

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

На правах рукопису

Громнюк Сергій Іванович

УДК 621.914.5:621.9.015

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ
КОЛІС РАДІАЛЬНО-КОЛОВИМ СПОСОБОМ**

Спеціальність 05.02.08 - технологія машинобудування

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
Грицай Ігор Євгенович
доктор технічних наук, професор

Львів 2016

ЗМІСТ

Вступ	5
1. Стан в галузі технологій нарізання зубчастих коліс та наукових досліджень процесів зубофрезерування.....	11
1.1. Аналіз відомих методів нарізання циліндричних зубчастих коліс.....	11
1.2. Прогресивні технологічні процеси, способи і методи зубонарізання...	18
1.3. Стан у галузі моделювання та дослідження процесів нарізання зубчастих коліс дисковими інструментами.....	24
1.2.1. Дослідження та розрахунок параметрів зрізів.....	25
1.2.2. Моделювання та розрахунки сили різання зубофрезерування...	31
Висновки.....	38
Мета і задачі досліджень.....	39
 2. Дослідження параметрів зрізів дискової фрези в процесі зубонарізання за РК-способом	 42
2.1. Теоретичні основи розрахунку параметрів зрізів. Виведення основних залежностей.....	42
2.1.1. Моделювання параметрів зрізів на вершинних лезах.....	43
2.1.2. Моделювання параметрів зрізів на бокових лезах.....	46
2.2. Дослідження параметрів зрізів.....	47
2.2.1. Товщина зрізів на вершинних лезах.....	47
2.2.2. Параметри зрізів на вхідних лезах.....	52
2.2.3. Площа поперечного перерізу зрізів.....	
2.2.4. Виведення залежностей для розрахунку усереднених значень параметрів зрізів.....	54
2.2.4.1. Максимальна сумарна площа перерізу.....	56
2.2.4.2. Середня площа перерізу зрізів вхідних бокових лез.....	59
2.2.5. Перевірка моделей параметрів зрізів в РК-способі.....	61
Висновки по розділу 2.....	63

3.	Моделювання сили різання та її складових в РК-способі.....	65
3.1.	Вихідні дані та розрахункові кінематичні схеми.....	65
3.2.	Дослідження впливу параметрів процесу зубонарізання на головну складову сили різання.....	68
	Висновки по Розділу 3.....	73
4.	Пружні деформації дискової фрези та їх вплив на точність процесу. Мікронерівності робочих поверхонь зубців коліс, нарізаних РК-способом.....	76
4.1.	Пружні деформації фрези в осьовому напрямку.....	76
4.2.	Пружні деформації технологічної системи в радіальному напрямку...	79
4.3.	Крутильні деформації на вісі стола верстата.....	82
4.4.	Сумарна похибка оброблення, викликана пружними деформаціями в технологічній системі.....	84
4.5.	Мікронерівності профілів зубців.....	86
	4.5.1. Мікронерівності поверхні внаслідок осьової подачі.....	86
	4.5.2. Мікронерівності внаслідок руху обкочування.....	88
	Висновки по розділу 4.....	92
5.	Експериментальні дослідження процесу зубофрезерування РК-способом.....	94
5.1.	Дослідження осьової складової сили різання зубофрезерування в РК-способі на основі методів планування експерименту.....	94
	5.1.1. Методика проведення експерименту.....	94
	5.1.1.1. Тарування інструментів.....	94
	5.1.1.2. Вимірювання сили різання за осьовими коливаннями дискових фрез.....	97
	5.1.2. Планування експерименту для визначення функції відгуку бокової складової сили різання.....	99
	5.1.2.1. Початкові дані та матриця планування експерименту.....	99

5.1.2.2. Експериментальні дані та їх опрацювання.....	102
Висновки по розділу 5.....	106
6. Методика вибору параметрів процесу зубофрезерування з урахуванням пружних деформацій. Напрямки удосконалення радіально-колового способу.....	108
6.1. Вибір раціональних параметрів процесу РК-зубофрезерування...	108
6.2. Регулювання параметрів процесу зубофрезерування на основі системи моделювання динамічних процесів.....	111
6.3. Удосконалення кінематика зубофрезерного верстата для радіально-колового способу зубофрезерування.....	114
Висновки по розділу 6.....	116
Загальні висновки.....	118
Список використаних джерел.....	123
Додаток А.....	140
Додаток Б.....	170
Додаток В.....	176

ВСТУП

Актуальність теми. Тенденції сучасного машинобудування в галузі виробництва зубчастих передач і нарізання зубчастих коліс передбачають створення нових ефективних технологічних методів з вищими технічними, економічними та експлуатаційними властивостями. На сьогодні цим вимогам у значній мірі відповідає радіально-коловий спосіб нарізання зубчастих коліс, який базується на використанні простого різального інструменту – дискових фрез та універсальних верстатів для черв'ячного зубофрезерування. Цей спосіб характеризується високою універсальністю завдяки виготовленню коліс різних модулів та кількості зубців одним інструментом, розширенням технологічних можливостей звичайних зубофрезерних верстатів, високою продуктивністю процесу з одночасним досягненням високої якості зубчастих коліс, а також економією виробничих витрат.

Висновок про ефективність РК-способу підтверджений багаточисельними теоретичними дослідженнями і експериментальними даними. Проте, для широкого використання цього способу на сьогодні ще відсутня достатня основа для його впровадження у виробництво. Виходячи з перспективності та ефективності зубофрезерування радіально-коловим способом створення науково-прикладної бази, проведення теоретичних і експериментальних досліджень для розрахунку раціональних робочих режимів, вибору та обґрунтування технологічних параметрів цього процесу є актуальним науково-технічним завданням сучасного машинобудування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконання дисертаційної роботи пов'язане з науковою тематикою кафедри технології машинобудування НУ «Львівська політехніка» «Розроблення високоефективних технологічних процесів механічної обробки, складання та їх автоматизація»; дослідженнями, які проводили відповідно до тематичного плану науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України, «Прогресивні енергоощадні технології виготовлення зубчастих передач виробів і обладнання машинобудування, енергетики та транспорту» (Держреєстр. № 0113U006296) та госпдоговірної теми ГД 0482 «Розроблення технологічного оснащення для модернізації зубофрезерного верстата моделі 5К32 і технології

нарізання зубчастих коліс способом радіально-колового формоутворення», (Держреєстр. № 0114U004751).

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є обґрунтування раціональних технологічних параметрів, які забезпечують задану якість зубчастих поверхонь в процесі радіально-колового способу зубофрезерування на підставі комплексного моделювання і врахування впливу пружних деформацій на точність зубооброблення.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити методики параметричного описання перехідної поверхні, в якій відбувається різання дискової фрези з урахуванням кінематики РК-способу та визначення параметрів зрізів в умовах багатозубчастого різання як функції повороту фрези в межах одної впадини між зубцями;

- вивести аналітичні вирази для розрахунку товщини, ширини і площі поперечного перерізу зрізів; дослідити залежності параметрів зрізів від умов оброблення та нерівномірність процесу зубофрезерування РК-способом;

- встановити залежності для розрахунку сили різання та її складових в функції від параметрів зрізів та виявити вплив на силу різання початкових умов і основних параметрів технологічного процесу;

- дослідити вплив сили різання на похибку профіля зубчастих коліс, викликану пружними деформаціями та закономірності формування мікронерівностей профілів;

- виконати експериментальні дослідження для перевірки теоретичних положень роботи; розробити методику обґрунтованого вибору та призначення параметрів процесу зубофрезерування радіально-коловим способом і рекомендації для його практичного використання.

Об'єкт досліджень – технологічний процес нарізання циліндричних зубчастих коліс радіально-коловим способом.

Предмет дослідження – закономірності процесу різання і формоутворення дисковою фрезою в умовах непевного обкочування та їх вплив на параметри якості зубчастих поверхонь.

Методи досліджень. Аналітичні дослідження базуються на основних положеннях технології машинобудування, теорії різання та формоутворення, теорії зубчастих зачеплень. Виведення залежностей для розрахунку параметрів зрізів на лезах дискової фрези базувалося на положеннях математичної

статистики. Вплив силових чинників і пружних деформацій на похибки профілів оцінювався з використанням теорії точності зубоброблення; моделювання закономірностей параметрів зрізів і силових чинників здійснювалося з допомогою електронних таблиць Excel Microsoft Office. Аналіз впливу параметрів зрізів і сили різання на сталість пружної системи верстатів і якість поверхонь зубців реалізовано з допомогою системи Simulink MATLAB. Достовірність теоретичних розробок підтверджено експериментально з використанням положень математичної статистики і методів планування експерименту; експериментальні дослідження сили різання проводилися на основі безконтактного непрямого методу вимірювань.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у створенні та обґрунтуванні системного математичного описання процесу зубофрезерування РК-способом, яка охоплює моделювання параметрів зрізів, сили різання та її складових, пружних деформацій та викликаних ними похибок і шорсткості робочих поверхонь зубців зубчастого колеса, а саме:

- виведені аналітичні вирази для розрахунку параметрів зрізів в довільній точці робочого простору, якими враховано зміну миттєвого радіуса фрези, встановленої ексцентрично, та результуючого руху різання внаслідок обертання фрези, кругової подачі стола заготовкою і осьової подачі; отримані залежності дають змогу визначати товщину, ширину і площу перерізу зрізів на кожному лезі і зубці, довжину дуги контакту і сумарну площу на всіх зубцях на дузі контакту з заготовкою;

- отримано теоретичні залежності для розрахунку середніх та максимальних значень площі перерізу на вершинних і бокових лезах та формули для розрахунку сили різання і її складових в функції від основних параметрів в умовах різання дисковою фрезою при неперервному обкочуванні;

- досліджено та узагальнено закономірності зміни силового навантаження по куту повороту фрези залежно від осьової подачі, діаметра і кількості зубців фрези, модуля і кількості зубців колеса в РК-способі, підтверджені експериментальними дослідженнями;

- встановлено вплив силових чинників та пружних деформацій і коливань на точність і шорсткість профілів зубців, які нарізаються РК-способом; сукупність отриманих аналітичних залежностей дає змогу обґрунтовано розраховувати граничну величину осьової подачі та призначати

конструктивно-технічні параметри інструментів і обладнання для досягнення поставлених виробничих вимог і ефективності процесу;

- розроблено та обґрунтовано напрямки удосконалення і розширення технологічних можливостей зубофрезерних верстатів і технологічного спорядження на основі засобів програмного керування робочими рухами в радіально-коловому способі зубофрезерування.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше сформульовано рекомендації вибору на етапі підготовки виробництва раціональних параметрів процесу зубофрезерування радіально-коловим способом, конструктивних і технічних параметрів інструментів і обладнання та методик обґрунтування і розрахунку раціональних робочих режимів з урахуванням технологічних чинників, які забезпечують задану точність профілів і шорсткість робочих поверхонь зубців;

- створено метод кількісної оцінки параметрів поперечного перерізу зрізів і довжини контакту в кожній частині робочого простору інструменту, який враховує особливості кінематики РК-способу та дає змогу виявити умови роботи і навантаження кожного леза та зубця дискової фрези;

- розроблено методики визначення нерівномірності силового навантаження для удосконалення схеми різання та вирівнювання сили різання при усуненні припуску в РК-способі;

- запропоновано новий безконтактний метод визначення складової сили різання за пружними деформаціями дискової фрези;

- розроблено схеми компонування технологічного спорядження та удосконалених зубофрезерних верстатів для нарізання на одному верстаті одним різальним інструментом зубчастих коліс з різними типами профілів на основі керованих приводів головного руху і переміщення вузла фрезери.

Розроблені заходи дають змогу підвищити точність та якість зубчастих поверхонь, нарізаних з допомогою радіально-колового способу, створюють передумови для вирівнювання сили різання і удосконалення схеми різання - формоутворення дискової фрези, підвищення ефективності процесу радіально-колового зубофрезерування, модернізації обладнання та оснащення.

Результати дисертаційних досліджень впроваджені на ПРАТ «Львівський локомотиворемонтний завод», а також в навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка».

Особистий внесок здобувача. Проведені теоретичні та експериментальні роботи і дослідження виконані автором самостійно. В опублікованих роботах автору належать основні ідеї, постановка задач дослідження, опрацювання теоретичних результатів та аналіз отриманих даних і формулювання висновків статей. Формулювання теми, мети, задач досліджень і основних положень дисертаційної роботи, вибір методів експериментальних досліджень трактування результатів виконані спільно з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації доповідалися на: Міжнародній науково-технічній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (Краматорськ, 2013 р.); Всеукраїнських науково-технічних конференціях «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Львів-Карпати: 2013 – 2016 р.р.); ХІІ Міжнародному симпозиумі інженерів-механіків у Львові. (Львів, 2015 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблемы качества и долговечности зубчатых передач и механического привода» (Одеса, 2014 р.; Кароліна-Бугаз, 2015 р., 2016 р.); ХІІ міжнародному науково-технічному семінарі «Високі технології: тенденції розвитку. Інтерпартнер – 2014» (Одеса, 2014 р.); наукових семінарах кафедри ТМБ.

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено в 17 наукових статтях, з яких 8 у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у виданні, яке включене до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття в іноземному виданні, 1 стаття в іншому виданні, 5 – у матеріалах науково-технічних конференцій; 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, переліку використаних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг дисертації становить 178 сторінок, що включають 112 сторінок основної частини, 82 рисунки, 15 таблиць, 125 літературних джерел на 17 сторінках та двох додатків на 39 сторінках.

РОЗДІЛ 1


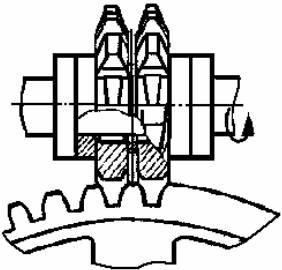
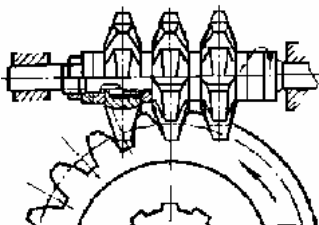
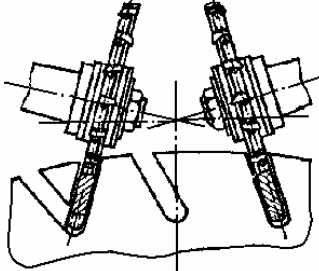
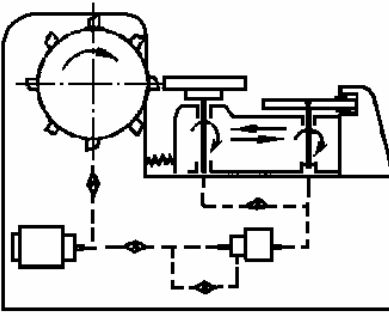
СТАН В ГАЛУЗІ ТЕХНОЛОГІЙ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ТА НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ

1.1. Аналіз відомих методів нарізання циліндричних зубчастих коліс

Різноманітність типів та видів зубчастих коліс, які використовуються в машинобудуванні, зумовлюють значну кількість існуючих методів і технологій нарізання та виготовлення зубчастих коліс. Відомі методи, що діють у технології циліндричних зубчастих коліс можуть бути як універсальними, так і спеціальними, які використовуються у певних галузях машинобудування, та забезпечують виконання різноманітних вимог – щодо умов і типу виробництва, заданої продуктивності, витрат на інструменти і обладнання, затрати енергії і матеріалів, собівартості продукції. Вони відрізняються змістом, тривалістю та якісними показниками операцій, характеризуються різноманітною кінематикою процесів різання-формування: траєкторією та величинами головного руху і руху подач, які можуть надаватися інструменту або заготовці, їх швидкостями та прискореннями. Операції прорізання та формування зубців коліс здійснюються копіюванням або обкочуванням (центроїдним огинанням). Огляд відомих способів формотворення зубців за методами копіювання та обкочування, з загальною характеристикою особливостей технологій, устаткування та галузей використання наведено у табл.1.1 [1].

Методи обкочування, зокрема, зубофрезерування модульними черв'ячними фрезами в практиці зубооброблення є найбільш розповсюдженими, проте останнім часом все ширше, особливо в умовах великосерійного виробництва, використовують методи копіювання, які тривалий час вважали технічно недосконалим внаслідок обмеженої продуктивності та невисокої точності. Ефективність та підвищення точності методу копіювання досягають різними шляхами, зокрема: використанням пристроїв з прямим поділенням; профілюванням інструментів не за номерами

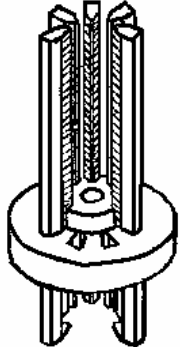
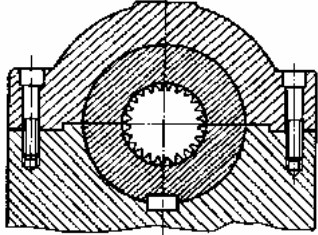
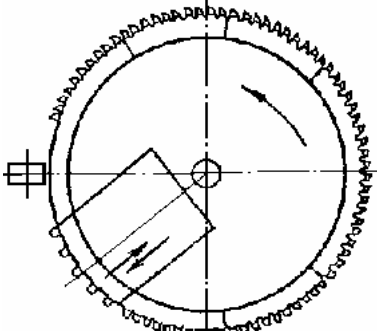
Методи нарізання циліндричних зубчастих коліс

<i>Методи копіювання</i>			
Спосіб утворення зубців	Схема оброблення	Обладнання	Галузь застосування
Фрезерування дисковою модульною фрезою		Зубофрезерні та універсально-фрезерні з використанням ділільних головок	Індивідуальне та дрібносерійне виробництво; чистове нарізання коліс 8-9 ступені точності
Фрезерування двома дисковими модульними фрезами			Індивідуальне та дрібносерійне виробництво; чистове нарізання коліс 8-9 ступені точності з кількістю зубців понад 100
Фрезерування трьома дисковими кутовими фрезами			Серійне виробництво; чорнове нарізання зубчастих коліс середніх модулів
Фрезерування спеціальними дисковими фрезами (способом трепанації)		Зубофрезерні, споряджені спеціальними супортами	Індивідуальне та серійне виробництво; чорнове нарізання велико модульних ($m > 30$ мм) прямозубчастих коліс
Неперервне копіювально-фрезерне оброблення однитковою дисковою різцевою головкою		Спеціальна копіювальна установка	Нарізання вузьковінцевих коліс та зірочок

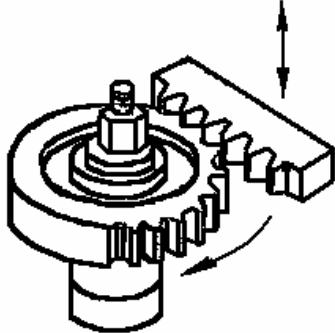
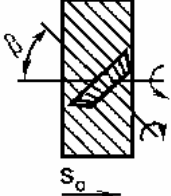
Продовження табл.1.1

