефективно саме при більшій подачі;

- квадратичний ефект $8x_3^2$ показує легку нелінійність процесу: перехід від $h_k = 0$ до $h_k = 15$ мм дає трохи більший приріст ефективності, ніж подальше поглиблення від $h_k = 15$ мм до $h_k = 30$ мм.

Отже, найбільш значущими факторами, які найбільше впливають на радіальну силу різання є подача та стужкоподрібнююча канавка. Параметр швидкості має менш значний вплив на радіальну складову сили різання.

На рисунку 4.6 представлено поверхню відгуку впливу подачі та глибини канавки на радіальну силу різання. Аналіз отриманої поверхні відгуку дозволяє встановити, що радіальна сила P_y є найбільш чутливою до зміни подачі s_z. Однак, застосування розробленої конструкції фрези з канавками $h_k = 15$ мм забезпечує стабільне зниження силового навантаження на всьому діапазоні режимів різання. Максимальний ефект від використання канавок спостерігається при форсованих подачах (0,25 мм/зуб), що дозволяє знизити силу на ~15%.

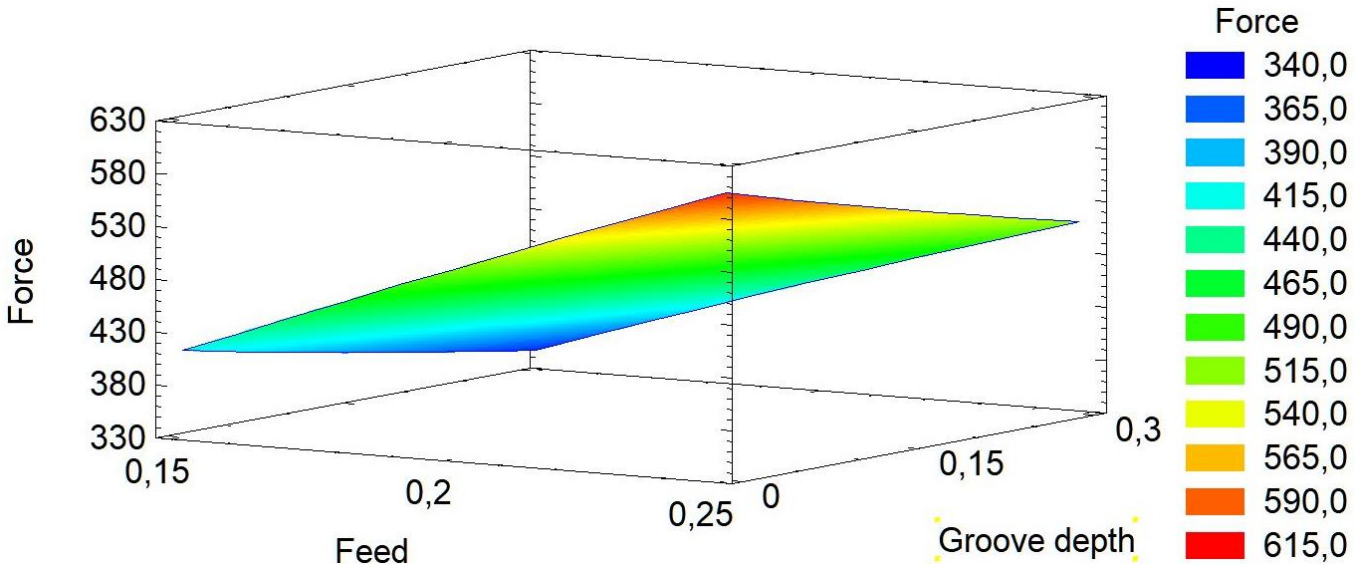


Рис. 4.6 Поверхня відгуку впливу подачі та глибини канавки на радіальну складову силу різання

Проаналізуємо отримані експериментальним шляхом значення похибки обробки Δ від пружних деформацій. Стандартна фреза $h_k = 0$ на максимальній подачі $s_z = 0{,}25$ мм/зуб показує радіальну силу 602 Н та похибку Δ=20 мкм. Фреза із канавкою $h_k = 0{,}3$ мм на тих самих режимах різання демонструє радіальну силу в межах 512 Н, та похибку Δ=17 мкм.

Математична модель рівняння похибки має вигляд:

$$\Delta = 15{,}6 - 0{,}43x_1 + 3{,}17x_2 - 1{,}7x_3 - 0{,}5x_2x_3 \qquad (4.8)$$

Перехід від стандартної фрези ($h_k = 0$) до фрези з канавкою ($h_k = 0{,}3$ мм) дозволяє знизити похибку на 3,4 мкм. На високих подачах (продуктивних режимах) вдосконалена фреза дає більший відносний приріст точності, ніж на малих.

Аналіз коефіцієнтів рівняння регресії дозволив встановити, що впровадження конструктивних канавок забезпечує стабільне зниження похибки Δ на всьому діапазоні дослідження. Порівняння коефіцієнтів b_2 та b_3 свідчить про те, що негативний вплив збільшення подачі на точність обробки може бути частково компенсований (на 50-60%) за рахунок застосування розробленої геометрії інструменту.

Використання фактора h_k на трьох рівнях (0 мм, 0,15 мм та 0,3 мм) дозволило встановити оптимальну геометрію канавки, яка забезпечує мінімальні пружні

відтиски. Це гарантує стабільний припуск під наступне чистове фрезерування шліців, виключаючи появу припікань та нерівномірної твердості поверхні.

Математичне моделювання процесу фрезерування шліців у сталі 40Х показало, що розроблена конструкція фрези з канавками $h_k = 0{,}3$ мм є статистично значущим фактором зниження силового навантаження. Отримані рівняння регресії дозволяють прогнозувати точність обробки в діапазоні подач 0,15-0,25 мм/зуб та оптимізувати режими різання для досягнення мінімальних похибок під наступну чистову обробку.