Фрезерування двокутовою пальцевою		Універсально-фрезерні з використанням ділільних головок; спеціальні, які працюють лише пальцевими фрезами; зубофрезерні, які працюють пальцевими та дисковими модульними фрезами; зубошевронні	Індивідуальне та серійне виробництво; чорнове нарізання коліс середніх і великих модулів з прямими, похилими та шевронними зубцями
Фрезерування послідовно двома кутовими пальцевими фрезами			Індивідуальне та серійне виробництво; чистове нарізання коліс середніх і великих модулів з прямими, похилими та шевронними зубцями
Фрезерування пальцевою модульною фрезою (профілювання)		Довбальні та стругальні	Індивідуальне виробництво в умовах ремонту коліс невисокої точності
Стругання фасонним різцем, який має форму заглибини			Довбальні
Контурне нарізання багаторізевою головкою		Гідравлічні преси	
Контурне нарізання евольвентою прошивкою			Зубопротяжні
Нарізання кільцевими протяжками			

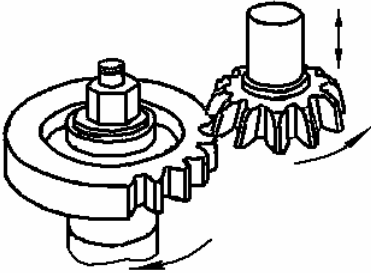
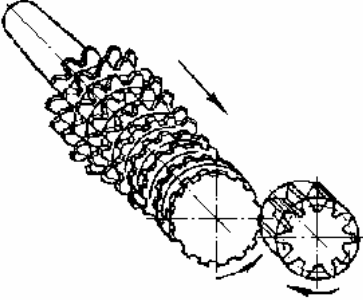
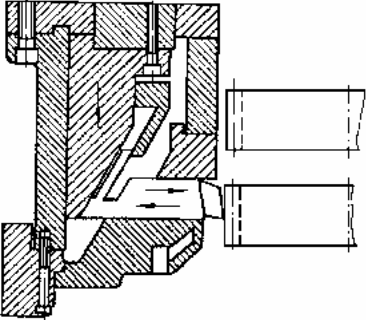
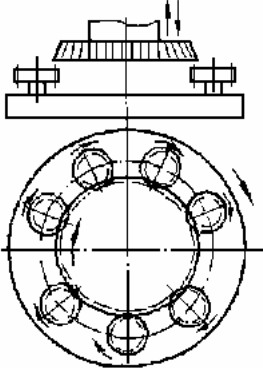
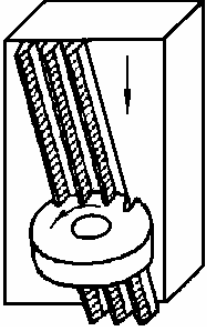
Продовження табл..1.1

Нарізання евольвентними протяжками		Протягувальні; преси	Масове та великосерійне виробництво коліс невисокої точності
Контурне (охоплювальне) протягування			Масове та великосерійне виробництво дрібномодульних коліс
Протягування кругодіагональною протяжкою		Зубопроотяжні	Масове виробництво коліс невеликих розмірів

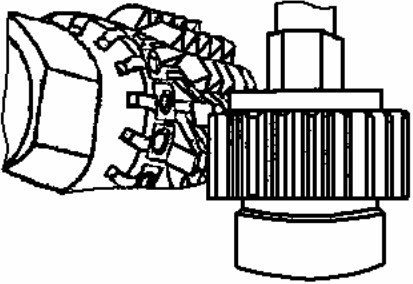
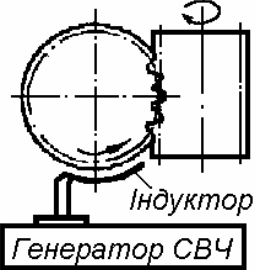
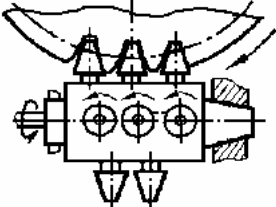
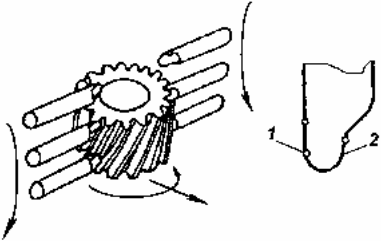
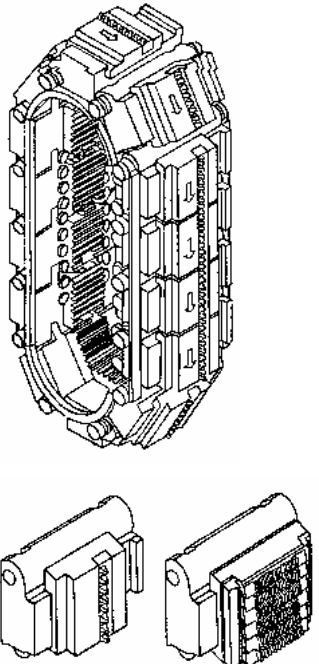
Методи обкочування

Спосіб утворення зубців	Схема оброблення	Обладнання	Галузь застосування
Довбання гребінкою		Зубонарізні	Виготовлення коліс з прямими, похилими, гвинтовими і шевронними зубцями, блокшестерень
Зуботочіння чашковими різцями		Зубофрезерні та шліцефрезерні	Серійне виробництво прямо- і косозубчастих коліс

Продовження табл.1.1

Зубодовбання довбачем			Одиничне і дрібносерійне виробництво коліс з буртиками і неперервним шевроном, блокшестерень
Нарізування довбачем-прошивкою		Зубодовбальні	Серійне виробництво точних дрібно-модульних коліс в приладобудуванні
Контурне зубодовбання			Масове та великосерійне виробництво зубчастих коліс в автобудуванні
Довбання багатопозиційне		Зубодовбальні, зі спеціальним столом	Масове виробництво зубчастих коліс
Евольвентне протягування		Протягувальні; преси	Масове та велико серійне виробництво зубчастих коліс невисокої точності в приладобудуванні

Продовження табл. 1.1

Фрезерування черв'ячною фрезою		Зубофрезерні	Всі типи виробництва прямо- та косозубчастих коліс
Зубофрезерування черв'ячною фрезою заготовки в нагрітому стані			
Ротаційне зубофрезерування		Зубофрезерні, зі спеціальними супортами	Оброблення середньо- і великомодульних зубчастих коліс ($m > 10 \text{ мм}$)
Нарізання зубчастих коліс за методом <i>Tangear</i>		Спеціальний зубонарізний верстат багаторізцевими головками	Масове та великосерійне виробництво зубчастих коліс в автобудуванні
Нарізання зубчастих коліс за методом <i>G-Trac</i>		Спеціальний зубопротягувальний верстат	Чорнове нарізання дрібно- і середньомодульних косозубчастих коліс ($m < 8 \text{ мм}$) в авто- і сільськогосподарському машинобудуванні

фрез, а відповідно до точного числа зубців нарізаного колеса; використанням точніших та біль жорстких спеціальних зуборізних верстатів замість універсальних. Підвищення продуктивності цих методів досягають використанням інструментів великих діаметрів; багатопозиційним обробленням; прискоренням зворотних ходів; автоматичним виконанням руху ділення; спорядженням інструментів надтвердими сплавами та поліпшенням геометричних параметрів дискових та пальцевих інструментів.

Завдяки таким впровадженням продуктивність зубонарізання за методом копіювання може значно перевищувати продуктивність зубофрезерування черв'ячними фрезами. Окрім того, метод копіювання містить можливість додаткового підвищення продуктивності за рахунок великої сумарної довжини лез, які одночасно приймають участь в різанні, а також здатності одночасного нарізання всіх зубців колеса, що неможливо в методі огинання.

Методи копіювання мають також переваги в отриманні профілів коліс із модифікованим профілем зубців, оскільки при методі огинання виробництво зуборізних модифікованих інструментів значно ускладнюється і здорожчує. Проте, попри усі можливі удосконалення у методі копіювання зберігається його основний недолік - неуніверсальність інструменту. Цей недолік не має принципового значення лише в умовах великосерійного виробництва, як, наприклад кругодіагональне протягування дисковими фрезопротяжками [2].

Загалом, більшість відомих традиційних методів виготовлення зубчастих поверхонь мають вузьку універсальність, обмеження за типом виробництва, видами і типами зубчастих вінців, масою та габаритами зубчастих коліс; підвищення точності і якості оброблення та продуктивності процесів спряжене з підвищенням складності інструментів та обладнання, збільшенням їх ціни, звуженням області використання.

Основними різальними інструментами у виробництві циліндричних зубчастих коліс є модульні черв'ячні фрези, які використовують для прорізання впадин між зубцями, півчистої обробки перед шліфуванням і шевінгуванням зубчастих коліс, а також для чистового оброблення загартованих до твердості

НВ280-300 зубчастих коліс. У працях [2-4] на основі аналізу схеми різання черв'ячних фрез показано, що ці інструменти працюють на межі своїх можливостей, а резерви їх удосконалення на сьогодні практично вичерпані. Причиною цьому є значна нерівномірності зрізуваних шарів, яка закладена в схемі різання черв'ячної фрези і яка призводить до значних динамічних навантажень і коливань в пружній системі верстата; ці обставини вимушують обмежувати осьову подачу і швидкість різання. В той же час компроміс між продуктивністю, якістю обробки та витратами на ці інструменти не відповідає вимогам сучасного виробництва, чим обґрунтовується необхідність пошуку нових технологічних методів та способів зубообробки, які б подолали існуючі протиріччя.

1.2. Прогресивні технологічні процеси, способи і методи зубонарізання

На сьогоднішній час з усієї множини відомих технологічних процесів зубонарізання можна виділити такі, які характеризуються широкою універсальністю щодо об'єктів виготовлення, типів та видів зубчастих коліс, найменшими енергетичними та матеріальними витратами на різальні інструменти, оснащення і верстати. Такі методи, способи і їх технології зубообробки можна вважати прогресивними.

В роботі [5] запропоновано прогресивну схему формоутворення на горизонтальному фрезерному верстаті зубчастих профілів, а також фасонних поверхонь. З допомогою механічної системи, утвореної на базі цього верстата забезпечується вирізання впадини між зубцями дисковою головкою, яка споряджена різцями з пластинами з твердого сплаву. Горизонтально - фрезерний верстат модернізують так, щоб надати обертання заготовці зубчастого колеса на столі верстата, при цьому столу додатково надають періодичний зворотно-поступальний поперечний рух. Ділення-обкочування забезпечується механічним слідкуючим пристроєм, який відтворює рух копіру у впадині зубчастого колеса з допомогою двох еталонних коліс, що мають той же модуль і число зубців. Різання здійснюється на повну висоту зубця фрезою,

встановленою в горизонтальному шпинделі, при цьому осьова, або радіальна подача не передбачені. Загалом, дана механічна система працює за багаточисельними кулачками-копірами, є складною та громіздкою.

У наш час ідея І. А. Коганова реалізована як «контурне оброблення» на горизонтальному 4-осьовому оброблювальному центрі з поворотним столом та використанням сучасного програмного забезпечення [6-13] (рис.1.1)

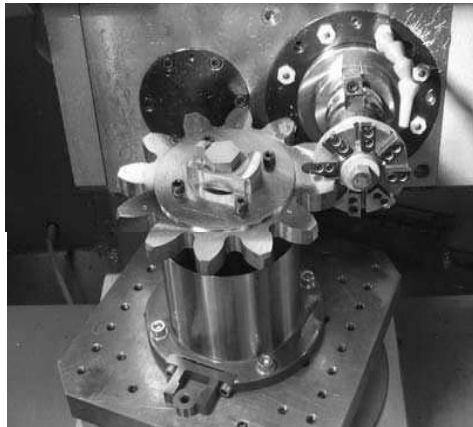


Рис.1.1. Нарізання зубчастого колеса на горизонтальному фрезерному верстаті з ЧПК за методом контурного оброблення

У цих роботах обґрунтовано економічну доцільність використання контурної обробки дисковим інструментом профільних поверхонь, в тому числі зубчастих коліс, наведено математичні моделі для описання та синтезу їх робочих поверхонь, закономірностей формоутворення, кінематичних параметрів і розрахунку траєкторій виконавчих органів верстата. Проте, необхідність дорогого обладнання - багатокоординатних верстатів з ЧПК обмежує його використання одиничним виробництвом зубчастих коліс та поширюється тільки на прямозубі колеса. Крім того, основний час операції контурного зубооброблення на оброблювальному центрі при тих же режимах різання, що й черв'ячного зубофрезерування у 20-100 разів більший [7].

Істотне підвищення ефективності виробництва зубчастих коліс можливе з допомогою радіально-колового способу зубообробки Е.М.Благути [14].

Відмінність цього способу від методу контурної обробки полягає в тому, що дискова фреза рухається планетарно навколо своєї осі внаслідок зміщення її геометричної та кінематичної осей – ексцентриситету, величина якого

еквівалентна модулю нарізаного колеса, а для використання способу достатньо універсального зубофрезерного верстата, який випускається промисловістю серійно. Процес зубонарізання здійснюється в умовах обкочування і неперервного поділу. Інструментом служить тонка стандартна дискова прорізна або відрізна фреза із швидкорізальної сталі (рис.1.2, а, в), або з зубцями із твердого сплаву (рис.1.2, б).



Рис.1.2. Нарізання синусоїдальних зубчастих коліс: а, в - фрезами із швидкорізальної сталі; б – збірною фрезою з зубцями із твердого сплаву

Профілі зубців, утворені з допомогою РК-способу мають синусоїдальний контур, проте зміною закону поступального руху, або швидкості обкочування можливо отримувати будь-які профілі, в тому числі евольвентні. Зокрема, отримати необхідний профіль зубців можна використанням слідкувального пристрою, в якого зовнішній контур копіра відповідає впадині між зубцями, які нарізають [15-16] (рис.1.3).

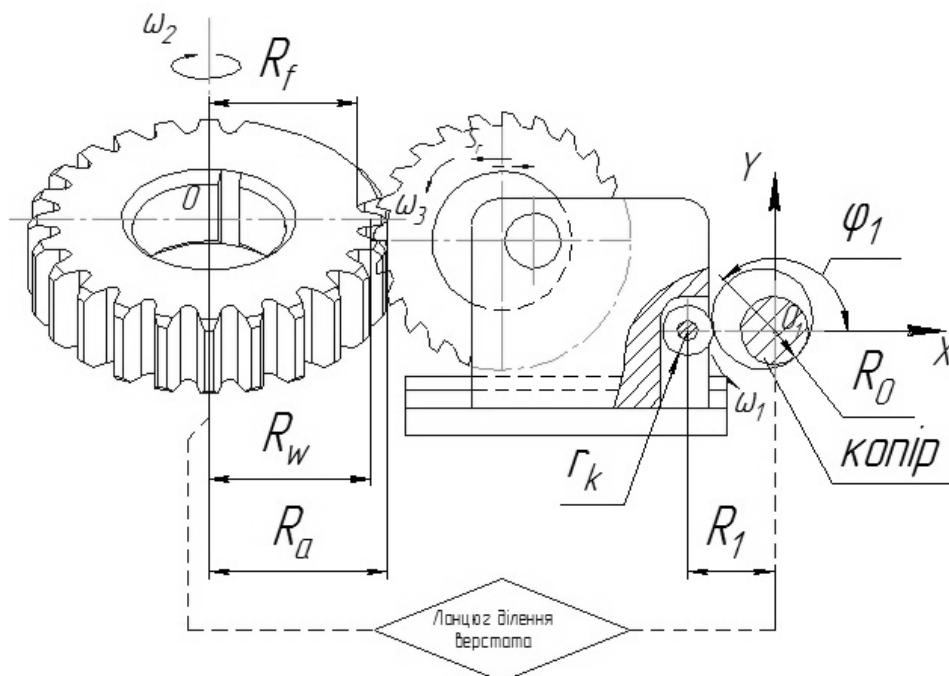
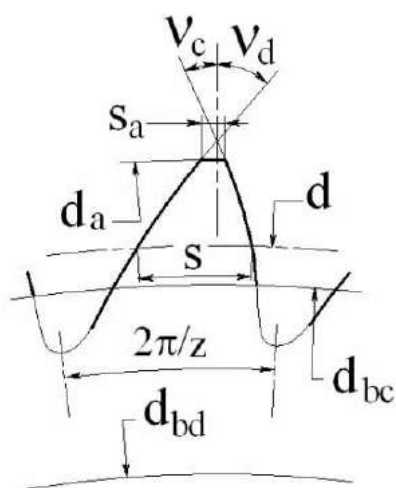


Рис.1.3. Схема нарізання зубців несинусоїдального профілю в РК-способі за допомогою копіювального пристрою

Різні аспекти теоретичних основ процесу оброблення зубчастих коліс в радіально-коловому способі розроблено в роботах Грицяя І.Є., Литвиняка Я.М., Благути Е.М., Юрчишина І.І., Махоркіна Є.М. [2, 3, 17-40]. Основні принципи побудови технології, аналіз схем різання і формоутворення, закономірностей профілювання в РК-способі, будови і геометрії інструментів, кінематики верстатів, результати моделювання та експериментальних досліджень, наведені у цих роботах, підтверджують широку універсальність цього способу для виготовлення коліс з різними параметрами, а також коліс різних видів і типів одним за назвою і розмірами інструментом на одному зубофрезерному верстаті, при незначній модернізації, або його дооснащення простими пристроями.

Одним із нових і перспективних напрямків удосконалення зубчастих передач і їх технологій останніми роками є впровадження зубчастих коліс з асиметричним профілем. Цій проблемі присвячено праці А.Капілевича (США) [41-43]. На рис.1.4 наведено форму асиметричного зубця (а) і приклад такої передачі (б), яка використовується в приводі газотурбінного двигуна генератора.



а

б

Рис.1.4. Зубець колеса з асиметричним профілем (а) і асиметрична зубчаста передача (б)

Зубчасті передачі та колеса, які пропонує автор, є евольвентними, а спосіб їх отримання – традиційний, з допомогою корегованих черв'ячних модульних фрез. Переваги передач з зубцями асиметричного профілю (збільшення навантажувальної здатності, зменшення шуму, збільшення довговічності) значною мірою нівелюються складністю профілювання і виготовлення черв'ячних фрез, оскільки забезпечити евольвентні профілі фрез з різними кутами зачеплення по правій і лівій системі координат та витримати початкові параметри після їх перешліфування є складною та дорогою задачею. Усунення недоліків цієї технології для нарізання асиметричних зубчастих коліс можливе використанням РК-способу, оскільки для отримання асиметричних профілів у цьому способі достатньо змістити дискову фрезу на її осі. Приклад асиметричного зубця і асиметричної форми впадини колеса, нарізаного з допомогою РК-способу дисковою фрезою наведено на рис.1.5.

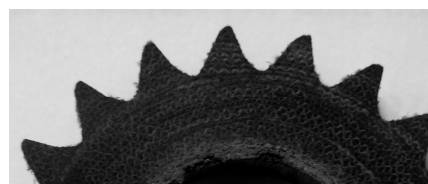
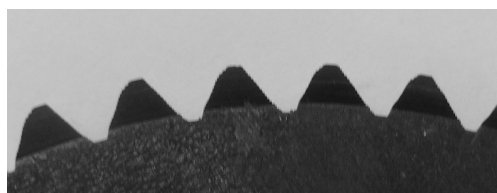


Рис.1.5. Колеса з асиметричними зубцями, нарізане з допомогою РК-способу дисковою фрезою

Підвищення продуктивності процесу зубонарізання в РК-способі забезпечується інтенсифікацією швидкості різання та осьової подачі. Цього можна досягти при одночасному покращенні якості обробки, а також зменшенні витрат на різальні інструменти та обладнання. Можливості РК-способу для підвищення ефективності виробництва на прикладі Львівського локомотиворемонтного заводу для виготовлення великомодульних зубчастих коліс приводів локомотивів наведено в роботі [44]. Показано, що при зміні кінематики даного способу на основі мультиплікатора зменшиться штучний час, скоротяться витрати на різальний інструмент та підтримання його працездатності, підвищиться продуктивність процесу зубонарізання.

Удосконаленню РК-способу присвячені патенти на корисні моделі [45-48], в яких описано зміну кінематики верстатів і нові компоновальні схеми технологічного спорядження.

В роботі [22] наведено результати досліджень, які дали змогу на основі аналізу синусоїдальних профілів отримати залежності для математичного описання профілю вихідної виробничої рейки, зведеного радіуса кривизни профілів, коефіцієнтів перекриття і ковзання профілів в зачепленні.

В роботі [28] виведено залежності, які описують закономірність зміни кута повороту і швидкості обертання дискового інструменту для нарізання евольвентних зубчастих коліс РС-способом. Показано, що отримання евольвентного профілю при зворотно-поступальному русі фрези і неперервному обкочуванні заготовки в першій фазі профілювання швидкість має бути підвищена, а в завершальній – понижена. Залежності параметрів радіальної та осьової корекції зубців дискового інструменту для нарізання евольвентних коліс цим способом приведені в роботі [33]. Подібна задача вирішена також у статті [4], де наведено залежності та графічно відображено відхилення синусоїдальних профілів від евольвентних залежно від кількості зубців і модуля нарізуваних коліс. Також показано зменшення у 10-15 разів систематичної похибки «огранювання» при профілюванні синусоїдальних і евольвентних коліс двома способами та зменшення на два порядки головної

складової сили різання у РК-способі порівняно з черв'ячним зубофрезеруванням.

В роботі [49] аналізуються загальні закономірності формоутворення бокових поверхонь зубців при осьовому русі різання тонкої дискової фрези, а також особливості зрізуваних шарів на її вхідних і вершинних лезах. Проте, тут не враховано кінематику процесу та відсутні залежності для моделювання окремих параметрів – товщини, ширини і площі перерізу як функцій непевного процесу різання.

Формули для розрахунку величини ексцентриситету та параметрів, необхідних для проектування зуборізних інструментів виходячи з заданого модуля і міжцентрової віддалі наведені в статті [50]. Отримані автором залежності дозволяють розрахувати траєкторію руху вершинного леза дискової фрези для нарізання РК-способом коліс з евольвентними зубцями.

Процес контурного фрезерування впадин між зубцями ексцентрично розташованою дисковою фрезою, який є РК-способом зубонарізання описано в роботі [51]. Автори розглядають формоутворення зубчастих поверхонь залежно від ексцентриситету і «кутового положення леза», тобто, від кута зачеплення і профільного кута фрези та приходять до висновку, що цей спосіб придатний для чорнового фрезерування впадин між зубцями зубчастих коліс а «також і інших деталей з періодичними профілями».

Таким чином, створено новий спосіб нарізання циліндричних зубчастих коліс, який характеризується високою універсальністю, простотою спорядження, базується на використанні простого і недорогого обладнання та інструменту і може забезпечити значний економічний ефект завдяки зменшенню витрат на різальні інструменти і підвищенню продуктивності зубообробки.

1.3. Стан у галузі моделювання та дослідження процесів нарізання зубчастих коліс дисковими інструментами

1.3.1. Дослідження та розрахунок параметрів зрізів. В процесах механічного оброблення деталей машин параметри зрізуваних шарів містять інформацію про процес різання, зумовлюють та відображають різноманітні і взаємопов'язані статичні та динамічні деформаційні, контактні, силові і теплові процеси і явища. Від них залежать сили різання і тертя, процес теплоутворення і температура різання, інтенсивність зношування інструментів, коливання і вібрації в технологічній системі верстата. У кожному методі обробки різанням параметри зрізуваних шарів характеризуються багатьма показниками залежно від складності кожного методу, його кінематичної схеми, робочих рухів і режимів різання.

В простих у кінематичному відношенні методах різання – точінні, струганні, протягуванні при незмінних режимах різання параметри зрізів залишаються постійними на окремих лезах і зубцях. На відміну від них, у періодичних процесах різання, до яких належить нарізання зубчастих коліс РК-способом параметри зрізів неможливо визначати на базі двовірних розрахункових схем, оскільки ці параметри є іншими на кожному зубці, та, разом з тим, змінюються за кутом повороту інструменту в межах ділянки контакту з заготовкою. З цього випливає, що для проектування технологічних процесів, різальних інструментів, вибору оптимальних режимів різання, забезпечення необхідної точності обробки і якості поверхонь деталі, стійкості інструментів і заданої продуктивності при найменших витратах необхідна мати повну інформацію про параметри зрізів.

В зубонарізанні РК-способом, який відбувається за методом неперервного обкочування з діленням у формоутворенні бере участь велика кількість зубців і лез, параметри зрізів на яких неперервно змінюються. Западини між зубцями колеса формуються в циклі, який охоплює часткові процеси попереднього різання десятками зубців з трьома лезами – вершинними та двома боковими. Форма і розміри зрізів відмінні на кожному зубці і лезі та змінюються за час контакту з заготовкою, при цьому на лінії зачеплення може діяти одночасно декілька зубців інструменту. Такі умови різання та формоутворення близькі до

закономірностей черв'ячного зубофрезерування, тому необхідно проаналізувати існуючі моделі та методи оцінки параметрів зрізуваних шарів, які використовують для цього та подібних методів, які близькі до РК-способу..

З огляду на важливість проблеми визначення параметрів зрізів черв'ячної фрези для описання процесів, що супроводжують різання і впливають на показники цього технологічного методу, дослідженнями цих параметрів протягом тривалого часу займалися багаточисленні науковці на наукові колективи.

Особливістю усіх методик, наведених у роботах [52-62] полягає в тому, що дослідження виконані на базі плоских розрахункових схем різання, які не враховують усіх робочих рухів, які присутні в зубофрезеруванні черв'ячною фрезою та використовують спрощену схему різання, замінюючи кінематику процесу різання рухами формоутворення евольвентних профілів. В цих працях не враховують дійсну поверхню різання, яка є просторовою, формується слідами багатьох різів по куту повороту передньої поверхні зубців фрези на дузі контакту з заготовкою в процесі накладання усіх кінематичних рухів, тому ці методики не відповідають реальним умовам різання.

Найчастіше не приймають до уваги переміщення черв'ячної фрези в осьовій подачі, а також конструктивний рух лез, які розташовані на гвинтовій поверхні основного черв'яка і при обертанні фрези умовно переміщуються вздовж її осі. Суть такого підходу демонструє рис.1.6 [53, 63]. Перерізи усіх контурів зубців розглядаються в торцевій площині і не враховують поворот передньої поверхні зубців та рух фрези в осьовій подачі, що не дає змоги відтворити форму перехідної поверхні у просторі та її дійсні розміри.

В роботі [64] розглядається рух гвинтової поверхні фрези, проте процес різання замінено процесом формоутворення в площині торця колеса.

В роботах [65, 66] введено поняття «контактне поле» черв'ячної фрези, яке базується на перетині двох циліндричних поверхонь, що мають зовнішні діаметри фрези та колеса, в межах якого шукаються зрізи, але такий підхід не відповідає умові утворення дійсної перехідної поверхні. Схематично це

представлено на рис.1.7, де контактне поле при різанні із зустрічною подачею зображено у виді еліпса, а на виді “А” показано поверхню різання і траєкторії руху вершинних лез.

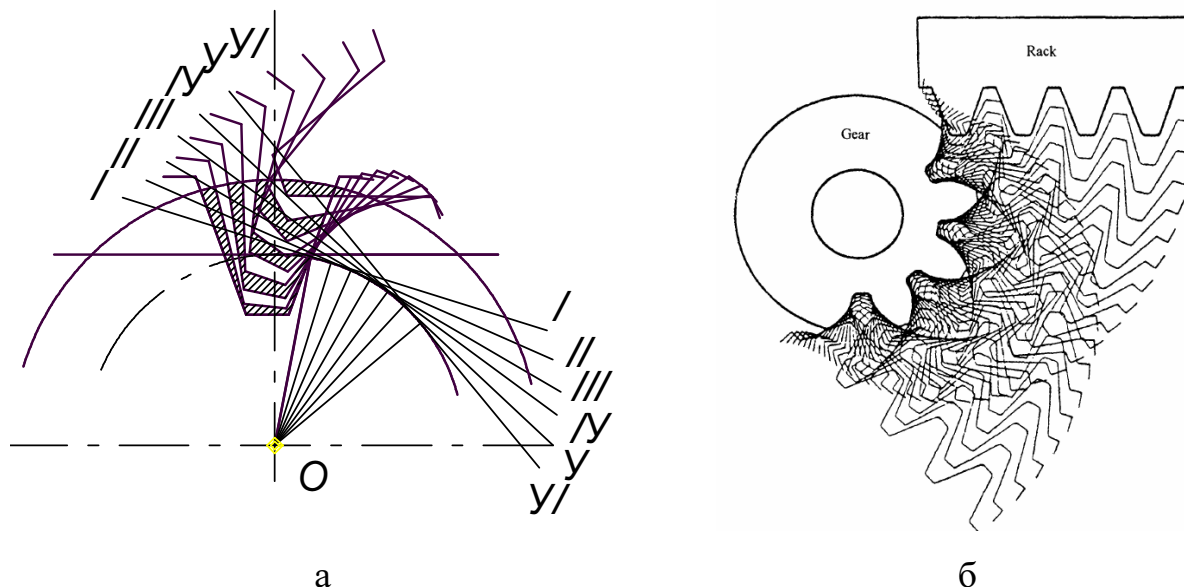


Рис.1.6 Площинна схема різання

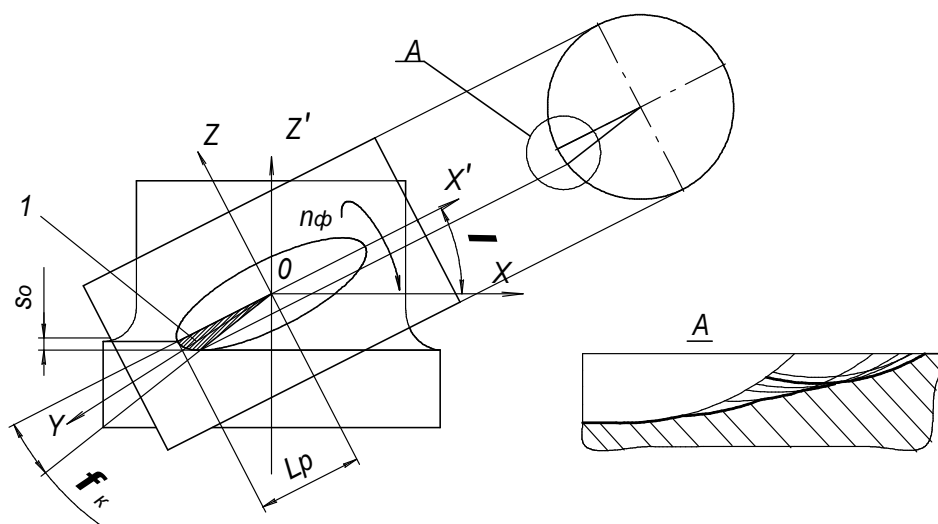


Рис.1.7. Контактне поле черв'ячної фрези за методом А.К.Сидоренка

Це положення використовують багато авторів, які вивчали цю проблему, зокрема, [67-69] проте, при такому підході використовують спрощену схему різання черв'ячної фрези, спотворюється дійсна поверхня різання в кожен момент часу зубофрезерування, немає можливості правильно відтворити

миттєву перехідну поверхню для кожного зубця, тому параметри, які розраховують на цій основі не відповідають дійсним значенням.

Для розрахунку параметрів зрізів створено програму *НОВ3D* [70], в якій визначаються сліди перетину заготовки з множиною фігур, утворених траєкторією руху одного зуба фрези по гвинтовій лінії. Проте, тут не враховано участь в утворенні поверхні різання інших активних зубців інструменту в їх робочих рухах. Крім того, програма розрахована лише для фрез, спроектованих на основі архімедових черв'яків.

У працях І.Є.Гриця [71-74] показано, що найбільша складність у моделюванні параметрів зрізів в обкочувальному зубофрезеруванні полягає у відтворенні перехідної поверхні, яка відділяє сформовану впадину між зубцями колеса, що нарізають і частково обробленою поверхнею западини. Ці поверхні утворюють зубці на гвинтовій поверхні фрези, кожен із яких має по три леза. Форма і розміри цієї перехідної поверхні неперервно змінюються в циклі оброблення і формоутворення, кратному одому повороту черв'ячної фрези по всій довжині робочого ходу (ширині вінця зубчастого колеса). Методика, розроблена у вказаних роботах полягає в тому, що в різних послідовних поворотах рейки початкового контура фрези знаходяться миттєві перерізи контура певного зубця фрези і контурів: цього ж зубця в попередньому по осьовій подачі положенні та попереднього по гвинтовій поверхні зубця, які приводяться до площини передньої поверхні. Граничний контур цих перерізів утворює миттєвий переріз перехідної поверхні, в якому визначають параметри зрізів - товщину і ширину на кожному лезі та на всіх задіяних у різанні зубцях черв'ячної фрези [71]. Для прикладу, як формується миттєвий переріз зубця черв'ячної фрези на гвинтовій поверхні у певному повороті його передньої поверхні відносно площини заготовки, на рис.1.8 наведено множину перерізів, яка визначає його форму і розміри зрізу.

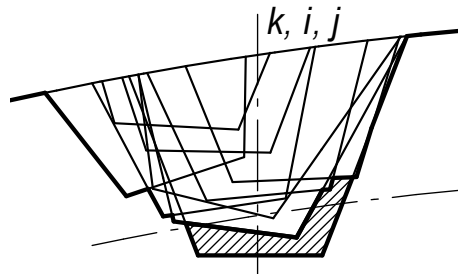


Рис. 1.8. Утворення миттєвого перетину зрізу одним із зубців черв'ячної фрези в його певному кутовому і лінійному положенні у зоні різання

Таким чином, на основі трьох проекцій ділянки різання і формоутворення можна відтворити перехідну поверхню, в якій визначити параметри поперечного перерізу зрізів у фіксовані моменти часу різання. Проте, недоліком цього методу є його орієнтація на застарілий програмний продукт (система «Компас-графік» 4 версії), з якою програмно зв'язано дану модель розрахунків і викреслювання контурів. Крім того, тогочасні комп'ютерні засоби не дозволяли врахувати більшу кількість зубців і миттєвих перерізів, утворених ними, що знижувало точність розрахунків.

Недоліків, які присутні у наведених вище працях не містить метод, описаний у роботі [75], де правильно відтворено кінематику нарізання зубців черв'ячною фрезою. Проте, автори розробляють метод фрезерування з радіальною подачею, яким нарізають вузькі дрібномодульні колеса і черв'ячні колеса, але ці положення не можна використати для моделювання зубофрезерування з осьовою подачею.

В статті [76] розроблено метод визначення параметрів зрізів черв'ячної фрези. На рис.1.9 показано приклад визначення площі перерізу зрізів на зубцях фрези, які знаходяться на різній робочій довжині, проте тут теж використана плоска схема для розрахунків, яка не враховує осьову подачу і зміну миттєвої форми перехідної поверхні.

Перевагою методу, описаного в роботі [77] є аналітичне описання руху передньої поверхні зубця черв'ячної фрези по гвинтовій поверхні черв'яка в процесі формоутворення, але метод можна використати тільки для визначення товщини зрізів на вершинному лезі. Для повного відтворення усіх параметрів

зрізів необхідно мати таке ж описання інших зубців, які приймають участь у різанні і знайти рівняння точок і ліній їх перетину, що є складною математичною задачею.

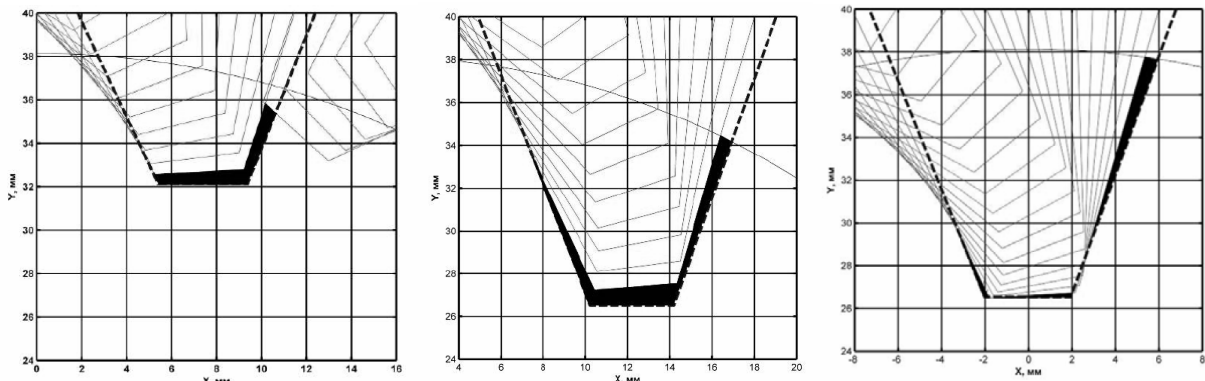


Рис.1.9. Визначення площі перерізу зрізів за Охріменком О.А.

Особливості зрізуваних шарів на вхідних і вершинних лезах дискової фрези при зубонарізанні в умовах обкочування наведено в роботах Я.М.Литвиняка [49,78]. Проте, у цих роботах також не враховано кінематику процесу та відсутні залежності для моделювання окремих параметрів зрізів – товщини, ширини і площі перерізу у функції кута повороту фрези в процесі неперервного різання.

В роботі [79] для вирівнювання сили різання під час контурного фрезерування дисковою фрезою використано наступну залежність для розрахунку об'єму зрізуваного шару:

$$P_c = \frac{V_c}{t} = \frac{a \cdot b \cdot l_c}{t},$$

де P_c – «продуктивність зняття стружки», $\text{мм}^3/\text{с}$; a , b і l_c – товщина, ширина і довжина стружки; t – час різання.

У даній формулі параметр P_c - «продуктивність зняття стружки» розраховують на основі плоскої схеми різання, а перерізи зрізів розглядаються в площині торця зубчастого колеса без урахування руху обкочування та осьової подачі (рис.1.10).

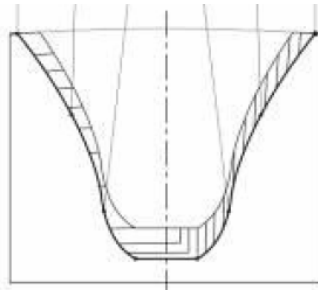


Рис.1.10. Схема для розрахунку параметрів зрізів за С.І.Пастернаком

Як було вказано вище така схема різання стосовно процесу зубофрезерування в умовах неперервного обкочування є занадто спрощеною, а розрахунки об'єму металу, який вирізається із впадини зубців не відповідають дійсним значенням.

На основі проведено аналізу можна зробити такі висновки.