4.5. Висновки

Спроєктовано форму стружки, що утворюється при фрезеруванні шліців трьома різними варіантами геометрії вершинної кромки зуба чорнової черв'ячної шліцьової фрези.

Визначено тангенціальну складову сили різання для трьох варіантів геометрії вершинної кромки зубця інструменту залежно від товщини стружки. З огляду на те, що вершинна кромка, яка розділена канавкою працює, як окремі різальні леза, встановлено, що наявність стужкоколомної канавки знижує тангенціальну силу різання на 25%, а виконання двох стружколосних канавок на одній вершинній кромці - на 35%.

Реалізовано повний факторний експеримент типу 3^3, що дозволило комплексно оцінити вплив режимів різання (швидкості V та подачі s_z) та геометричних параметрів розробленої фрези (глибини канавки h_k) на силові характеристики процесу фрезерування шліців у сталі 40Х.

Встановлено математичну залежність радіальної сили різання P_y від обраних факторів у вигляді полінома другого порядку. Аналіз коефіцієнтів рівняння підтверджує, що впровадження канавок на вершинній кромці зуба є вагомим чинником зниження силового навантаження. Знак «мінус» при значенні коефіцієнта x_3 та ефекті взаємодії x_2x_3 доводить ефективність запропонованої конструкції, особливо на форсованих режимах подачі.

Теоретично обґрунтовано зниження сили P_y на 15% (з 602 Н до 512 Н) при використанні фрези з глибиною канавок $h_k = 0{,}3$ мм. Це пояснюється дискретизацією (розділенням) стружки, що призводить до зменшення роботи пластичної деформації та зниження коефіцієнта тертя на передній поверхні зуба інструменту.

Проведено оцінку точності обробки, яка показала, що за рахунок зниження радіальної сили пружні відтиски технологічної системи зменшуються в середньому на 2,5–2,7 мкм. Це забезпечує більш стабільний припуск під наступну обробку, мінімізуючи ризик виникнення припікань та нерівномірності твердості на поверхні шліців. Побудована поверхня відгуку наочно демонструє область оптимальних режимів обробки. Встановлено, що застосування модифікованої фрези дозволяє збільшити подачу на 20-25% при збереженні того ж рівня точності, що і у стандартного інструменту, що свідчить про потенційне підвищення продуктивності операції.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЧЕРВ‘ЯЧНОЇ ШЛІЦЬОВОЇ ФРЕЗИ

5.1. Загальні вихідні дані

Для виявлення техніко-економічних переваг вдосконаленої конструкції черв’ячної шліцьової фрези і визначення економічного ефекту від її впровадження у виробництво в якості бази для порівняння приймемо спосіб обробки шліцьового валу на зубофрезерному верстаті стандартною черв’ячною фрезою.

Виготовлення удосконаленої фрези потребує додаткової операції шліфування стружкоподільних канавок алмазним шліфувальним кругом. Проте витрати на її виконання компенсуються за рахунок економії матеріальних витрат. Адже, порівняно зі стандартною, нова фреза має меншу масу – 4,192 кг, у той час, як маса стандартної фрези становить 4,3 кг. Таким чином, зниження матеріаломісткості виготовлення нового інструменту дозволить значно здешевити його вартість.

Також перевагами конструкції проектної фрези є підвищення стійкості інструменту і точності обробки, що досягається завдяки наявності стружкоподільних канавок, які забезпечують покращення умов відведення стружки. Для досягнення такого ступеня точності у базовому варіанті необхідно застосовувати додаткову операцію шліфування на шліцешліфувальному верстаті мод. 3В451.

Розрахуємо річну потребу в інструменті за формулою:

$$K_i = \frac{N_д \cdot T_{нор} \cdot \gamma \cdot \kappa_{вт}}{t_e \cdot (1+p)}, \qquad (5.1)$$

Потреба у базовому інструменті:

$$K_i^{б} = \frac{1000 \cdot 15,0 \cdot 0,45 \cdot 1,0}{15 \cdot (24+1)} = 18 \text{ шт.}$$

Потреба у фрезах в проектному варіанті:

$$K_i^{пр} = \frac{1000 \cdot 15,0 \cdot 0,45 \cdot 1,0}{60 \cdot (24+1)} = 5 \text{ шт.}$$

Загальні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів зведено до табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Загальні вихідні техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показник	Одиниця	Варіанти	
			базовий	проект
1.	Умовна програма виробництва деталей	шт./рік	1000	1000
2.	Потреба в обладнанні	шт./рік	2	1
3.	Потреба в інструменті	шт./рік	18	5
4.	Штучний час обробки деталі на операції: - зубофрезерування - шліфування	 хв. хв	 15,0 11,2	 15,0 -
5.	Площа, яку займає обладнання (шліцешліфувальний верстат)	$м^2$	4,42	-
6.	Встановлена потужність електродвигунів	кВт	3,0	-
7.	Категорія ремонтної складності механічної/електричної частин верстата	УРО	15/10	-
8.	Розряд роботи верстатника	розряд	4	4
9.	Оптова ціна: - обладнання - черв‘ячної фрези - шліфувального круга	 грн. грн. грн.	 250000 14750 6320	 - х -

5.2. Визначення витрат на підготовку виробництва

5.2.1 Витрати на проектування черв‘ячної фрези визначаємо за формулою:

$$B_{пк} = H_{ор} \cdot T_{кон} \cdot З^{к}_{сг} \cdot \left(1 + \frac{к_{д}}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_{с}}{100}\right) + H_{в}, \qquad (5.2)$$

де $H_{ор}$ – кількість найменувань оригінальних деталей, які входять до конструкції інструменту, шт.;

$T_{кон}$ – сумарна кількість годин на розробку усіх видів конструкторської документації, яка в середньому припадає на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$З^{к}_{сг}$ – середньогодинна заробітна плата конструктора, грн./год.;

$к_{д}$ – додаткова заробітна плата конструктора, %;

$B_{с}$ – відрахування на соціальні потреби (єдиний соціальний внесок – ЄСВ) від заробітної плати конструкторів, %;

$H_в$ – накладні витрати, грн. (визначаються в процентах від основної заробітної плати конструктора).

$$\text{В}_{\text{пк}} = 1 \cdot 20 \cdot 102,56 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 20 \cdot 102,56 \cdot \frac{45}{100} = 3675,75 \text{ грн.}$$

5.2.2 Витрати на технологічну підготовку виробництва інструменту:

$$B_m = H_{op} \cdot T_{mex} \cdot З_{сг}^m \cdot \left(1 + \frac{к_д}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{B_c}{100}\right) + H_в, \quad (5.3)$$

де T_{mex} – сумарна трудомісткість технологічних робіт, які припадають на одне найменування оригінальних деталей, нормо-год.;

$З_{сг}^m$ – середньогодинна заробітна плата технолога, грн./год.

$$\text{В}_{\text{т}} = 1 \cdot 22 \cdot 101,41 \cdot \left(1 + \frac{10}{100}\right) \cdot \left(1 + \frac{22,0}{100}\right) + 1 \cdot 22 \cdot 101,41 \cdot \frac{60}{100} = 4332,64 \text{ грн.}$$

5.3. Визначення собівартості та оптової ціни інструменту

5.3.1 Після визначення трудомісткості виготовлення проектної фрези (на основі аналізу технології виготовлення базової стандартної фрези) визначимо:

а) основну заробітну плату виробничих робітників:

$$З_{\text{ор}} = \sum_{i=1}^{n} C_{\text{г}_\text{і}} \cdot T_{\text{і}} \quad (5.4)$$

де n – кількість i-тих видів робіт;

$C_{\text{г}_\text{і}}$ – середньогодинна тарифна ставка робітників, які виконують i-й вид робіт з урахуванням умов праці, грн.

Так, основна заробітна плата виробничих робітників на механічних роботах:

$$З_{\text{ор}} = 8,9 \cdot 92,015 = 818,93 \text{ грн.}$$

б) витрати на утримання та експлуатацію обладнання:

$$B_{\text{о}} = \sum_{i=1}^{n} З_{\text{ор}_\text{і}} \cdot \frac{П_{\text{рр}_\text{і}}}{100} \quad (5.5)$$

де $П_{рр_i}$ – процент витрат на утримання та експлуатацію обладнання по кожному *i*-му виду робіт за заводською калькуляцією.

в) цехові витрати:

$$B_{цех} = \sum_{i=1}^{n} З_{ор_i} \cdot \frac{П_{цр_i}}{100}, \quad (5.6)$$

де $П_{цр}$ – процент цехових витрат по кожному *i*-му виду робіт за заводською калькуляцією.

Для механічних робіт:

$$B_{о} = 818,93 \cdot \frac{280}{100} = 2293,01 \text{ грн.};$$

$$B_{цех} = 818,93 \cdot \frac{232}{100} = 1899,93 \text{ грн.}$$

Аналогічно виконуємо розрахунки даних статей на інших роботах, результати заносимо до табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Трудомісткість виготовлення та окремі види витрат на виготовлення фрези

Види робіт	Трудомісткість робіт н-год	Середній розряд	Середньогодинна тарифна ставка робітників, грн/год	Основна заробітна плата робітників $З_{ор}$, грн.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання, $B_о$, грн.		Загально-цехові витрати $К_{цех}$, грн.	
					%	грн.	%	грн.
Заготівельні	1,5	3	92,015	138,02	245	338,16	132	182,19
Механічні	8,9	4	92,015	818,93	280	2293,01	232	1899,93
Термічні	1,8	3	102,716	184,89	285	526,93	250	462,22
Всього	12,2	-	-	1141,84	-	3158,10	-	2544,34

Повну собівартість фрези розраховуємо за статтями витрат за допомогою отриманих на підприємстві кошторисних та звітних калькуляцій базової конструкції за формулою:

$$C_{пов} = M_{о} + M_{д} + E_{тех} + T_{р} + П_{тех} + З_{ор} + З_{др} + B_{с} + З_{цп} + B_{о} + B_{цех} + B_{зав} + B_{ін} + B_{пв}, \quad (5.7)$$

де $M_{о}$ – витрати на основні матеріали, грн. Розраховуємо за формулою:

$$B_{мо} = B_{чор} \cdot Ц_{м} - B_{відх} \cdot Ц_{відх}, \quad (5.7)$$

де $B_{чор}$ – чорнова маса деталі, кг;

$Ц_{м}$, $Ц_{відх}$ – відповідно ціна матеріалів (сталь Р6М5) та відходів, грн./кг;

$$B_{мо} = 5,3 \cdot 450,0 - (5,3 - 4,192) \cdot 120 = 2252,04 \text{ грн.}$$

$M_{д}$ – витрати на допоміжні матеріали, грн.;

$T_{р}$ – транспортно-заготівельні витрати, грн.;

$E_{тех}$, $П_{тех}$ – енергія та паливо на технологічні цілі, грн.;

$З_{др}$ – допоміжна заробітна плата виробничих робітників, грн.;

$B_{с}$ – єдиний соціальний внесок (ЄСВ), грн.;

$З_{цп}$ – відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення та інші спеціальні витрати, грн.;

$В_{зав}$ – загальнозаводські витрати, грн.;

$B_{ін}$ – інші виробничі витрати, грн.;

$B_{пв}$ – позавиробничі витрати, грн.