Параметри зрізів мають значний вплив на перебіг процесу різання, силові і теплові явища при зубофрезеруванні, від них залежать стійкість інструменту, пружні коливання і вібрації, тривалість і продуктивність обробки, собівартість технологічної операції. Проте, відомі на сьогодні способи і методи розрахунку і визначення параметрів зрізів в процесі нарізання зубчастих коліс дисковими фрезами в умовах неперервного обкочування у більшості випадків не враховують дійсних кінематичних схем, базуються на спрощених підходах, не дають змоги встановити їх як функції кута повертання фрези, не розділяють їх значень між окремими активними зубцями та лезами цих зубців. Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно розробити методику визначення та залежності для розрахунку параметрів зрізів у радіально-коловому способі як основи для комплексного та системного дослідження і проектування технологічних процесів зубообробки.

1.3.2. Моделювання та розрахунки сили різання зубофрезерування.

Сила різання та її складові визначають величину пружних деформацій, інтенсивність коливань і вібрацій під час різання, впливають на точність і якість утворених поверхонь та стійкість різальних інструментів, тому розрахунку і моделюванню сили і моменту різання, методам їх

експериментального дослідження при виготовленні зубчастих коліс відводиться велика увага. Внаслідок того, що в РК-способі використовують дискові фрези малої товщини, її зубці, порівняно із масивними та жорстким зубцями черв'ячної фрези зазнають великих силових і теплових навантажень, а сама дискова фреза схильна до підвищених пружних деформацій (особливо в боковому напрямку) та коливань. З цього випливає важливість вирішення цієї проблеми для процесу зубообробки на основі РК-способу.

Аналіз літературних джерел в цій галузі показав наступне. Найбільша кількість робіт, в яких досліджують силові параметри присвячена процесу черв'ячного зубофрезерування. У відомих працях наведено різноманітні підходи до розрахунку сил і моментів різання, методи їх експериментального дослідження, способи вимірювання та фіксації параметрів. Так, у роботі [80] окружна складова сили представлена в функції від режимів різання:

$$P_z = C_p \cdot m^{1.4} \cdot s^{0.95} \cdot t^{1.4} \cdot V^{-0.28} \cdot k_{10} \cdot k_m \cdot 9.8, \text{ Н.} \quad (1.1)$$

Цю залежність можна використати для процесу різання дисковою фрезою. Подібна формула, отримана експериментально для дотичної на колесі сили зубофрезерування з зустрічною і попутною подачею в діапазоні швидкостей $V = 15 - 60$ м/хв. подана в статті [81]:

$$P_{t\max} = C_p \cdot m^{1.59} \cdot s^{0.78} \cdot z^{0.28} \cdot 1,025^{-\gamma} \cdot K_V \cdot k_{zn}. \quad (1.2)$$

Для розрахунку сили різання при зустрічному зубофрезеруванні багатозахідною фрезою на основі багатофакторного експерименту отримано наступну залежність [82]:

$$P_\tau = C_l \cdot V^{-0.17} \cdot s^{0.8} \cdot m^{1.4} \cdot z_k^{0.18} \cdot k^{0.85}. \quad (1.3)$$

Формули (1.1-1.3) емпіричні, а параметри прив'язані до конкретних умов, в яких вони отримані, внаслідок чого вони мають обмежену область застосування.

У роботі [64] на підставі залежностей, які використовують в ФРН для розрахунків сили різання автором отримано такий вираз для визначення головної складової сили різання зубофрезерування черв'ячними фрезами:

$$F_c = K \cdot m^a \cdot \left(\frac{s}{m}\right)^b \cdot C_z \cdot C_x \cdot C_\beta \cdot C_i \cdot C_A \cdot t^d \cdot C_v \cdot C_F \cdot C_W, \quad (1.3)$$

в якій враховано вплив модуля (m), осьової подачі (s) і швидкості різання (C_v); кут гвинтової лінії (C_β), кількість зубців (C_z) і число заходів фрези (C_i); радіус округлення леза матеріал фрези (C_W); діаметр фрези (C_A); напрямок подачі (C_F). Незважаючи на те, що тут враховано багато чинників процесу, вони отримані для помилкової схеми різання, яка не враховує повороту передньої поверхні зуба і переміщення фрези в осьовій подачі при різанні.

Для розрахунку максимального крутного моменту під час чистового зубофрезерування приведено таку залежність моменту на осі фрези [83]:

$$M = C_M \cdot s^{0,9} \cdot t^{0,4} \cdot m, \quad (1.4.1)$$

з чого:

$$P_z = C_M \cdot s^{0,9} \cdot t^{0,4} \cdot m \cdot R_{a_fp}^{-1}, \quad (1.4.2)$$

проте, значення коефіцієнта у цій формулі, $C_M = 4$ дано лише для матеріалу з твердістю HB 240.

Відомо, що в черв'ячному зубофрезеруванні сила різання визначається товщиною і шириною зрізів, формою та розмірами поперечного перерізу зрізу на кожному активному лезі, залежить від механічних властивостей заготовки, контактних деформацій на задніх поверхнях зубців, кількості активних зубців на рейці, рівня торцевого перекриття у верстатному зачепленні фреза – зубчасте колесо, та від умов невірного різання, а її середнє і максимальне значення на окремих рейках за один оберт фрези періодично змінюються. Проте, у відомих формулах (1.1-1.4.2) для розрахунку сили зубофрезерування цього не враховано.

Головну складову сили зубофрезерування в функції від середніх значень товщини і ширини зрізів черв'ячної фрези і питомої сили різання подано в праці Е.М.Гуліди [84], в якій складову P_z сили подано як функцію і

$$P_z = p \cdot a_{zcp}^{1-m} \cdot b_z \cdot z_i^l \cdot k_\gamma \cdot k_h \cdot k_{coж} \cdot \quad (1.5)$$

Однак, параметри зрізів за цією формулою розраховані як для фрезерування площини циліндричною фрезою, тому для обкочувального зубофрезерування вона не підходить.

У багатьох відомих працях розробляється сила різання при фрезеруванні і зубофрезеруванні з допомогою дискової фрези. Так, в статті [25] досліджено навантаження на дискову фрезу та зроблено висновки, що використання цього способу можливе для нарізання зубчастих коліс не вище модуля 6 мм, оскільки при більших модулях збільшується нерівномірність припуску на зубцях інструменту. Проте, схему різання дискової фрези у цій роботі розглядається за аналогією до кругової протяжки, що не відповідає реальній кінематиці РК-способу.

Результати експериментального визначення сили різання в процесі нарізання зубчастих коліс РК-способом наведено в статті [85].

Дослідження проводили за методикою трьохфакторного плану для трьох параметрів режиму різання. За зміною потужності процесу різання залежно від величини подачі, глибини і швидкості різання визначено співвідношення між складовими сили різання зубофрезерування дисковою фрезою. Встановлено, що точність коліс, яку досягли в експерименті відповідає 10-11 ступеням точності. Проте, дослідження проведені у вузькому діапазоні робочих режимів та для обмеженого числа показників точності зубчастих коліс.

В роботі [86] приводяться результати експериментального визначення тангенційної і радіальної складових сили різання, що діють на заготовку в радіально-коловому способі. Сили визначалися з допомогою тензодавачів опору, встановлених на двох перпендикулярних площинах спеціального силового перетворювача, який виконував роль верхнього центра робочої

оправки (рис.1.11), чотирьохканального підсилювача УТ4-1 і вимірювального комплексу з 2-х мілівольтметрів та 2-х міліамперметрів (рис.1.10).

Недоліком цього експерименту можна вважати складність установки і неточності у визначенні сил внаслідок одностороннього їх вимірювання (з боку верхнього центра контрпідримки).

У наш час дослідженням процесу нарізання зубчастих коліс контурним фрезеруванням дисковою фрезою, який близький до РК-способу займаються в НТТ України «КПШ», ІНМ НАН України та в Інституті металорізальних верстатів Штудгардського університету. Так, в роботі [9] наведено результати експериментальних досліджень сили різання та розрахунку її складових у методі контурного зубонарізання при виготовленні різних видів зубчастих коліс: евольвентних, з зачепленням Новикова та циклоїдальних з використанням станку на базі 4-х координатного оброблювального центру з обертовим столом.



а



б

Рис.1.11. Динамометричний центр (а) і вимірювальний комплекс для визначення сили різання

В Інституті надтвердих матеріалів НАНУ проводилися дослідження силових характеристик процесу, який мав імітувати процес контурного зубофрезерування. Різання здійснювали дисковою фрезою, встановленою з

ексцентриситетом на осі горизонтально-фрезерного верстата при поперечній осьовій подачі стола з призматичною заготовкою (рис.1.12); сили різання вимірювали з допомогою універсального динамометра УДМ [87].

На основі експерименту виведено такі залежності для тангенційної і осьової складових сили різання:

$$P_z = 4141 \cdot n^{-0,263} \cdot s^{0,263} \cdot t^{0,780};$$

$$P_x = 854,3 \cdot n^{-0,398} \cdot s^{0,228} \cdot t^{1,192}.$$

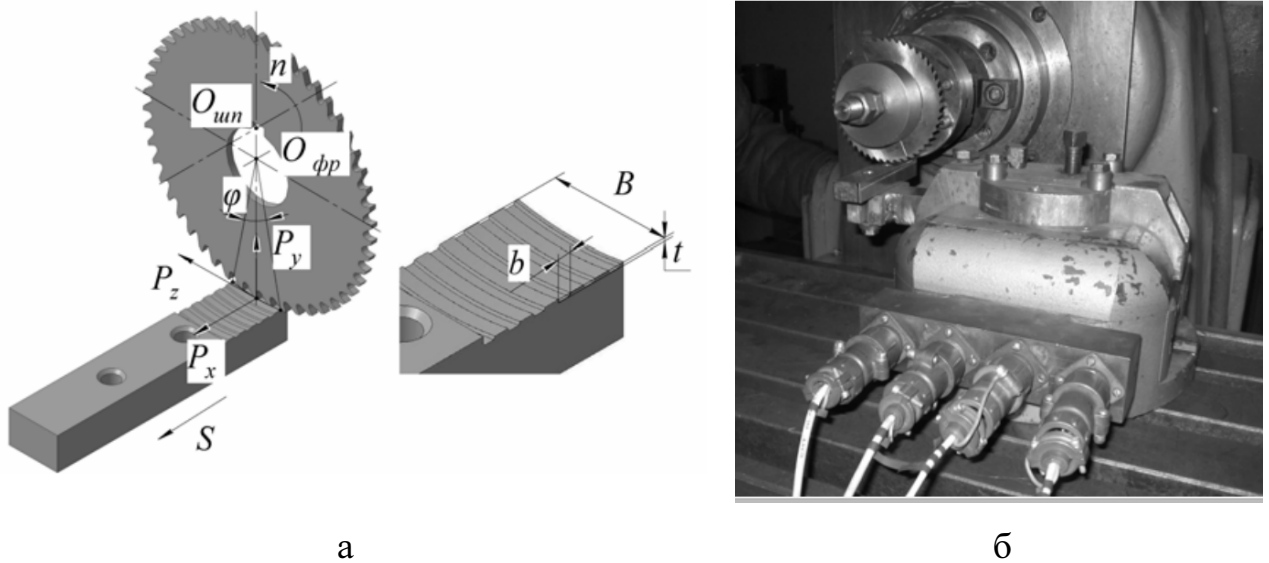


Рис.1.12. Схема оброблення і установка для вимірювання сили різання імітації контурного фрезерування

У цьому експерименті відсутня реальна перехідна поверхня, яка утворюється внаслідок обертання заготовки та осьового переміщення фрези, як це має місце при зубофрезеруванні, тому отримані залежності не відповідають умовам контурного зубофрезерування.

Експериментальне дослідження технологічних складових сили контурного зубофрезерування описано також у статті [88]. Тут приведено методику досліджень, описано комплект вимірної апаратури і визначено складові P_x , P_y і P_z сили різання в одній впадині на 6-ти зубцях фрези по двох системах профілів. На основі осцилограм розроблено залежності для вирівнювання цих сил в одній впадині зміною осьової подачі по трьох осях, в

основу яких покладено положення про вирівнювання продуктивності усунення металу при прорізанні впадин. Залежності мають такий вид:

$$\left| P_x \right| = \frac{k_x \cdot P_c}{S_x}; \left| P_y \right| = \frac{k_y \cdot P_c}{S_y}; \left| P_z \right| = \frac{k_z \cdot P_c}{v_z}, \quad (1.6)$$

де P_x, P_y, P_z - технологічні складові сили різання; P_c – «продуктивність зняття стружки», мм³/с; S_x, S_y - «швидкість подачі»; v_z – швидкість різання; k_x, k_y, k_z – коефіцієнти, які залежать від багатьох конструктивних, технічних і технологічних параметрів процесу, а також від матеріалу заготовки та інструменту.

Проте, як було вказано вище, розрахунок параметра P_c базується на спрощеній методиці параметрів зрізів, а коефіцієнти k_x, k_y, k_z в даній формулі не визначено, хоча їх значення змінюються при кожній зміні умов технологічної операції.

В РК-способі зубонарізання при різанні на повну глибину профіля в контакт з заготовкою перебуває більш, ніж один зубець, а сила різання визначається умовами роботи і різання усіх зубців, які одночасно здійснюють різання. В таких умовах результуюча сила, яка діє на інструменті заготовку визначається сумарним силовим навантаженням на усіх активних лезах і зубцях, яке утворює силове поле.

У працях [89-91] на основі параметрів зрізів тонких дискових відрізних і прорізних фрез змодельовано бокову силу різання та осьові деформації і пружні коливання дискових фрез з дрібними зубцями. Отримані авторами залежності дають змогу отримувати миттєві значення сили різання і її складових та кількість активних зубців залежно від подачі і глибини різання. Проте, при фрезеруванні пазів схема різання є простою порівняно з зубофрезеруванням при неперервному обкочуванні та включає 2 робочі рухи – обертання фрези і осьову подачу, тому результати дослідження даного процесу не можна використати для зубофрезерування.

Доцільність використання поняття «силове поле» при різанні черв'ячною фрезою та шліфувальним кругом, як об'ємне навантаження, що неперервно та періодично змінюється показано в роботах [92-94]. Це поняття може бути використано також для описання зубофрезерування дисковою фрезою при неперервному обкочуванні, як це відбувається в РК-способі внаслідок того, що тут також присутнє об'ємне силове навантаження внаслідок одночасного різання багатьма лезами та зубцями дискової фрези.

На основі наведеного вище можна зробити наступні висновки по розділу 1.4.

1. Більшість відомих публікацій, в яких досліджують методи і способи моделювання та розрахунку сили різання присвячені процесу зубофрезерування черв'ячними фрезами.

2. Основні відомі залежності отримано експериментальним шляхом, а їх використання обмежене тими умовами, в яких проводилися дослідження.

3. Процесом зубофрезерування радіально-коловим способом займаються дослідники в Україні та ФРН, проте на сьогодні ця тема недостатньо вивчена. Відсутні підтверджені та надійні методики і залежності, які можна використовувати для моделювання та розрахунку параметрів зрізів і сили різання зубофрезерування дисковими фрезами в умовах непевного обкочування в РК-способі.

Висновки

1. В сучасному машинобудівному виробництві використовується велика кількість технологічних методів і способів нарізання циліндричних зубчастих коліс, однак більшість з існуючих методів та способів має вузьку область використання, обмежену універсальність, вони орієнтовані на спеціальні вимоги і типи виробництва, характеризуються великою собівартістю через складність різальних інструментів.

2. Зубофрезерування черв'ячними фрезами, як основний спосіб виготовлення зубчастих поверхонь циліндричних коліс має вади, закладені в

схемі різання черв'ячної фрези і методі безцентроїдного формоутворення, які не можна усунути, тому цей спосіб вичерпав можливості для істотного покращення.

3. Створено новий радіально-коловий спосіб нарізання коліс з синусоїдальним профілем зубців, який характеризується високою універсальністю, продуктивністю зняття металу та матеріальними витратами на його реалізацію. При зміні закону руху дискової фрези, відмінному від рівномірного, цим способом можна нарізати колеса будь-якого профілю, в т.ч. евольвентні.

4. Попри значний обсяг наукових досліджень та праць, присвячених цьому способу, на даний час відсутні методики розрахунку та математичні моделі, які пов'язують умови обробки, конструктивні, технічні та технологічні чинники і параметри процесу радіально-колового зубофрезерування з показниками якості поверхонь зубців, точності зубообробки і ефективності цього процесу.

5. Відсутні рекомендації для обґрунтованого вибору раціональних робочих режимів, параметрів дискових фрез, характеристик верстата залежно від технічних умов на виготовлення зубчастих коліс, які створюють основу для практичного використання та впровадження радіально-колового способу у виробництво, проектування різальних інструментів, нового зубообробного обладнання та систем керування.

Мета і задачі досліджень. *Мета роботи* - обґрунтування вибору раціональних конструктивних, технічних і технологічних параметрів, які забезпечують задану якість зубчастих поверхонь в процесі радіально-колового способу зубофрезерування на підставі наскрізного комплексного моделювання і врахування впливу пружних деформацій на точність зубооброблення

Задачі досліджень

1. Удосконалити відомі методики для описання і визначення параметрів

перехідної поверхні, в якій відбувається різання дискової фрези в умовах неперервного обкчування на зубофрезерному верстаті, адаптувати відомі способи вирішення цієї задачі до умов радіально-колового зубофрезерування з урахуванням кінематики цього способу.

2. Розробити методику визначення параметрів зрізів дискової фрези на окремих лезах, зубцях та сумарних параметрів з урахуванням багатозубчастого різання в функції від повороту дискової фрези в межах одної впадини між зубцями.

3. Вивести залежності для розрахунку товщини, ширини і площі поперечного перерізу зрізів. Дослідити залежності зміни по куту повороту фрези параметрів зрізів від умов оброблення, виявити умови різання і нерівномірності усунення припуску та процесу різання в РК-способі зубофрезерування.

4. Отримати залежності для розрахунку сили різання та її складових в функції від параметрів зрізів, міцності матеріалу заготовки та інтенсивності пластичного деформування зрізуваного шару. Встановити залежність сили різання та її нерівномірності від початкових умов – модуля, кількості зубців, діаметра фрези, осьової подачі фрези.

5. Дослідити вплив сили різання на похибку профіля зубчастих колесіс, викликану пружними деформаціями і закономірності формування мікронерівностей профілів.

6. Провести експериментальні дослідження для перевірки теоретичних положень роботи. Розробити методику обґрунтованого вибору та призначення параметрів процесу зубофрезерування радіально-коловим способом і рекомендації для його використання.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗРІЗІВ ДИСКОВОЇ ФРЕЗИ В ПРОЦЕСІ ЗУБОНАРИЗАННЯ ЗА РК-СПОСОБОМ

2.1. Теоретичні основи розрахунку параметрів зрізів. Виведення основних залежностей

Для моделювання параметрів зрізів в РК-способі, з урахуванням відмінності його кінематики використано основні положення, розроблені для черв'ячного зубофрезерування [71, 72]. Згідно з цією методикою, в будь-який момент часу різання багатозубим інструментом здійснюється в просторі між сформованою формою впадини і необробленою поверхнею заготовки, яка представлена перехідною поверхнею. Вона утворюється контурами зубців, які здійснювали різі в попередніх циклах взаємного переміщення, приведених до лінійного і кутового положення даного зубця, а їх переріз визначає миттєву форму та розміри перерізу зрізу для цього зубця.