Розрахунок собівартості інструменту зводимо до табл. 5.3.

5.3.2 Оптову ціну інструменту розраховуємо за формулою:

$$Ц_{опт} = C_{пов} + П_{н}, \quad (5.8)$$

де $П_{н}$ – нормативний прибуток, грн.

$$П_{н} = \frac{P_{с} \cdot C_{пов}}{100}, \quad (5.9)$$

$P_{с}$ – встановлений рівень рентабельності виробу, %.

$$П_{н} = \frac{20 \cdot 13185,0}{100} = 2637,0 \text{ грн.}$$

$$Ц_{опт} = 13185,00 + 2637,00 = 15822,0 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.3

Повна собівартість та оптова ціна черв‘ячно-контурної фрези

№ з/п	Стаття калькуляції	Коротке позначення	Метод розрахунку, джерело інформації	Результат, сума, грн.
1.	Матеріали основні за відрахуванням зворотних відходів	$М_о$		2252,04
2.	Матеріали допоміжні	$М_д$	4,0% від $М_о$	95,40
3.	Транспортно-заготівельні витрати	$Т_в$	5% від ($М_о + М_д$)	99,22
3.	Паливо та енергія на технологічні цілі	$П_{тех}$, $Е_{тех}$	59,8% від $З_{ор}$	682,82
5.	Всього матеріальні витрати			3129,48
6.	Основна заробітна плата виробничих робітників	$З_{ор}$	табл. 4.2	1141,84
7.	Додаткова заробітна плата виробничих робітників	$З_{др}$	10% від $З_{ор}$	114,18
8.	Відрахування на соціальні потреби (ЄСВ)	$В_с$	22% від ($З_{ор} + З_{др}$)	276,33
9.	Відшкодування зносу інструменту та пристосувань цільового призначення	$З_{уп}$	12,2% від $З_{ор}$	139,31
10.	Витрати на утримання та експлуатацію обладнання	$В_о$	табл. 4.2	3158,10
11.	Цехові витрати	$К_{цех}$	табл. 4.2	2544,34
12.	Загальнозаводські витрати	$К_{зав}$	220% від $З_{ор}$	2512,06
13.	Інші виробничі витрати	$В_{ін}$	3,4% від $З_{ор}$	38,82
14.	Виробнича собівартість	$С_{вир}$	Σ(7 ÷ 15)	13054,46
15.	Позавиробничі витрати	$К_{пв}$	1% від $С_{вир}$	130,54
16.	Повна собівартість	$С_{пов}$	$С_{вир}+К_{пв}$	13185,00
17.	Прибуток	$П_н$	20% від $С_{пов}$	2637,00
18.	Оптова ціна підприємства	$Ц$	$С_{пов}+П_н$	15822,00

5.4. Визначення експлуатаційних витрат (собівартості обробки)

Оскільки час обробки шліців у порівнюваних варіантах співпадає, розрахунок експлуатаційних витрат виконуємо для шліцешліфувальної операції у базовому варіанті, а також витрат на експлуатацію черв‘ячної фрези в обох порівнюваних варіантах за формулою:

$$B_{\text{е}} = \sum_{i=1}^{m} B_{\text{і}}\,, \tag{5.10}$$

де $B_м$ – витрати на основні матеріали, грн. (не розраховуються, оскільки співпадають у базовому та проектному варіантах);

$B_з$ – витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальні потреби основних робітників, грн.;

$B_е$ – витрати на силову електроенергію, грн.;

$B_{мд}$ – витрати на допоміжні матеріали. грн.;

$B_р$ – витрати на ремонт обладнання, грн.;

$B_п$ – витрати на утримання приміщення, грн.;

$B_{ір}$ – витрати на ріжучий інструмент, грн.;

$B_а$ – витрати на амортизацію обладнання, грн.

Витрати на заробітну плату основну, додаткову та відрахування на соціальні потреби:

$$B_{\text{з}} = C_{\text{г}} \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot \left(1 + K_{\text{д}}\right) \cdot \left(1 + K_{\text{с}}\right), \tag{5.10}$$

де $T_{\text{нор}}$ – час обробки деталі, хв.;

$K_{\text{д}}$, $K_{\text{с}}$ – коефіцієнти додаткової зарплати та відрахувань на соціальне страхування відповідно.

$$B_{зп}^{б} = 92,015 \cdot \frac{11,2}{60} \cdot \left(1 + 0,1\right) \cdot \left(1 + 0,22\right) = 23,050 \text{ грн.}$$

Витрати на електроенергію силову:

$$B_{\text{е}} = \frac{N_{\text{в}} \cdot K_{\text{о}} \cdot K_{\text{N}} \cdot K_{\text{д}}}{\eta_{\text{м}} \cdot \eta_{\text{с}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60} \cdot Ц_{\text{ел}}\,, \tag{5.11}$$

де $N_{\text{в}}$ – встановлена потужність електродвигунів силового вузла, кВт;

$K_{\text{о}}$ – коефіцієнт одночасної роботи моторів ($K_{\text{о}}$=0,65...0,8);

K_N – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів за потужністю (для свердлильних верстатів K_N=0,5...0,6, для пресів K_N=0,4...0,5);

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує завантаження електродвигунів верстата за часом($K_{\text{д}}$=0,3...0,5);

$\eta_{\text{с}}$ – середній коефіцієнт корисної дії електродвигунів($\eta_{\text{с}}$=0,86...0,9);

$\eta_м$ – коефіцієнт, що враховує втрати електроенергії в мережі підприємства ($\eta_м$=0,92...0,96);

$Ц_{ел}$ – ціна 1 кВт-год силової електроенергії, грн.

$$B_{ел}^{б} = \frac{3,0 \cdot 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,5}{0,88 \cdot 0,95} \cdot \frac{11,2}{60} \cdot 18,1 = 3,395 \text{ грн.}$$

Витрати на допоміжні матеріали:

$$B_{мв} = \frac{M_{гв} \cdot R_м \cdot T_{нор}}{60 \cdot 100} \cdot K_п, \qquad (5.12)$$

де $M_{гв}$ – годинні витрати на допоміжні матеріали на 1 УРО механічної частини всіх типів верстатів, коп.;

$R_м$ – категорія складності ремонту механічної частини верстата, УРО;

$K_п$ – коефіцієнт, який враховує тип виробництва (для серійного $K_п$ = 1,0).

$$B_{дм}^{б} = \frac{79,5 \cdot 15,0 \cdot 11,2}{60 \cdot 100} \cdot 1,0 = 2,226 \text{ грн.}$$

Витрати на ремонт обладнання:

$$B_р = \frac{R_м \cdot Г_{вм} + R_е \cdot Г_{ве}}{F_{дрм}} \cdot \frac{T_{нор}}{60}, \qquad (5.13)$$

де $Г_{вм}$, $Г_{ве}$ – відповідні річні витрати на всі види ремонту на 1 УРО механічної та електричної частин верстата, грн./рік;

$F_{дрм}$ – дійсний річний фонд часу роботи верстата (при двозмінному режимі роботи для серійного виробництва – 3980 год.).

$$B_р^{б} = \frac{15 \cdot 980 + 10 \cdot 790}{3680} \cdot \frac{11,2}{60} = 1,146 \text{ грн.}$$

Витрати на експлуатацію універсального ріжучого інструменту:

$$B_{ір} = \frac{(S_и + p \cdot S_{пер}) \cdot \gamma \cdot T_{нор}}{t_е (p+1)} K_{вт}, \qquad (5.14)$$

де $S_и$ – первісна вартість ріжучого інструменту, грн.;

p – кількість переточувань ріжучого інструменту до повного зносу по лімітуючому розміру ріжучої грані;

$S_{пер}$ – вартість однієї переточувань, грн.;

γ – питоме значення машинного часу роботи обладнання в загальному варіанті його роботи;

t_e – економічна стійкість інструменту, хв.;

$K_{вт}$ – коефіцієнт обліку втрат інструменту.

$$B_{ip}^{б} = \frac{(14750,0 + 24 \cdot 25,9) \cdot 0,45 \cdot 15,0}{15 \cdot (1 + 24)} \cdot 1,0 + \frac{(6320,0 + 24 \cdot 15,9) \cdot 0,45 \cdot 15,0}{30 \cdot (1 + 24)} \cdot 1,08 = 341,829 \text{ грн};$$

$$B_{ip}^{пр} = \frac{(15822,0 + 24 \cdot 26,7) \cdot 0,45 \cdot 15,0}{60 \cdot (1 + 24)} \cdot 1,0 = 74,083 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання приміщення:

$$B_{\text{уп}} = \frac{F_{\text{о}} \cdot K_{\text{д}} \cdot C}{F_{\text{дрм}}} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \qquad (5.15)$$

де $F_{\text{о}}$ – виробнича площа, яку займає одиниця обладнання, м^2;

$K_{\text{д}}$ – коефіцієнт, який враховує додаткову площу (на проходи, проїзди, побутові та службові приміщення) [1];

C – річні витрати, пов'язані з утриманням 1 м^2 виробничого приміщення, грн./м^2.

$$B_{\text{уп}}^{б} = \frac{4,42 \cdot 3,0 \cdot 11,2}{3680 \cdot 60} \cdot 788 = 0,530 \text{ грн.}$$

Витрати на амортизацію верстата:

$$B_{\text{а}} = \frac{Ф_{\text{бал}} \cdot H_{\text{а}}}{F_{\text{дрм}} \cdot 100} \cdot \frac{T_{\text{нор}}}{60}, \qquad (5.16)$$

де $H_{\text{а}}$ – норма амортизації, %;

$Ф_{\text{бал}}$ – балансова вартість верстата, грн.

Балансову вартість верстатів знайдемо за формулою:

$$Ф_{\text{бал}} = Ц_{\text{опт}} \cdot \left(1 + K_{\text{тр}} + K_{\text{м}} + K_{\Ф}\right), \qquad (5.17)$$

де $Ц_{\text{опт}}$ – оптова ціна верстата, грн.;

$K_{\text{тр}}$, $K_{\text{м}}$, $K_{\text{ф}}$ – відповідно коефіцієнти, які враховують транспортування (0,05...0,1), монтаж (0,04...0,06) та влаштування фундаменту (0,02...0,08).

$$Ф_{\text{бал}} = 250000 \cdot \left(1 + 0,08 + 0,06 + 0,05\right) = 297500 \text{ грн.},$$

$$B_{\text{а}}^{б} = \frac{297500 \cdot 20 \cdot 11,2}{3680 \cdot 60 \cdot 100} = 3,018 \text{ грн.}$$

Результати розрахунків зводимо до табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Експлуатаційні витрати (собівартість обробки)

№ п/п	Експлуатаційні витрати	Умовне позначення	Варіанти	
			Базовий	Проектний
1.	Заробітна плата основна, додаткова з відрахуваннями у соціальні фонди	$B_з$	23,050	-
2.	Силова електроенергія	$B_{ел}$	3,395	-
3.	Допоміжні матеріали	$B_{дм}$	2,226	-
4.	Ремонт обладнання	$B_р$	1,146	-
5.	Універсальний ріжучий інструмент	$B_{ір}$	341,829	74,083
6.	Утримання приміщення	$B_{уп}$	0,530	-
7.	Амортизація обладнання	$B_а$	3,018	-
Загальна сума		$B_е$	375,094	74,083