В РК-способі результуючий кінематичний рух різання складається із таких рухів (рис.2.1, рис.2.2) [95]:

- обертання фрези навколо кінематичної осі з центром в т. $O_{кн}$ – головний рух різання;
- обертання заготовки в русі обкочування - руху колової подачі;
- переміщення інструменту з інструментальним супортом – рух осьової подачі.
- четвертий рух (конструктивний) – осциляція геометричної осі фрези і зовнішнього діаметра навколо її кінематичної осі. Внаслідок ексцентриситету фрези на величину e радіус різання ρ при незмінному радіусі виступів зубців фрези $R_{a_фр}$ неперервно змінюється за кутом повороту в межах $0-360^0$ і характеризується певним миттєвим значенням ρ_i . На ділянці руху фрези в напрямку збільшення глибини зуба колеса, тобто, в діапазоні повороту від 0 до 180^0 миттєвий радіус зростає, а на ділянці виходу – в межах $180^0 - 360^0$ – зменшується.

Процес різання в одній впадині прийнято дискретним в кутових положення фрези ϕ_i , які визначаються її кутовим кроком, тобто $\tau_{фр} = \frac{360}{Z_{\phi}}$.

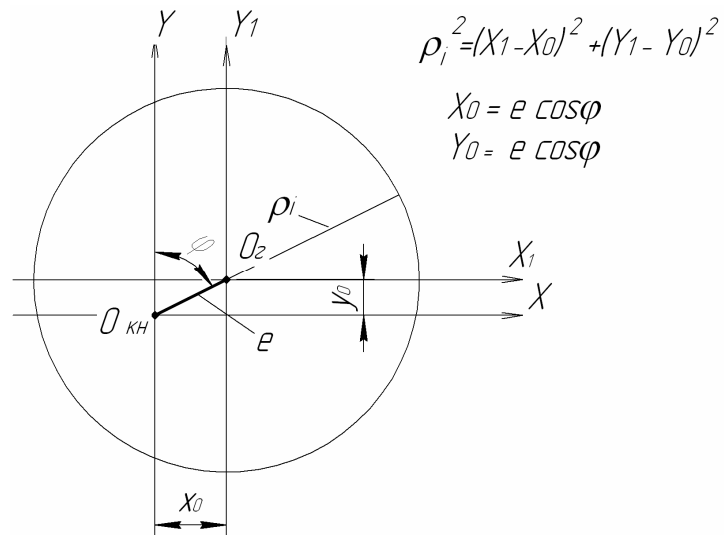


Рис. 2.1. Радіус-вектор виступів і-го зубця фрези

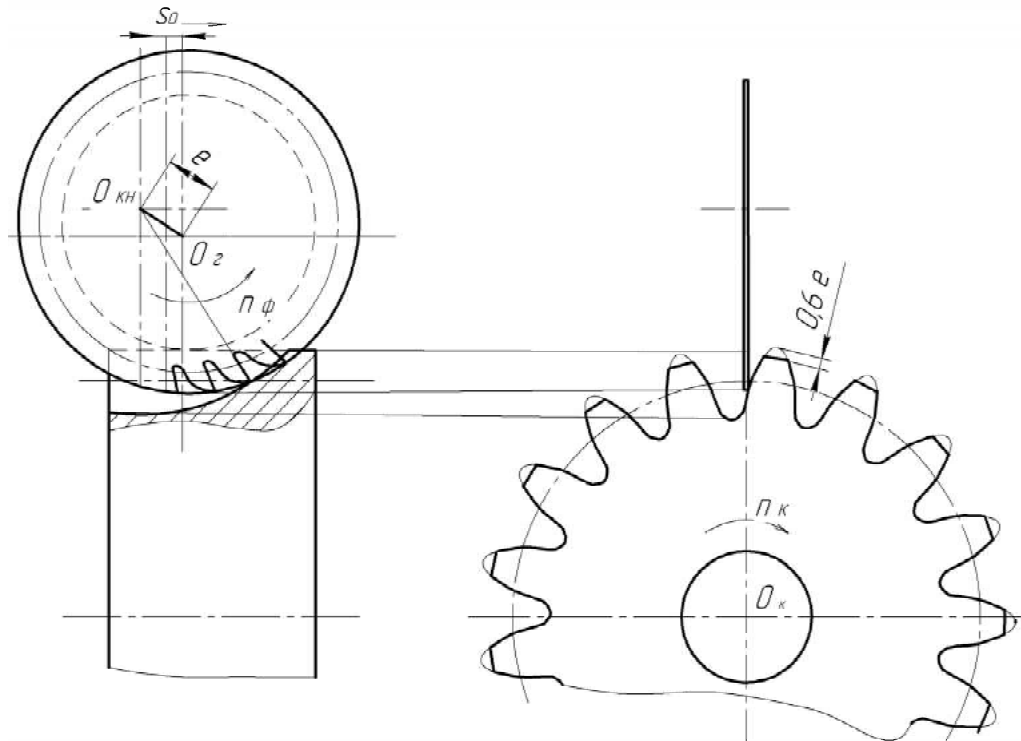


Рис. 2.2. Схема формоутворення і різання в РК-способі

Цьому куту відповідає кут повороту заготовки, визначений, як кут профілюючого різання [96], або одиничний кут обкочування заготовки ψ :

$$\psi = \frac{\tau_{фр}}{Z_k} = \frac{360}{Z_f \cdot Z_k}, \quad (1.1)$$

де Z_f, Z_k – кількість зубців фрези та колеса.

В довільному проміжному положенні i – го зубця перехідна поверхня розглядається утвореною:

- даним, i -м зубцем, з миттєвим радіусом його виступів ρ_i ;
- цим же зубцем у попередньому по осьовій подачі фрези положенні $s_{o_{i-1}}$, що має такий же миттєвий радіус: $\rho_i = \rho_{(i-1)s}$, але з центром, зміщеним на величину осьової подачі в протилежному від переміщення інструменту напрямку;
- попереднім по подачі на зуб фрези $s_{z_{i-1}}$ зубцем з радіусом виступів $\rho_{(i-1)\phi}$, слід якого повернений у напрямку обертання заготовки на одиничний кут обкочування.

Координати вершини даного зубця у кутовому положенні, що визначається кутом φ_i дорівнюють:

$$x_i = (R_{a\phi} + e \cdot \cos \varphi_i) \cdot \cos \frac{\varphi_i}{Z_k}; \quad (2.2)$$

$$y_i = (R_{a\phi} + e \cdot \cos \varphi_i) \cdot \sin \frac{\varphi_i}{Z_k}; \quad (2.3)$$

$$\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}. \quad (2.4)$$

2.1.1. Моделювання параметрів зрізів на вершинних лезах. Параметри зрізів змінюються в процесі руху зубця на довжині дуги контакту з заготовкою. Товщина зрізів на вершинному лезі зростає від нульового значення до максимального, що відповідає куту ϕ повороту фрези (рис.2.3), а на виході зубця з контакту з заготовкою знову зменшується до нуля. Значення кута Φ , що змінюється на кожному зубці внаслідок ексцентриситету, при розгляді даної та попередньої по осьовій подачі положеннях фрези рівне:

$$\Phi_{i \max} = \arctg \frac{\Delta x_i}{\rho_{\min}} = \arctg \left(\frac{\sqrt{2 \cdot R_{a\phi} \cdot e \cdot \cos \varphi_i - e^2 \cdot \cos^2 \varphi_i}}{R_{a\phi} - e} \right). \quad (2.5)$$

Величину Δx_i визначено із умови перетину кіл, що мають миттєві радіуси вершин виступів зубців ρ_i та ρ_{i-1} з поверхнею заготовки зубчастого колеса в

площині різання, що збігається з осовою площиною фрези. Схема утворення зрізу за слідом по осьовій подачі наведена на рис.2.3.

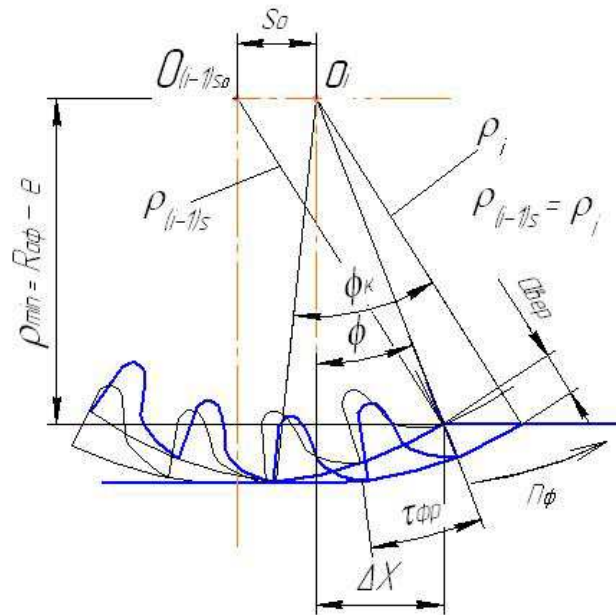


Рис.2.3. Визначення координат миттєвих радіус-векторів вершин сусідніх зубців у сліді осьової подачі

Координати перетину прямої $y = \rho_{min} = R_{af} - e$ з колом миттєвого радіусу ρ_i , яке перебуває в попередньому по осьовій подачі положенні $s_{o_{i-1}}$:

$$x_{1,2} = s_o \pm \sqrt{2 \cdot R_{af} \cdot e \cdot \cos \varphi_i - e^2 \cdot \cos^2 \varphi_i}, \quad (2.6)$$

звідки отримуємо:

$$\Delta x_i = \sqrt{2 \cdot R_{af} \cdot e \cdot \cos \varphi_i - e^2 \cdot \cos^2 \varphi_i}. \quad (2.7)$$

Після перетворень миттєва середня товщина зрізів на вершинному лезі a_{e_c} , що відповідає даному миттєвому радіусу і куту повороту фрези φ_i , приведена до площини передньої поверхні її зубця, буде писана залежністю (рис.2.4):

$$a_{вер_i} = \frac{\rho_i \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \text{ctg}^2 \Phi_i}} - \rho_{min}}{\cos \Phi_i}. \quad (2.8)$$

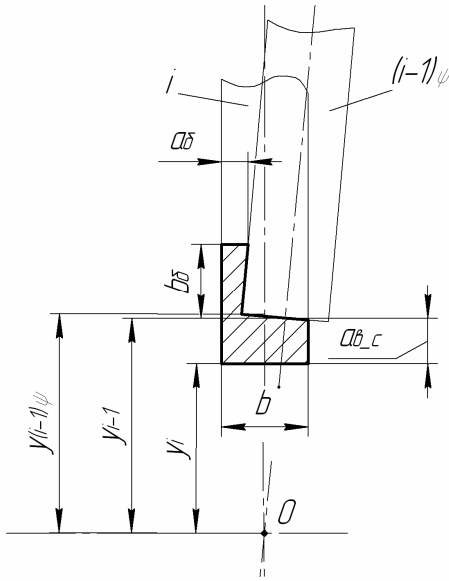


Рис.2.4. Миттєва перехідна поверхня як накладання слідів різів двома сусідніми зубцями по подачі на зуб фрези і повороту попереднього сліду на одиничний кут обкочування

Аналогічно знайдено товщину зрізів на вершинному лезі в попередньому положенні по подачі на зуб інструменту - $s_{z_{i-1}}$. Схема для визначення цієї складової товщини зрізів наведена на рис. 2.5.

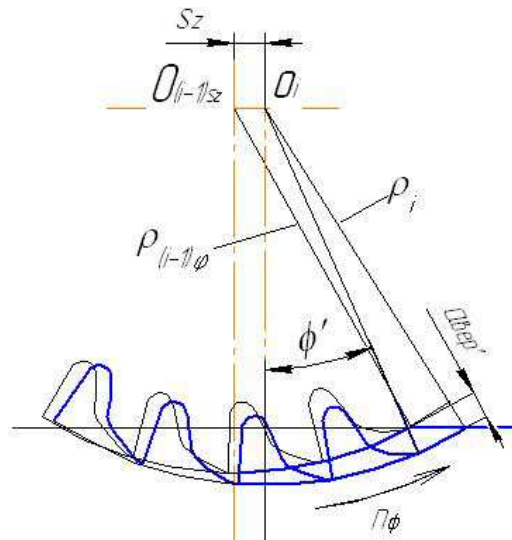


Рис.2.5. Визначення координат миттєвих радіус-векторів вершин сусідніх зубців від сліду по подачі на зуб фрези (б)

Кут Φ' повороту передньої поверхні для цього випадку рівний (рис.2.3):

$$\Phi' = \operatorname{arctg} \frac{\Delta x_i}{y'}, \quad (2.9)$$

де :

$$\Delta x_i = \sqrt{\rho_{i-1}^2 - \rho_{\min}^2} - \frac{s_o}{Z_{fp}}; \quad (2.10)$$

$$y' = \rho_i - \rho_{i-1}. \quad (2.11)$$

На основі отриманих залежностей зміна товщини зрізів по куту повороту фрези в межах $0 - 2\pi$ буде виражена функцією (2.8), та двома значеннями товщини зрізів, що відповідають кутам (2.5) та (2.9), а фактична товщина зрізу на певній ділянці буде визначатися меншим із двох миттєвих значень в кожному різі.

Площа миттєвого перерізу зрізу в i -му положенні зубця фрези дорівнює добутку фактичної товщини зрізу вершинним лезом $a_{вер_i}$ на ширину вершинного леза фрези $b_{фр}$, тобто:

$$S_{вер_i} = a_{вер_i} \cdot b_{фр}. \quad (2.12)$$

Площа зрізу (2.12) також є функцією кута повороту фрези і змінюється за тим же законом, що й $a_{вер}$.

Параметри зрізів визначаються в дискретних кутах повороту фрези, кратних кутовому кроку фрези: $\varphi_i = k_i \cdot \tau_{фр} = k_i \cdot \frac{360}{Z_{фр}}$, де $i = 1, 2, \dots, Z_{фр}$.

2.1.2. Моделювання параметрів зрізів на бокових лезах. На тій ділянці різання, де радіус наступного зубця фрези більший від попереднього (рис.2.5) в різанні приймає участь вершинне та бокове вхідне леза. На тій ділянці різання, де $R_{афр_i} < R_{афр_i+1}$ вершинне лезо не бере участі в різанні, а різання здійснюється тільки боковим вхідним лезом.

В обох випадках миттєві значення товщини і ширини зрізу на боковому вхідному лезі будуть рівні, відповідно:

$$b_{ex_i} = \left| \left(R_{афр_i} - R_{афр_i+1} \right) \right|; \quad (2.13)$$

$$a_{ex_i} = \left(R_{афр_i} + b_{ex_i} \right) \cdot \operatorname{tg} \psi, \quad (2.14)$$

Площа миттєвого перерізу зрізу на вхідному боковому лезу буде становити:

$$S_{ex_i} = a_{ex_i} \cdot b_{ex_i}. \quad (2.15)$$

Сумарна миттєва площа зрізів рівна сумі площ на вершинному та вхідному лезах і також змінюється по куту повороту фрези:

$$S_{\text{сум}_i} = \Sigma (S_{\text{вер}_i} + S_{\text{вх}_i}) .$$

Оскільки параметри зрізів змінюються по куту повороту фрези, то окрім миттєвих значень вони характеризуються максимальним та середнім за оберт фрези значеннями.

2.2. Дослідження параметрів зрізів

Миттєві величини радіус-векторів зубців визначалися в межах $0-360^0$ у послідовних кутах її повороту, кратним кутовому кроку фрези. Товщина зрізу визначалася в положенні зубця, що відповідало максимальній товщині, на куті Φ (2.5). Дослідження параметрів різання та графіки виконані з допомогою електронних таблиць Excel.

2.2.1. Товщина зрізів на вершинних лезах. На рис. 2.6 -2.8 наведено залежності максимальної товщини зрізів на вершинному лезі по куту повороту фрези від модуля (рис.2.6, рис.2.7) і осьової подачі (рис.2.8). На рис. наведені графіки зміни товщини зрізів на вершинних лезах для тих же початкових даних, при кількості зубців фрези 45. На рис.2.9 наведено графіки зміни товщини зрізів вершинними лезами від кількості зубців фрези для модуля 5 мм при подачі 2,5 мм/об., а на рис.2.10, рис.2.11 - від осьової подачі при значеннях модуля 2,5 мм і 7.5 мм. На рис.2.12 показані графіки залежності максимальної товщини зрізів за один оберт фрези від модуля; на рис. 2.13 і рис.2.14 - від осьової подачі фрези для модуля 5 мм і 7,5 мм, а на рис. 2.1 - від осьової подачі при модулі 2,5 мм. На на рис 2.16 – залежність максимальної за оберт фрези товщини зрізів.