5.5. Розрахунок показників економічної ефективності

5.5.1 Річний економічний ефект, який отримує виробник черв‘ячної шліцьової фрези розраховуємо за формулою:

$$E_{рв} = \left(Ц_{опт.пр} - C_{пов.пр}\right) \cdot П_в - E_н \cdot K_в, \qquad (5.18)$$

де $Ц_{опт.пр}$, $C_{пов.пр}$ – відповідно оптова ціна та повна собівартість проектного інструменту, грн.;

$П_в$ – програма виробництва інструменту, шт./рік;

$E_н$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

$K_в$ – додаткові капітальні витрати у виробника, грн.

$$K_в = B_{пк} + B_т = 3675,75 + 4332,64 = 8008,39 \text{ грн.}, \qquad (5.19)$$

де $B_{пк}$, $B_т$ – відповідно, вартість конструкторської та технологічної підготовки виробництва, грн.

$$\text{Е}_{\text{рв}} = \left(15822,0 - 13185,0\right) \cdot 5 - 0,16 \cdot 8008,39 = 12000 \text{ грн.}$$

4.5.2 Річний економічний ефект, який отримує підприємство-споживач, розрахуємо за формулою:

$$E_{р.сп} = \left(B_e^{б} - B_e^{пр}\right) \cdot N_д - E_н \cdot K_{сп}, \quad (5.20)$$

де $K_{сп}$ – додаткові капітальні витрати у споживача, грн.

$$K_{сп} = Ц_i^{пр} \cdot K_i^{пр} - (Ц_i^{б} \cdot K_i^{б} + Ф_{бал}^{б} \cdot Q_б), \quad (5.21)$$

де $Ц_i^{пр}, Ц_i^{б}$ – відповідно оптова ціна проєктного і базового інструменту, грн;

$K_i^{пр}, K_i^{б}$ – відповідно потреба у проєктному і базовому інструменті, шт.;

$Ф_{бал}^{б}, Q_б$ – відповідно балансова вартість та кількість верстатів на операції шліфування у базовому варіанті, грн.;

$$К_{сп} = 15822 \cdot 5 - (14750 \cdot 18 + 6320 \cdot 8 + 297500) = -534450 \text{ грн.}$$

$$Е_{р.сп} = (375{,}194 - 74{,}083) \cdot 1000 - 0{,}16 \cdot (-534450) = 386600 \text{ грн.}$$

5.5.3 Строк окупності додаткових капітальних вкладень у виробника черв‘ячної фрези:

$$Т_{ок.в} = \frac{К_в}{(Ц_{опт.пр} - С_{пов.пр}) \cdot П_в} = \frac{8008{,}39}{(15822{,}0 - 13185{,}0) \cdot 5} = 0{,}61 \text{ р.} = 7{,}3 \text{ міс.} \quad (5.22)$$

У підсумку складаємо зведену таблицю техніко-економічних показників проекту (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Підсумкові техніко-економічні показники базового та проектного варіантів

№ п/п	Показники	Одиниця	Базовий варіант	Проект	Зміна, % (+,-)
1	2	3	4	5	6
1.	Потреба в інструменті: - черв‘ячних фрезах - шліфувальних кругів	 шт./рік шт./рік	 18 8	 5 -	 -72,2
2.	Програма виробництва деталей	шт./рік	1000	1000	–
3.	Штучний час обробки деталі всього, у тому числі на операції: - фрезерування - шліфування	 хв. хв.	26,2 15,0 11,2	15,0 15,0 -	-42,7
4.	Потреба в обладнанні	шт./рік	2	1	–50,0
5.	Оптова ціна обладнання	грн.	250000	250000	–

Продовження табл. 5.5

1	2	3	4	5	6
6.	Повна собівартість фрези	грн.	–	13185,0	–
7.	Оптова ціна інструменту - черв‘ячної фрези - шліфувальної фрези	 грн. грн.	 14750 6320	 15822 -	 +7,3
8.	Собівартість одиниці обробки	грн.	375,194	74,083	-80,3
9.	Капітальні витрати на підготовку виробництва	грн.	–	8008,4	–
10.	Річний економічний ефект: - у виробника - у споживача	 грн. грн.	 – –	 12000 386600	 – –
11	Строк окупності додаткових капітальних витрат у виробника	міс.	–	7,3	–

5.6. Висновки

З проведених розрахунків видно, що річний економічний ефект удосконаленої конструкції черв’ячної шліцьової фрези: для виробника 12000 грн, для споживача 386600 грн. Термін окупності додаткових капітальних вкладень складає 7,3 місяці.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі на тему: «Підвищення точності обробки шліцьових поверхонь методом черв’ячного фрезерування» виконано дослідження шляхів підвищення точності обробки шліцьових поверхонь та зосереджено увагу на конструктивних елементах та геометричних параметрах шліцьових черв’ячних фрез, а також на пружних деформаціях технологічної системи ВІПД та зносі зубців інструменту.

Виконано аналіз відомих конструкцій черв’ячних фрез, які завдяки своїм конструктивним особливостям здатні покращити точність обробки поверхонь шліців методом обкатки.

Виконано аналіз креслення шліцьової поверхні деталі. Розроблено маршрут обробки шліцьової поверхні. Розраховано та спроєктовано черв’ячну шліцьову фрезу для заданої деталі. Визначено шляхи підвищення точності обробки шліцьової поверхні деталі та запропоновано удосконалену конструкцію шліцьової черв’ячної фрези.

Шляхом проведення теоретичного експерименту, виконано оцінку точності обробки запропонованою удосконаленою конструкцією шліцьової черв’ячної фрези.

Виконано необхідні економічні розрахунки.