Аналіз отриманих графіків дав змогу виявити загальні закономірності зміни товщини на вершинних лезах від основних чинників процесу зубофрезерування, які відображені на рис.2.12 - 2.15. З отриманих на основі

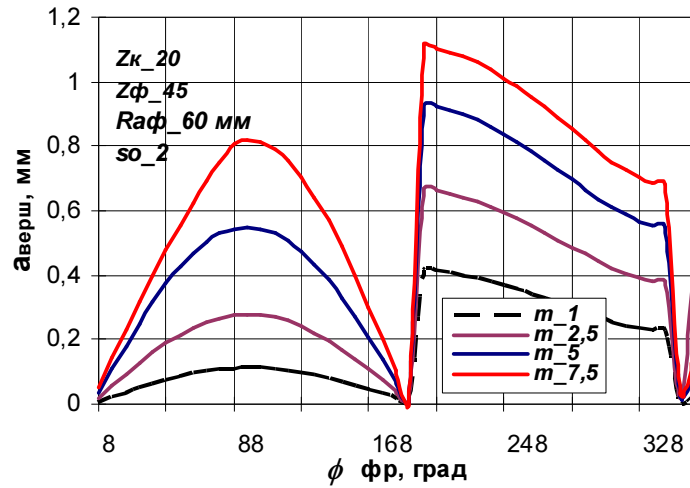


Рис.2.6. Залежність товщини зрізів вершинними лезами від модуля

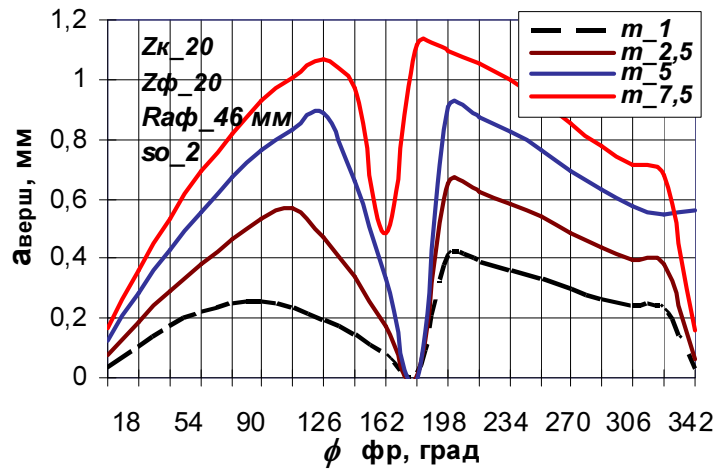


Рис.2.7. Залежність товщини зрізів вершинними лезами від модуля

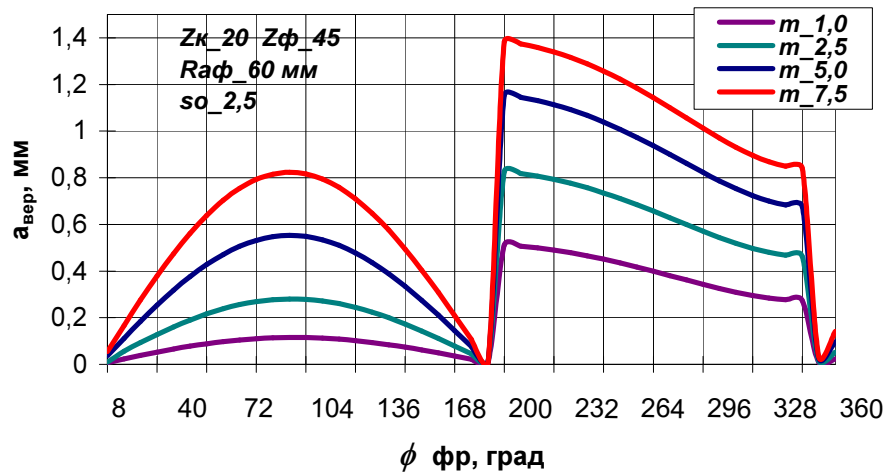


Рис.2.8. Залежність товщини зрізів вершинними лезами від модуля

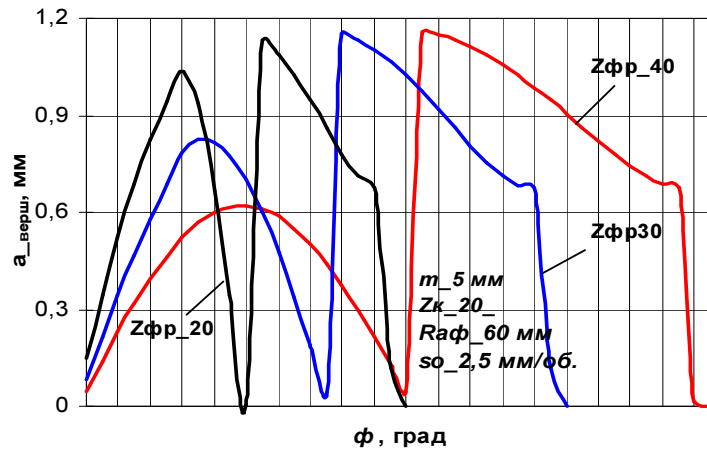


Рис.2.9. Залежність товщини зрізів вершинними лезами від кількості зубців фрези

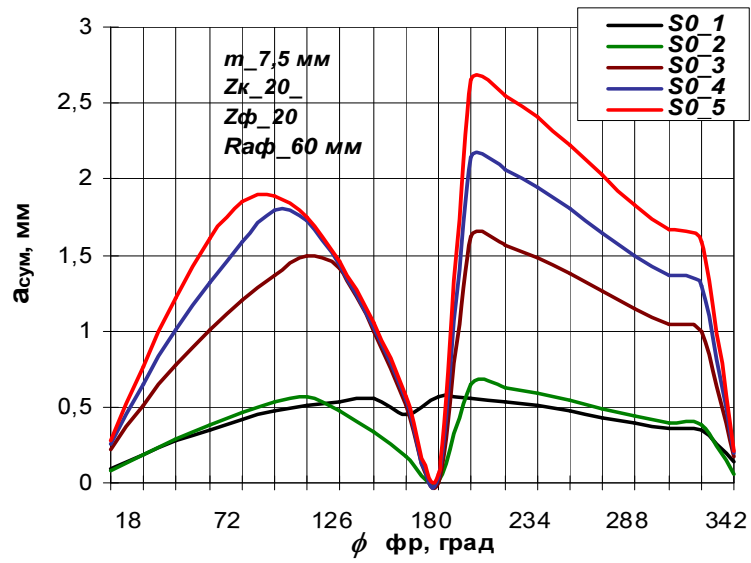


Рис.2.10. Залежність товщини зрізів вершинними лезами від осьової подачі

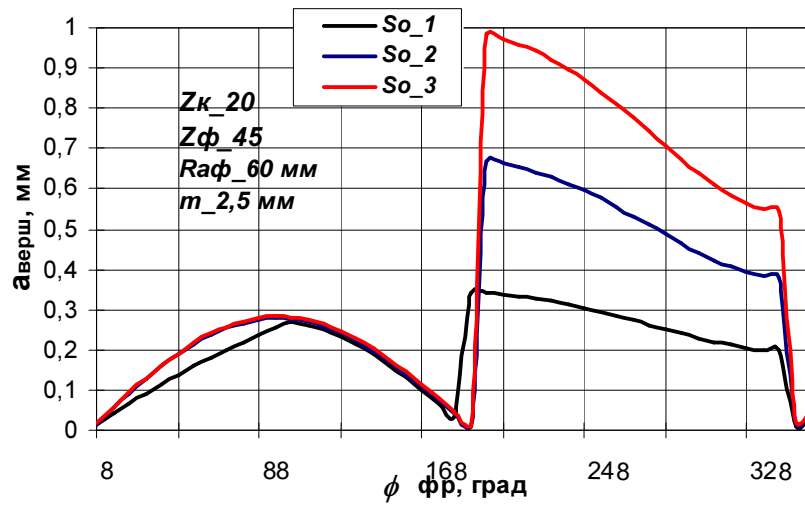


Рис.2.11. Залежність товщини зрізів вершинними лезами від осьової подачі

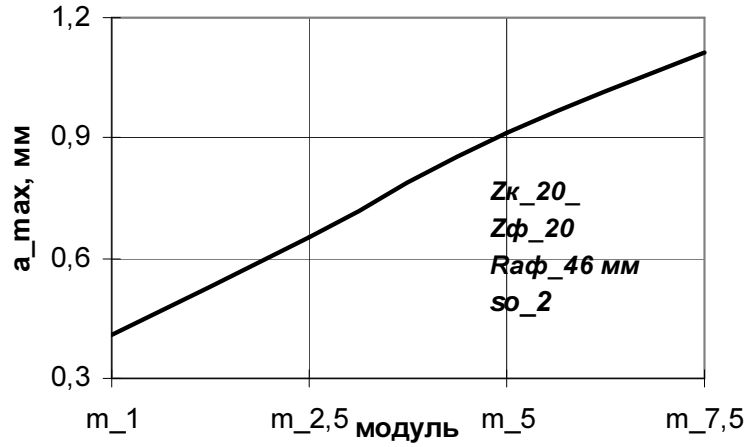


Рис.2.12. Залежність максимальної товщини зрізів вершинними лезами від модуля

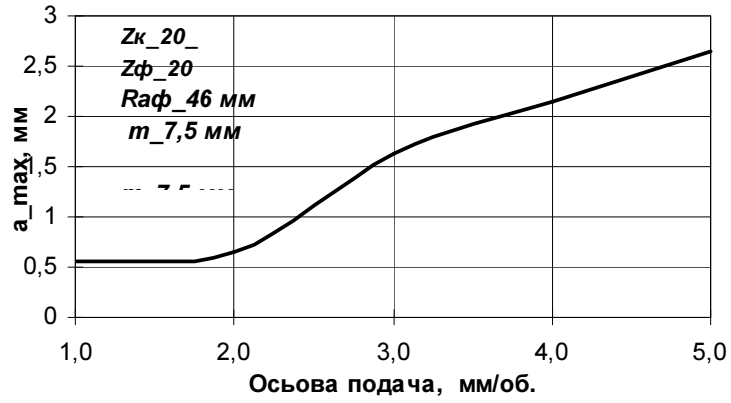


Рис.2.13. Залежність товщини зрізів вершинними лезами від осьової подачі $m = 7,5$ мм

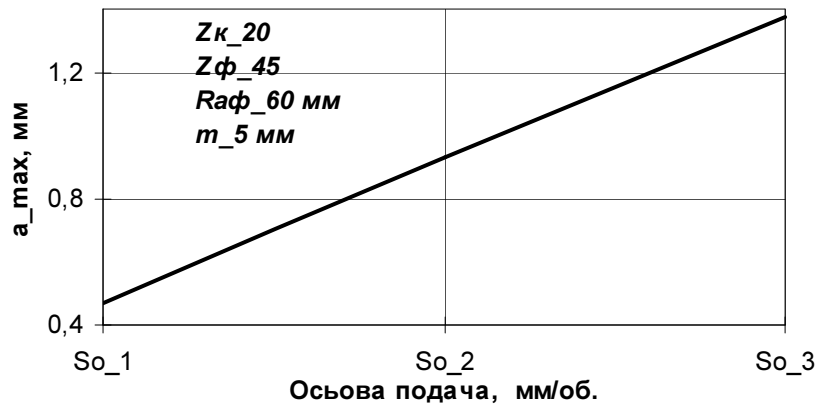


Рис.2.14. Залежність товщини зрізів вершинними лезами від осьової подачі $m = 5$ мм

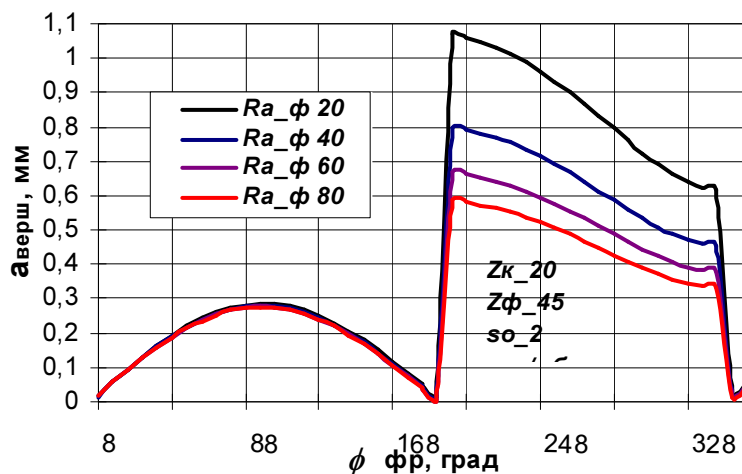


Рис.2.15. Залежність товщини зрізів вершинними лезами від діаметра фрези, $m=2,5$

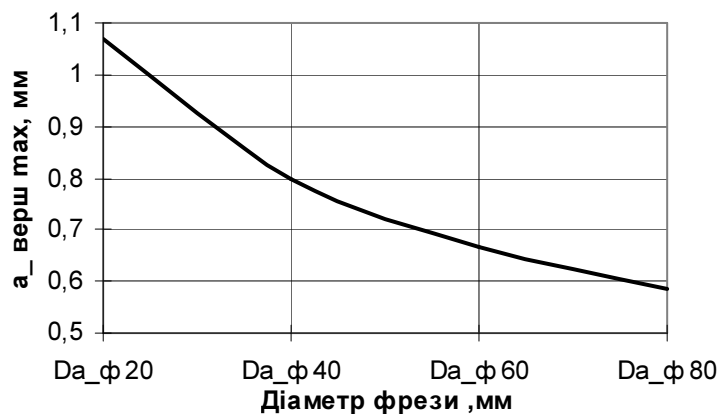


Рис.2.16. Максимальна товщина зрізів на вершинних лезах від діаметра фрези
 $m = 2,5$ мм; $s_o = 2$ мм/об.; $Zκ = 20$; $Zφp = 45$

моделювання даних впливає, що товщина зрізів на вершинних лезах має нелінійну залежність від кута обертання фрези, при цьому виділяються дві ділянки за максимальним її значенням: у середній частині ділянки врізання ($\cong 90^0$) та на початку ділянки виходу ($\cong 190^0 - 210^0$). У більшості випадків товщина перерізу зрізів на другій ділянці більша, а при збільшенні подачі і діаметра фрези значення цього параметру на обидвох ділянках вирівнюються. На ділянці врізання параметр $a_{i_вер}$ на вершинних лезах не залежить від осьової подачі та діаметра фрези, а на ділянці виходу така залежність присутня. За середнім значенням товщини із збільшенням діаметра фрези товщина зрізів зменшується; для малих модулів товщина прямо пропорційна осьовій подачі, а при збільшенні модуля ця залежність стає нелінійною.

2.2.2. Параметри зрізів на вхідних лезах. Нижче наведені графіки зміни товщини зрізів на вхідних лезах, визначені за методикою, наведеною в роз.2.1. На рис.2.17 показано ці залежності від модуля; на рис.2.18 - від кількості зубців фрези. Ширина зрізів вхідними лезами відображена на рис.2.19 – від

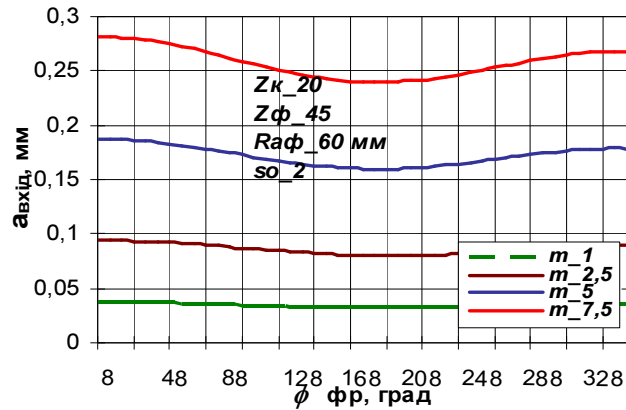


Рис.2.17. Залежність товщини зрізів вхідних лез від модуля
 $s_o = 2 \text{ мм/об.}; Z_k = 20; D_{a_\phi} = 120 \text{ мм};$

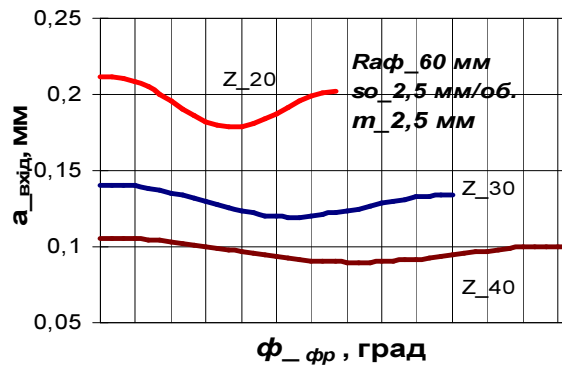


Рис.2.18. Залежність товщини зрізів вхідних лез від кількості зубців фрези
 $s_o = 2,5 \text{ мм/об.}; D_{a_\phi} = 120 \text{ мм}; m = 2,5 \text{ мм}$

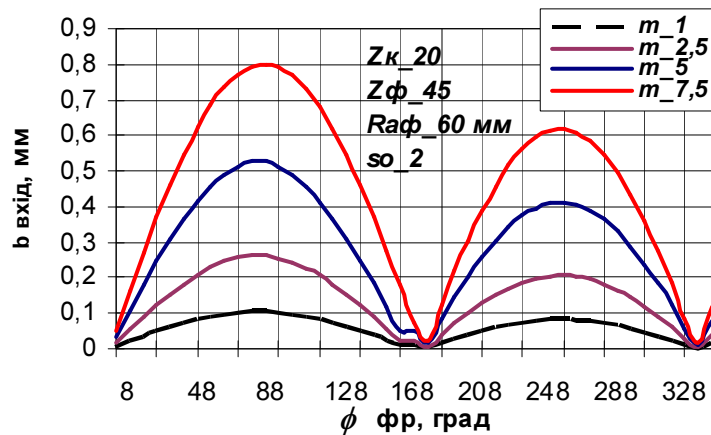


Рис.2.19. Залежність ширини зрізів на бокових вхідних лезах від модуля
 $s_o = 2 \text{ мм/об.}; D_{a_\phi} = 120 \text{ мм}; Z_k = 20; Z_{фр} = 45$

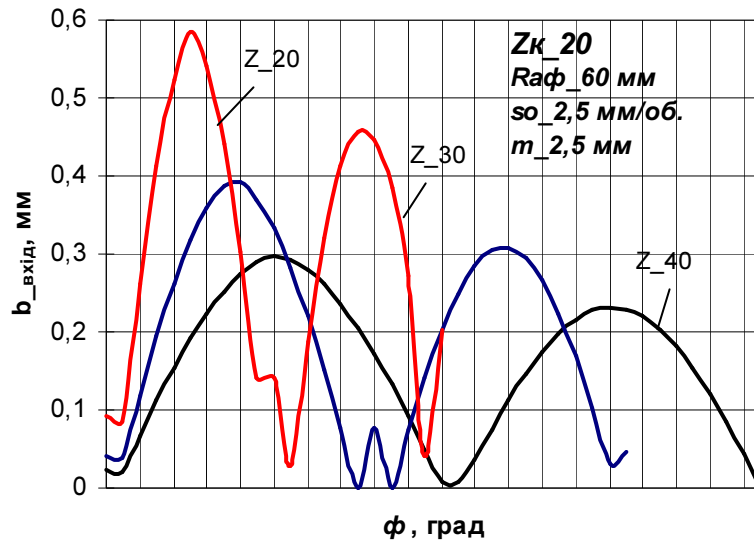
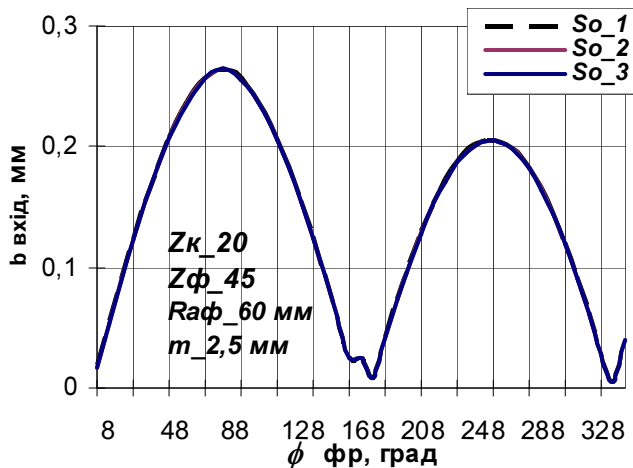


Рис.2.20. Залежність ширини зрізів на бокових вхідних лезах від кількості зубців фрези

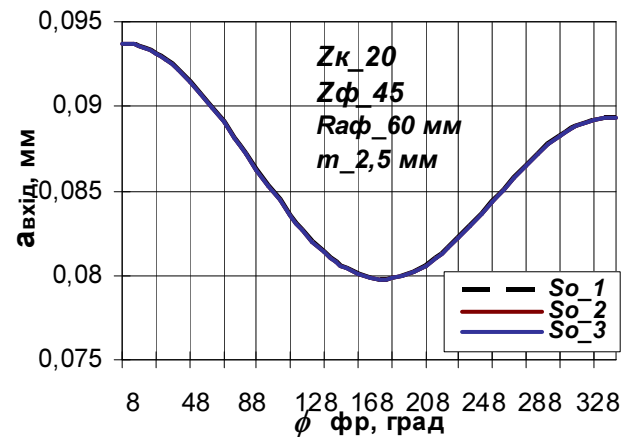
$$s_o = 2,5 \text{ мм/об.}; Z_k = 20; Z_{фр} = 45; D_{a_φ} = 120 \text{ мм}; m = 2,5 \text{ мм}$$

модуля, на рис.2.20 – від кількості зубців фрези.