Всі прийняті технічні рішення підтверджено відповідними розрахунками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Економічні та організаційно-планові розрахунки при обґрунтуванні доцільності розробки нових виробів: метод. вказівки для виконання економічної частини дипломних проектів для студ. спец. 131 «Прикладна механіка» та 133 «Галузеве машинобудування» //Укладачі: Журило І.В., Полтавець М.М. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. 40 с.
2. Ковальов В.Д. Деформації і рушення зрізуємого шару при швидкісному осцилюючому зубофрезуванні загартованих циліндричних зубчастих коліс на основі квантовомеханічного положення / Ковальов В.Д., Майборода В.С., Охріменко О.А., Пермяков О.А., Клочко О.О., Шаповалов М.В., Манохін А.С., Федоренко В.С. //. – С. 110-112.
3. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий світ-2000, 2011. – 422 с.
4. Пат. на винахід 32795 Україна, B23F21/00. Черв’ячна фреза / І.Є. Грицай – № 98042013; заявл. 22.04.1998; опубл. 15.02.2001, Бюл. № 1/2001. – 2 с. : іл.
5. Пат. на винахід 91188 Україна, B23F21/00. Збірна черв'ячна фреза / Є.В. Скочко – № a200609944; заявл. 18.09.2006; опубл. 12.07.2010, Бюл. № 13, 2010. – 6 с. : іл.
6. Пат. на корисну модель 10030 Україна, B23F21/00. Черв'ячна фреза для нарізання зубчатих коліс/ Н.С. Равська– № u200505267; заявл. 02.06.2005; опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10/2005. – 2 с. : іл.
7. Пат. на корисну модель 12828 Україна, B23F21/16. / Б.В. Лупкін, О.В. Мамлюк, Н.С. Равська, О.А. Охрименко, О.В. Дирда – № a200508965; заявл. 22.09.2005; опубл. 15.03.2006, Бюл. № 3, 2006. – 2 с. : іл.
8. Пат. на корисну модель 25515 Україна, B23F21/00. Черв’ячна фреза / І.Є. Грицай – № 97031039; заявл. 11.03.1997; опубл. 30.10.1998, Бюл. № 5/1998. – 1 с. : іл.
9. Пат. на корисну модель 25574 Україна, B23F21/00. Черв’ячна фреза / І.Є. Грицай – № 97031462; заявл. 11.03.1997; опубл. 30.10.1998, Бюл. № 6/1998. – 2 с. : іл.

10. Пат. на корисну модель 126487 Україна, B23F21/00, B23F 21/16. Черв'ячна фреза для обробки черв'ячних коліс / М.О. Ковришкін, Ю.В. Андреєв – № u 2018 00010; заявл. 02.01.2018; опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12/2018. – 7 с. : іл.
11. Петренко К.В., Скоробогатова Н.Є. Економіка і організація виробництва: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за технічними та інженерними спеціальностями. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 177 с.
12. Проектування різальних інструментів. Фрези [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавр за освіт. програмою “Конструювання та дизайн машин” спец. 131 – Прикладна механіка/ В. І. Солодкий : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2-ге вид. перероблене та доповн. – Елктрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 178 с.
13. Родін П. Р. Металорізальні інструменти. – 3-тє вид. – Київ : Вища школа, 1986. – 455 с.
14. Савченко С.М., Кухарук А.Д., Тимошенко Н.Ю. Економіка і організація виробництва: практикум для студентів технічних спеціальностей Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022, 93 с.
15. Солодкий В.І. Проектування металорізальних інструментів : Навч. посіб. / Солодкий В.І., Плівак О.А., Майданюк С.В. – Київ : НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 170 с.
16. Теорія різання [Електронний ресурс] : Підручник для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка / О. В. Глоба, В. В. Вовк, Д. А. Красновид, В. І. Солодкий. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 248 с.
17. Теорія різання та інструмент: Навчальний посібник / Веселовська Н.Р., Іскович-Лотоцький Р.Д., Ковальова І.М. – Вінниця: 2018. – 297 с.
18. Abood A. M. Dynamic analysis of the cutting forces in gear hobbing /A. M. Abood // Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. School of Mechanical and Systems Engineering University of Newcastle upon Tyne, UK, 2002. – 182 p.
19. A kind of Rectangular Spline Hob 夏建世 王强 CN207057765U. – 5 p.

20. Altintas, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibration, and CNC Design, – Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2021. – 383 p.
21. Assurance of cutting tools reliability: Monograph. / Yu.A. Kharlamov, V.I. Sokolov, O.S. Krol and others. – Severodonetsk: publishing house of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2020. – 190 p.
22. Bodzás S. Manufacturing of the surfaces of spline fitting connection / S. Bodzás // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology: 2020. – P. 909–920.
23. Bouzakis K.-D. FEM-supported simulation of chip formation and flow in gear hobbing of spur and helical gears / K.-D. Bouzakis, O. Friderikos, I. Tsiafis // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology: 2008. – Vol. 1. – P. 18–26.
24. Bouzakis K.-D. Gear Hobbing Cutting Process Simulation and Tool Wear Prediction Models / K.-D. Bouzakis, S. Kombogiannis, A. Antoniadis, N. Vidakis // Journal of Manufacturing Science and Engineering: Transactions of the ASME, 2002. – P. 42-51.
25. Brecher C. Design of Gear Hobbing Processes Using Simulations and Empirical Data / C. Brecher, M. Brumm, M. Krömer // Procedia CIRP: 2015. – Vol. 33. – P. 484-489.
26. Chen Y. Optimization Design and Cutting Performance Analysis of a Novel High-Speed Dry Cutting Hob with Variable Rake Angle / Y.Chen, J. Dai, L. Li // International Journal of Advanced Manufacturing Technology: 2026. – 20 p.
27. Dimitriou V. CAD-based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears / V. Dimitriou, A. Antoniadis // International Journal of Advanced Manufacturing Technology: Springer-Verlag London Limited, 2008. – 11 p.
28. DIN 5463:1955-09. Spline Shaft Connections with Straight Flanks; Medium Series.
29. Hodgyai N, Máté M, Oancea G, Dragoi M-V. Gear Hobs – Cutting Tools and Manufacturing Technologies for Spur Gears: The State of the Art. *Materials.* 2024; 17 (13): 3219.