Як впливає з рис.2.21, а, б значення ширини і товщини зрізів вхідними лезами не залежать від величини осьової подачі і при $s_o = 1 - 3$ мм/об. змінюються по куту повороту фрези за однаковими функціями.



а



б

Рис.2.21. Ширина і товщина зрізів вхідних лез при зміні величини осьової подачі

На відміну від вершинних лез товщина зрізів на бокових вхідних лезах набуває найбільших значень на ділянці візання, які на 20-27% мають більші

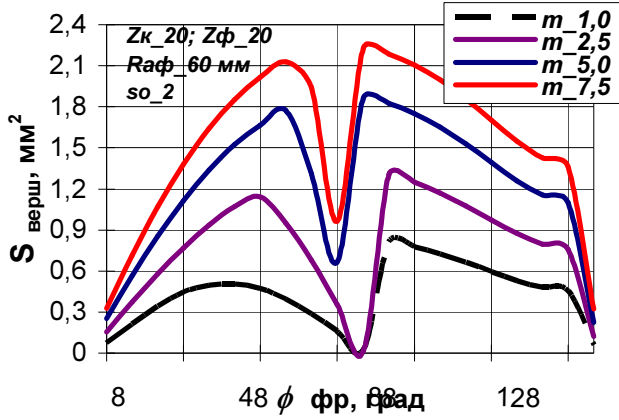
значення, ніж на ділянці виходу; як і параметр $a_{\text{верш}}$, товщина на бокових лезах не залежить від діаметра фрези.

2.2.3. Площа поперечного перерізу зрізів. На рис. наведено залежності площі зрізів на вершинних і бокових лезах фрези і сумарної площі для різних початкових даних: осьової подачі, параметрів інструментів і коліс.

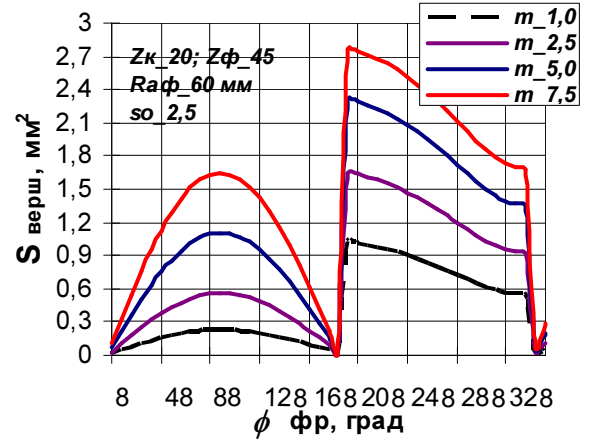
Як видно з досліджень, при збільшенні кількості зубців фрези на ділянці виходу площа зрізів на вершинних лезах збільшується, а на вхідних – зменшується. На ділянці виходу фрези площа зрізів не залежить від даного параметру, в той час, як на ділянці врізання ця залежність є істотна. Як і товщина зрізів, площа поперечного перерізу відображається функцією з двома максимумами, екстремумами яких припадають на ті ж ділянки, що й в функції товщини зрізів ($\cong 90^\circ$ на ділянці врізання та $190^\circ - 210^\circ$ на виході). В досліджуваному діапазоні параметрів процесу зубонарізання площа зрізів на вхідних лезах у 3-9 разів менша, ніж на вершинних лезах. Із зменшенням діаметра фрези, а також зменшення кількості її зубців спостерігається перерозподіл сумарної площі зрізів з вихідної ділянки на ділянку врізання. Як і товщина і ширина зрізів, на площу перерізу на ділянці входження не впливає діаметр фрези і зміна осьової подачі. Також загалом із зменшенням $Z_{\text{фр}}$ параметри зрізів збільшуються на обох ділянках різання.

З рис.2.23, а, б видно вплив модуля і кількості зубців фрези на площу перерізу зрізів: для малих модулів її величина при зменшенні діаметра фрези на вхідній ділянці зростає, а на вихідній – не залежить від $Z_{\text{фр}}$, а для великих модулів при зменшенні кількості зубців фрези різко зростає на вхідній ділянці і може бути більшою від площі зрізів на вихідній ділянці.

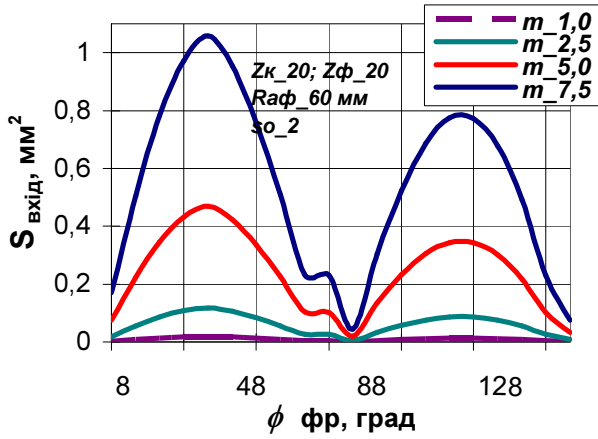
На основі рис.2.23, в, г можна дослідити вплив діаметра фрези і осьової подачі на сумарну площу перерізу зрізів на лезах зубців фрези. Як видно, на вхідній ділянці - ділянці зростання радіуса різання ρ_i цей параметр не залежить від діаметра фрези і величини подачі, а на виході – різко збільшується із зменшенням кількості зубців фрези та осьової подачі фрези.



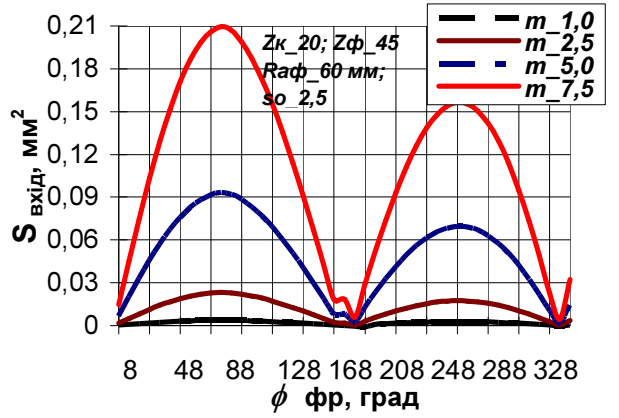
а



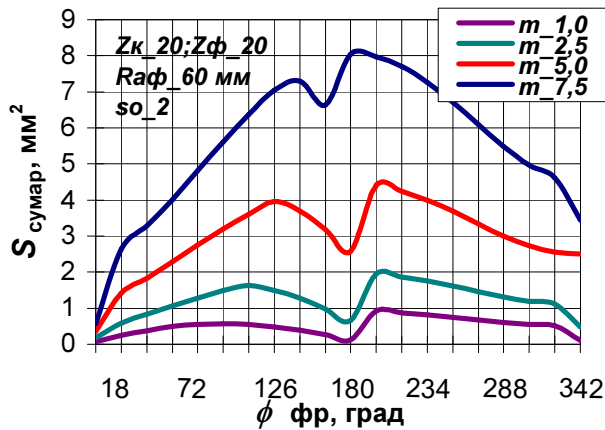
б



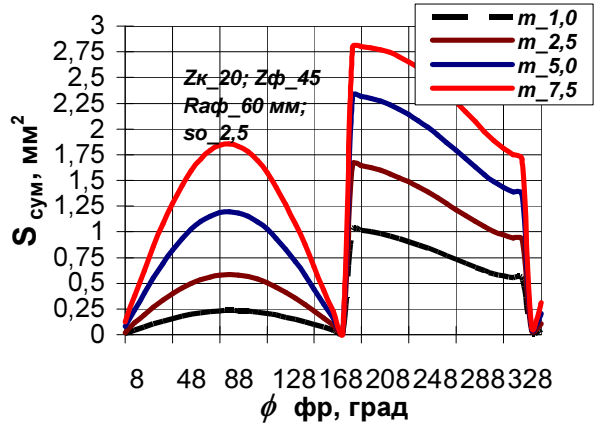
в



г



д



е

Рис.2.22. Графіки залежності площі перерізу зрізів на лезах і сумарної площі перерізу від модуля $s_o = 2$ і $2,5$ мм/об.; $Z_k = 20$; $Z_{фр} = 20$ і 45 ; $D_{aф} = 120$ мм

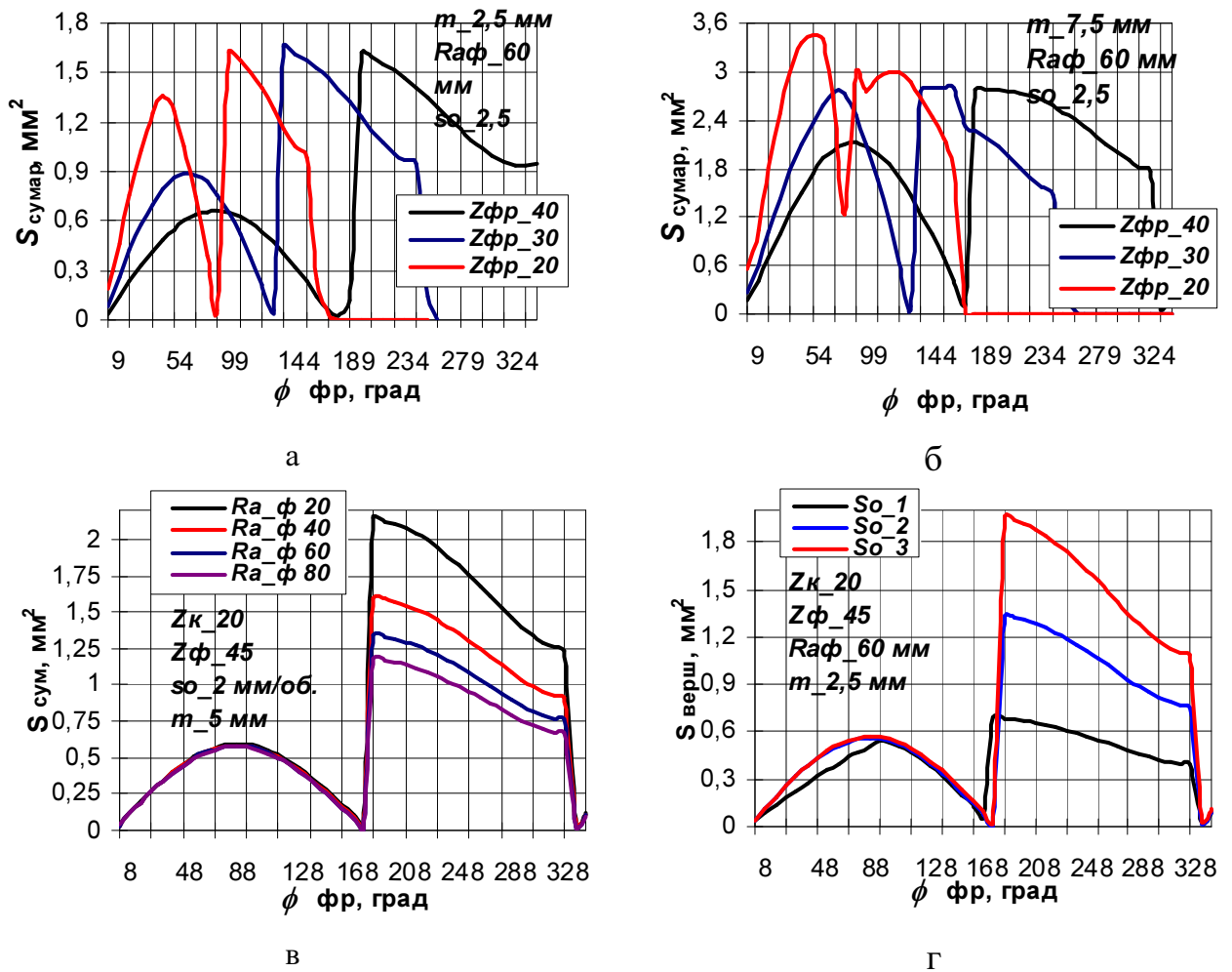


Рис.2.23. Залежність площі перерізу зрізів від кількості зубців фрези, діаметра фрези та осьової подачі

$$s_o = 2 \text{ і } 2,5 \text{ мм/об.}; Z_k = 20; D_{a\phi} = 120 \text{ мм}; m = 2,5 \text{ і } 7,5 \text{ мм}$$

2.2.4. Виведення залежностей для розрахунку усереднених значень параметрів зрізів. Для кількісної оцінки процесу зубофрезерування дисковою фрезою необхідно виявити залежність максимальної сумарної площі перерізу зрізів, які виконують вершинні і бокові леза, а також площі зрізів на бокових вхідних лезах за оберт дискової фрези від модуля, осьової подачі, кількості зубців дискової і зовнішнього діаметра фрези.

2.2.4.1. **Максимальна сумарна площа перерізу.** Представимо шукану залежність у виді степеневої функції:

$$S_{\Sigma} = C_S \cdot m^{k_m} \cdot s_o^{k_s} \cdot z_{\phi}^{k_z} \cdot D_{\phi}^{k_D} \quad (2.16)$$

та прологарифмуємо її ліву і праву частину:

$$\lg S_{\Sigma} = \lg C_S + k_m \cdot \lg m + k_s \cdot \lg s + k_z \cdot \lg z_{\phi} + k_D \cdot \lg D_{\phi} . \quad (2.17)$$

Виконаємо заміну змінних:

$$Y = \lg S_{\Sigma_{\max}} ; C = \lg C_S ; x = \lg m ; y = \lg s ; z = \lg z_{\phi} ; q = \lg D_{\phi} \quad (2.18)$$

та перейдемо до лінійного поліному:

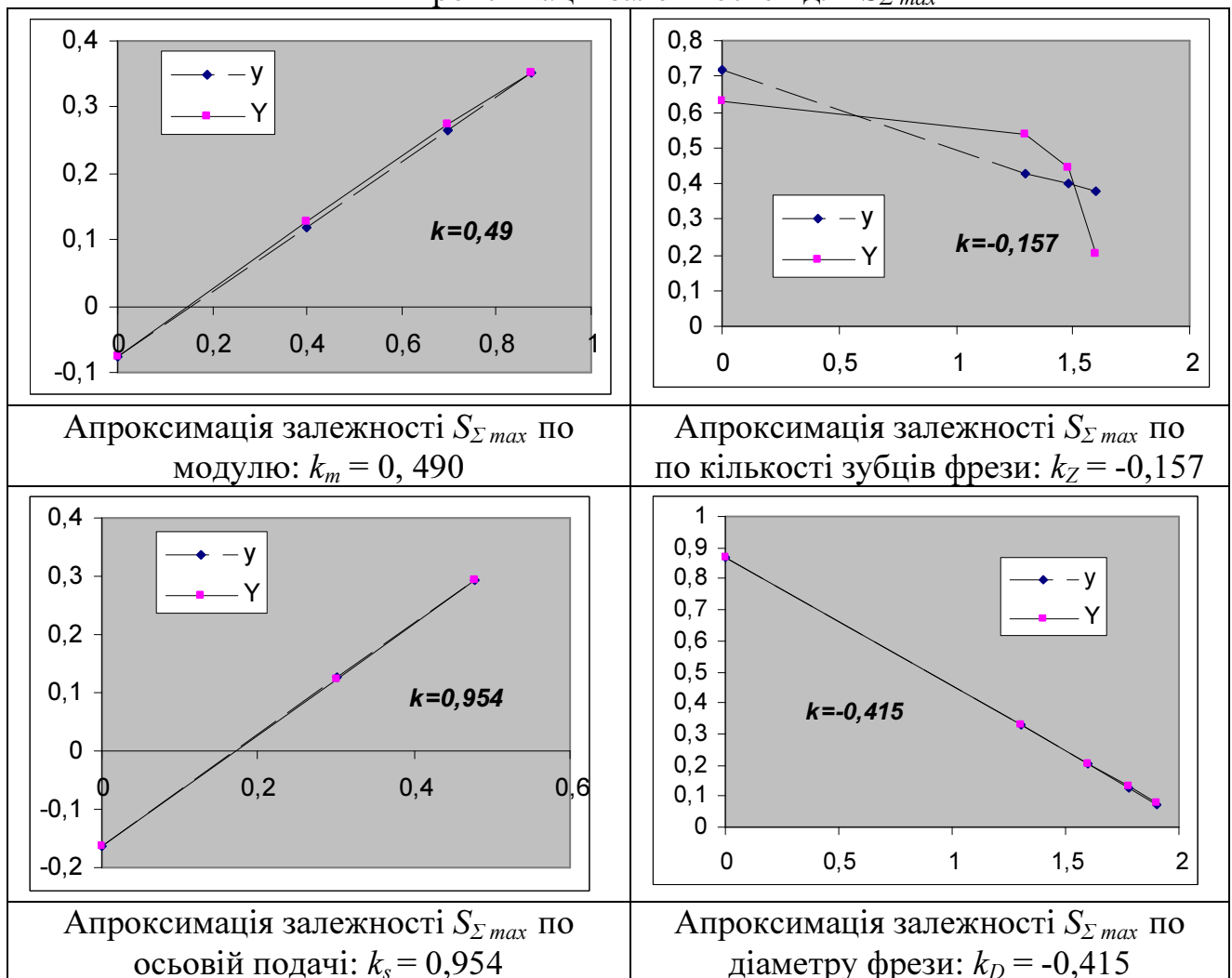
$$Y = C + k_m \cdot x + k_s \cdot y + k_z \cdot z + k_D \cdot q . \quad (2.19)$$

Для визначення кутових коефіцієнтів часткових рівнянь, які рівні показникам ступенів у виразі (2.16) використано графічний метод.

Результати визначення показників ступенів при параметрах процесу на основі графічного методу наведені в табл. 2.1, а дані для розрахунків коефіцієнта в формулі сумарної площі перерізу зрізів зведені у табл.2.2. Розрахунки виконані для товщини фрези 2 мм.

Табл.2.1

Апроксимація залежностей для $S_{\Sigma_{\max}}$



Дані для визначення коефіцієнта $C_{S_{\Sigma max}}$

$\frac{Z}{10}$	Модуль, мм	Подача, мм/об.	Діаметр фрези, мм	Кількість зубців фрези	$m^{0,49} \cdot s_o^{0,954} \cdot Z_{\phi}^{-0,157} \cdot D_{\phi}^{-0,415}$	Максимальна сумарна площа зрізів $S_{\Sigma max}$, мм ²
1	7,5	2,0	120	45	0,3923	2,254
2	2,5				0,0754	1,329
3	7,5	2,5		20	0,5512	3,456
4				40	0,4944	2,117
5	5	2,5		20	0,4519	2,490
6				40	0,4053	1,337
7	2,5	1,0		45	0,2149	0,682
8		3,0			0,6130	1,947
9	5	2,0		80	0,3805	1,1175
10				40	0,5073	2,216

 $\Sigma 4,0862$ $\Sigma 18,95$

$$C_{S_{\Sigma max}} = \frac{18,95}{4,0862} = 4,666.$$

Приймаючи до уваги середнє значення $C_{S_{\Sigma max}}$ і кутових коефіцієнтів лінійного рівняння (2.19), отримано таку залежність для максимальної сумарної площі зрізів дискової фрези в РК-способі:

$$S_{\Sigma max} = 4,67 \cdot m^{0,49} \cdot s_o^{0,954} \cdot Z_{\phi}^{-0,157} \cdot D_{\phi}^{-0,415}. \quad (2.20)$$

Вираз (2.20) вказує, що найбільший вплив на сумарну площу перерізу зрізів має осьова подача, меншу – модуль і діаметр фрези, при цьому залежність площі зрізів від кількості зубців фрези та її діаметра обернена. Площа зрізів при товщині фрези, що не дорівнює 2 мм, визначається, як $S_{\Sigma max} \cdot b_{факт} / 2$.