30. Hrytsay I. Computer 3D modelling of chip geometry and force field in the hobbing process / I. Hrytsay, V. Topchij, A. Kuk // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science: 2018. – Vol. 4. – Number 2. – P. 68-79.
31. Hu Q. Research on hobbing accuracy of flexspline tooth profile of harmonic drive / Q. Hu, H. Li // Bulletin of the JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing: 2024. – Vol. 18. – No. 2. – 18 p.
32. Krömer M. Surface Characteristics of Hobbed Gears / M. Krömer, D. Sari, C. Löpenhaus, C. Brecher // GEAR TECHNOLOGY, 2017. – P. 68-75.
33. Li Y. Mathematical Modeling and Generating Method of Hourglass Worm Gear Hob's Rake Face Based on a Rotating Paraboloid Surface / Li Y, Yang J, Gu R, Chen Z, Xia C. // Machines. 2024; 12(11):770.
34. Litvin F. L., Fuentes A. Gear Geometry and Applied Theory. – 2nd ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 2004. – 800 p.
35. Mascenik J. Options on Tooth Profile Modification by Hob Adjustment / Mascenik J, Coranic T, Krenicky T. // Applied Sciences. 2023. – Vol. 13 (19):10646.
36. MÁTÉ M. About the Profile Accuracy of the Involute Gear Hob / M. MÁTÉ, D. HOLLANDA // Acta Universitatis Sapientiae Electrical and Mechanical Engineering, 2017. – Vol. 9. – P. 5-18.
37. Modern Metal Cutting: A Practical Handbook. Sandvik Coromant: First North American Edition, 1996. – 960 p.
38. Piotrowski A. Geometric analysis of composite hobs / A. Piotrowski, R. Gołębski, P. Boral // Transactions of famena XLIV-1: 2020. – P. 43-54.
39. Piotrowski A. Profile Optimisation of a Solid Modular Hob in the Machining of Gears Made of Classic and Unusual, Innovative Materials / A. Piotrowski, A. Tyliszczak // Materials (Basel). 2024 Apr 26; 17 (9): 2049.
40. Radzevich S. A Novel Hob Design for Precision Involute Gears Part I. May 1, 2007.
41. Radzevich S. A Novel Hob Design for Precision Involute Gears Part II. May 1, 2007.
42. Rech J. Influence of cutting edge preparation on the wear resistance in high speed dry gear hobbing / J. Rech // Wear: 2006. – Vol. 261. – P. 505-512.
43. Rectangular spline hob 熊发志 CN203664843U. – 7 p.

44. Sabkhi N. Characterization of the Cutting Forces Generated During the Gear Hobbing Process: Spur Gear / N. Sabkhi, C. Pelaingre, C. Barlier, A. Moufki a, M. Nouari b // Procedia CIRP: 2015. – Volume 31. – P. 411-416.
45. Salman S. A. An Analysis of Single Tooth Milling Operation / S. A. Salman // Master's Thesis Project Department of Production Engineering and Management. – 46 p.
46. Sovilj B. Bases for design and production of hob-milling cutters for splined shaft on the CNC machines / B.Sovilj, I. Seuček, J. Javorova // Machine Design, 2009. – Vol. – P. 331-334.
47. Stadtfeld H. J. Design Parameters for Spline Connections. GEAR TECHNOLOGY, 2019. – P. 79-83.
48. Susac F. Hob mill for spline shaft, profiled by generating trajectories method. Graphical application in CATIA / F. Susac, V. G. Teodor, N. Baroiu, N. Oancea // MATEC Web of Conferences 2017. – 12 p.
49. Svahn M. Prediction of the cutting forces in gear hobbing and the wear behaviour of the individual hob cutting teeth / M. Svahn. L. Vedmar // International Journal of Manufacturing Research, - Geneva, Switzerland: Inderscience Enterprises, 2018. – Vol. 13. – No. 4. – P. 342-358.
50. Tapoglou N. CAD-Based Calculation of Cutting Force Components in Gear Hobbing / N. Tapoglou, A. Aristomenis // Journal of Manufacturing Science and Engineering: ASME, 2012. – Vol. 134. – 8 p.
51. Ueda Y. Exploratory investigation of chip formation and surface integrity in ultra-high-speed gear hobbing / Y. Ueda, N. Sakurai, T.o Takagi, K. Ishizu, Jiwang Yan // CIRP Annals: 2022. – Vol. 71. – Issue 1. P. 89-92.
52. Vasilis D. Advanced Computer Aided Design Simulation of Gear Hobbing by Means of Three-Dimensional Kinematics Modeling / D. Vasilis, V. Nectarios, A. Aristomenis // Journal of Manufacturing Science and Engineering: 2007. – Vol. 129. – P. 911-918.
53. Yang Y. Theoretical analysis of the Influence of workpiece spindle vibration displacement on machining accuracy of gear hobbing machine / Y. Yang, X. Li, Z. Zou, L. Zeng, L. Wang // Journal of vibroengineering: 2019. – Vol.21. – Issue 2. – P. 286-300.

54. Zhao K. Design method and parameter optimization of small angle rake face of hourglass worm gear hob / K. Zhao, J. Yang, Y. Li, B. Teng, N. Ding // ulletin of the JSME Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, 2024. – Vol. 18. – No. 3. – 17 p.