На рис. наведені графіки максимальної сумарної площі зрізів від модуля і числа зубців фрези та від осьової подачі і діаметра фрези, побудовані на основі залежності (2.20), при цьому часткові залежності мають такий вид:.

$$- S_{\Sigma max} = 1,025 \cdot m^{0,49} \cdot Z_{\phi}^{-0,15} \quad \text{при } D_{a\phi} = 100 \text{ мм, } s_o = 1,5 \text{ мм/об.};$$

- $S_{\Sigma \max} = 2.781 \cdot s_o^{0,954} \cdot D_{\phi}^{-0,4150}$ при $m = 2,0$; $Z_{\phi p} = 36$.

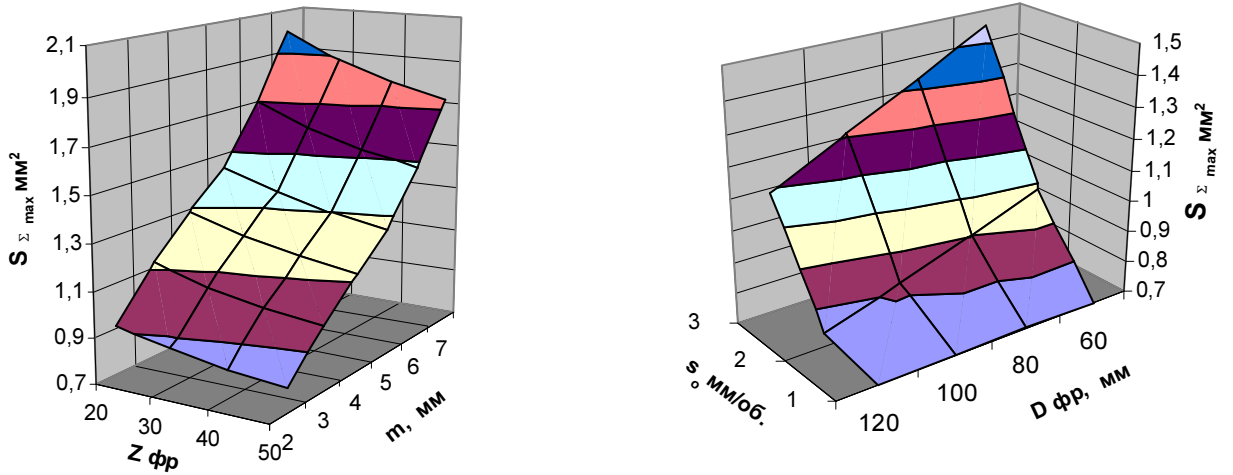


Рис.2.24. Залежність максимальної сумарної площі перерізу зрізів дискової фрези від параметрів процесу зубофрезерування: а - модуля і кількості зубців фрези ($D_{a\phi} = 100$ мм, $s_o = 1,5$ мм/об.) б - від осьової подачі і зовнішнього діаметра фрези ($m = 2,0$ мм; $Z_{\phi p} = 36$)

2.2.4.2. Середня площа перерізу зрізів вхідних бокових лез. Як впливає досліджень, результати яких приведені вище, на площу зрізів, виконуваних боковими лезами дискової фрези не впливають осьова подача та діаметр фрези. З урахуванням цього результати визначення показників ступенів при модулі і кількості зубців фрези формули для середньої по куту повороту фрези площі перерізу зрізів на основі лінеаризації степеневі функції приведені в табл. 2.3.

Табл.2.3

Визначення показників ступенів для залежності $S_{Sep_{cp}}$	
Показник ступеня $S_{ex_{cp}}$ по модулю: $k_m = 2,02$	Показник ступеня $S_{ex_{cp}}$ по кількості зубців фрези: $k_Z = -0,157$

Табл.2.4

Дані для розрахунку коефіцієнта $C_{S_{ex_cp}}$

№	Модуль, мм	Подача, мм/об.	Діаметр фрези, мм/ кількість зубців колеса	Кількість зубців фрези	$m^{2,02} \cdot Z_o^{-0,955}$	Середня площа зрізів на вхідних лезах S_{ex_cp} , мм ²
1	1	2,0	120 / 20	45	0,0264	0,00195
2	2,5				0,1679	0,012244
3	5,0				0,6809	0,048922
4	7,5	2,5		20	1,5446	0,114087
5				30	3,3507	0,266953
6				40	2,2750	0,182239
7				40	1,7285	0,137644
					Σ 9,774	Σ 0,7640

$$C_{S_{ex_cp}} = \frac{0,764}{9,774} = 0,078.$$

На основі отриманих даних вираз для середньої площі зрізів вхідних лез дискової фрези в РК-способі:

$$S_{ex_серед} = \frac{\sum_i S_{ex_i}}{\sum_i Z_i} = 0,078 \cdot m^{2,02} \cdot Z_{фр}^{-0,95}. \quad (2.21)$$

Отримана залежність свідчить, що залежність середньої площі перерізу зрізів на вхідних лезах від модуля є квадратичною, а від кількості зубців – зворотною. Влив даних параметрів є значно інтенсивніший, ніж на максимальну сумарну площі зрізів.

Графік залежності середньої площі зрізів вхідних бокових лез від модуля і кількості зубців інструменту наведений на рис.2.24.

Залежності (2.20) і (2.21) отримані в діапазоні зміни параметрів: модуль - 2,5 – 7 мм; кількість зубців фрези 20-60; осьова подача - 1-3 мм/об.; зовнішній діаметр фрези 40-200 мм.

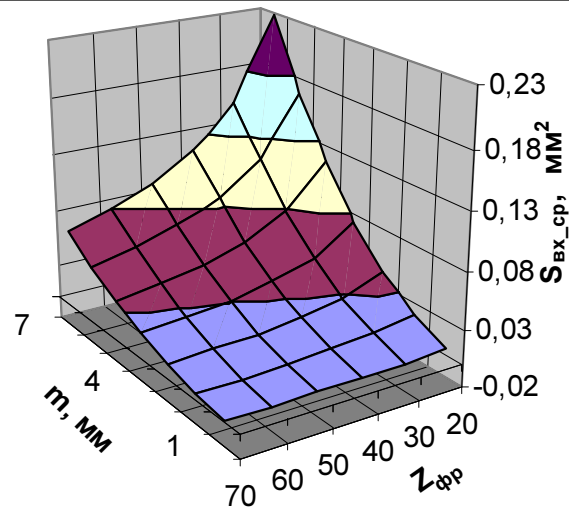


Рис.2.24. Залежність середньої площі перерізу зрізів дискової на вхідних бокових лезах фрези від модуля і кількості зубців фрези ($D_{af} = 100$ мм, $s_o = 1,5$ мм/об.)

2.2.5. Перевірка моделей параметрів зрізів в РК – способі. Для перевірки правильності отриманих результатів порівнювалися об'єми зрізів, розрахованих з двох умов. За першою умовою об'єм визначений з площі поперечного перерізу в одній впадині між зубцями. Об'єм припуску, видалений з однієї западини дорівнює сумарній площі перерізів зрізів, знятих за один оберт фрези, помножених на кількість циклів на довжині, рівній ширині зубчастого колеса з урахуванням довжини врізання. На рис.2.25 наведено графіки зміни максимальної площі перерізу в залежності від модуля, а на рис.2.26 – середнього по шляху різання об'єму зрізів з урахуванням фактичної довжини дуги контакту кожного зубця і його миттєвого радіуса. З наведених графіків виходить, що об'єми зрізів на вхідній та вихідній частині різання фрези у впадині приблизно рівні.

На рис.2.27 наведено порівняння значень розрахункового сумарного об'єму припуску, видаленого з однієї западини на вказаній довжині шляху різання (рівній ширині вінця колеса 80 мм), визначених на основі площі, обмеженої синусоїдою в поперечному перерізі колеса (крива 1) та за максимальною площею перерізу зрізів (крива 2). Максимальне відхилення об'ємів зрізів має місце для модуля 7,5 мм і становить 6,6%, а для менших

модулів ця цифра менша, що свідчить про адекватність розроблених теоретичних залежностей для визначення параметрів зрізів у РК-способі.

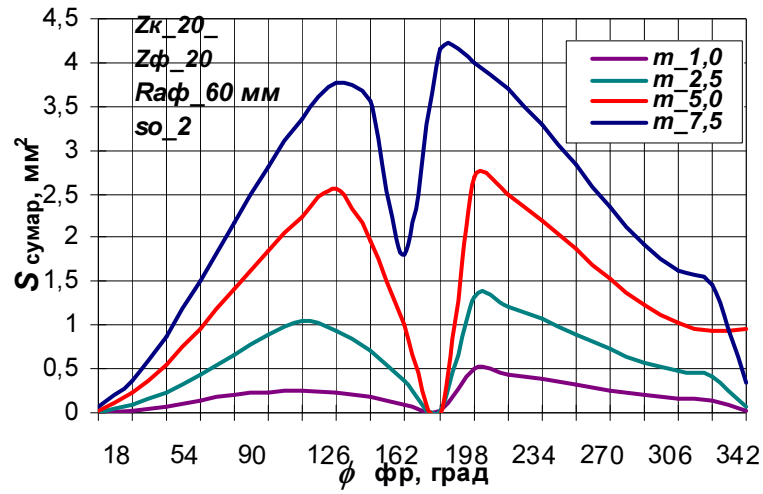


Рис.2.25. Залежність максимальної площі перерізу зрізів від модуля

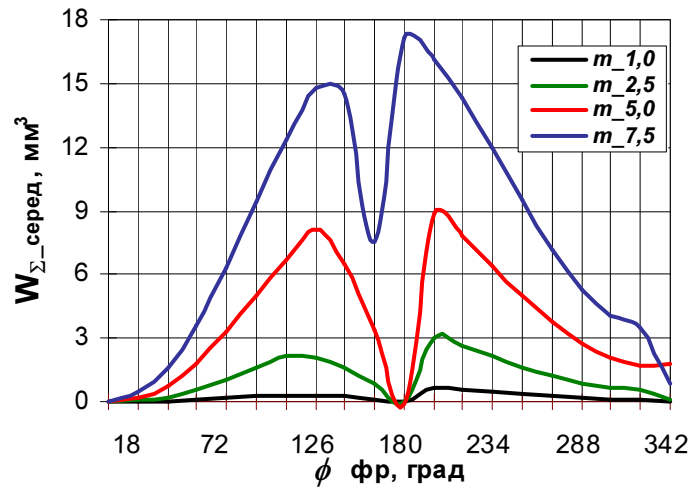


Рис.2.26. Залежність середнього об'єму зрізів від модуля

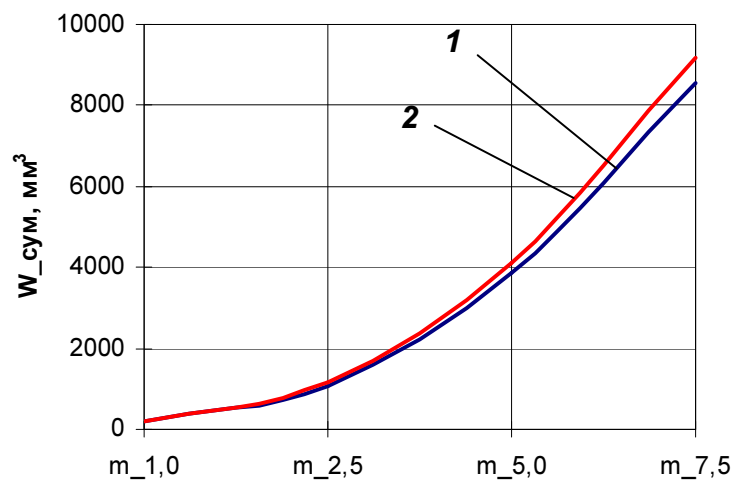


Рис.2.27. Розрахункові значення сумарного об'єму припуску, видаленого з однієї впадини

Порівняння сумарних об'ємів металу, вирізаного із впадин між зубцями показало, що максимальна товщина зрізів більша від середньої товщини у 8,15-8,85 разів.

Висновки по розділу 2.

1. Розроблена методика та визначено розрахункові схеми для встановлення параметрів зрізів дискової фрези в радіально-коловому способі нарізання зубчастих коліс. Отримані дані становлять основу для комплексного і системного дослідження процесу різання у даному способі зубообробки.

2. Встановлено, що найбільшу частину припуску зі впадин між зубцями усуває обмежена кількість зубців, які розташовані в ділянці врізання та зростання миттєвого радіуса фрези (на кутах повороту 100° - 130°) і в ділянці виходу та зменшення миттєвого радіуса фрези (на кутах повороту 240° - 280°). Ці групи зубців знімають найбільшу за площею перерізу і об'ємом стружку. Вказана закономірність спостерігається для усіх діапазонів робочих режимів та параметрів фрези і колеса.

3. Основне навантаження за параметрами зрізів припадає на вершинні леза зубців, мещу роботу з усунення припуску виконують вхідні леза. Співвідношення між об'ємами зрізів, які усуваються вхідними та вершинними лезами складає, в залежності від умов оброблення становить $1 : (3 \dots 5)$. Вихідні леза фрези працюють обмеженою частиною висоти в межах товщини зрізів на вершинних лезах.

4. Співвідношення між площами зрізів на ділянці врізання по ексцентриситету дискової фрези та на ділянці виходу коливається в широких межах, проте в середньому, їх значення рівні.

5. Отримано залежність для розрахунку сумарної площі зрізів від основних параметрів процесу зубонарізання – модуля, осьової подачі, діаметра та кількості зубців фрези. Найбільший вплив на сумарну максимальну площу зрізів дискової фрези має осьова подача, модуль і діаметр фрези, залежність від

кількості зубців фрези є слабшою; вплив m і s_0 є прямий; залежність від D_ϕ і $Z\phi$ є зворотною. Отримана залежність дійсна в широкому діапазоні параметрів процесу зубообробки.

6. Виведено формулу для розрахунку параметрів зрізів на вхідних бокових лезах дискової фрези. Встановлено, що цей параметр залежить лише від модуля та кількості зубців фрези і не залежить від інших чинників процесу. Залежність цього параметру від модуля є квадратичною, а від кількості зубців – зворотною, при цьому їх вплив на площу бокових зрізів значно інтенсивніший, ніж на максимальну сумарну площі зрізів.

7. На зубцях фрези, що розташовані на максимальному ексцентриситеті і мають найбільші миттєві радіуси товщина зрізів співставна з радіусом заокруглення леза. Ці зубці не виконують різання, працюють в умовах зминання матеріалу припуску і мають найбільшу довжину контакту з заготовкою. Такі умови роботи призводять до підвищеного тертя та інтенсивного зношування цих зубців.

а головна складова, рівна тангенційній складовій сили:

$$P_o = P_z = P_\tau \cdot \cos \Phi = \tau \cdot \frac{S}{\sin \Phi} \cdot \cos \Phi = \tau \cdot S \cdot \operatorname{ctg} \Phi, \quad (3.1)$$

де τ – границя міцності оброблюваного матеріалу під час зсуву, МПа; Φ – кут зсуву; S – площа поперечного перерізу зрізу, мм²; a , b – товщина і ширина зрізуваного шару, мм.

Кут зсуву Φ , коефіцієнт осадження стружки ξ та передній кут γ інструменту зв'язані такою залежністю [97, 99]:

$$\xi = \operatorname{ctg} \Phi \cdot \cos \gamma + \sin \gamma, \quad (3.2)$$

звідки:

$$\Phi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \right). \quad (3.3)$$

Із залежності (3.3) випливає, що при $\gamma = 0$:

$$\xi \cong \operatorname{ctg} \Phi. \quad (3.4)$$

У більшості дискових відрізнних фрез, які випускаються промисловістю і використовують для нарізання зубчастих коліс в РК-способі передній кут на вершинному лезі рівний 0, або не перевищує 3-5⁰. Приймаючи це до уваги, отримуємо залежність:

$$P_o = P_z = \tau \cdot \xi \cdot S \quad (3.5)$$

Коефіцієнт осадження стружки може бути знайдений з довідникової літератури, визначений експериментально, або встановлений на основі реологічного моделювання процесу різання [100-103].

Границю плинності на зсув τ визначимо відповідно до третьої теорії міцності (теорії найбільших дотичних напружень) як функцію межі міцності матеріалу $[\sigma]$ зубчастого колеса [104]: $\tau = 0,5 \cdot [\sigma]$.

Для вуглецевих сталей межа міцності при розтягу дорівнює 600 – 650 МПа, а для легованих сталей - $[\sigma] = 900 - 1000$ МПа; для розрахунків межу

плинності при зсуві приймемо рівною 300 МПа для вуглецевих сталей (сталь 40 - сталь 60) та 400 МПа – для легованих сталей.

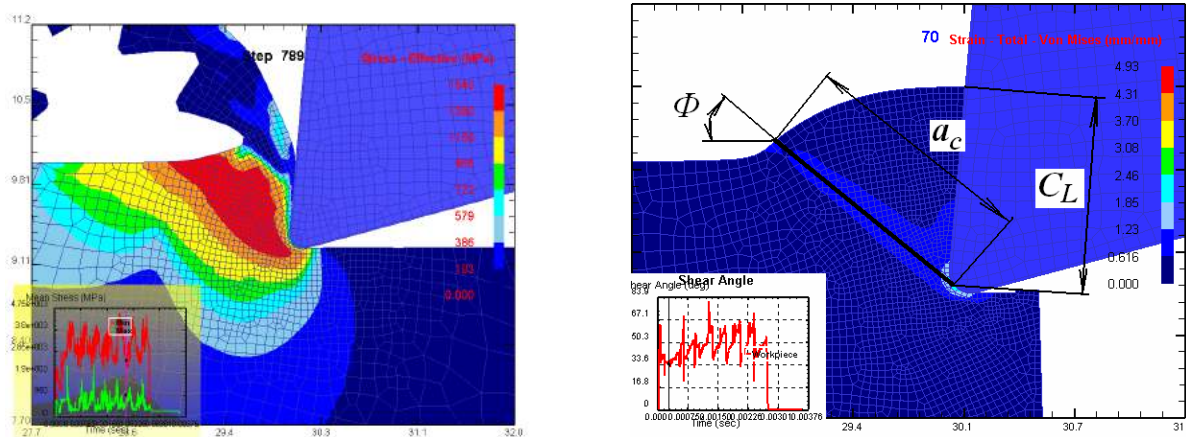


Рис.3.2. Ділянка пластичного деформування та визначення кута зсуву на основі реологічного моделювання

Як було встановлено в попередньому розділі, кожен зубець дискової в РК-способі здійснює різання двома лезами – вершинним та боковим вхідним, а залежності (3.1 – 3.5) дійсні для усіх лез. Сумарна величина головної складової сили різання P_o в напрямку швидкості різання на окремому i -му зубці дорівнює сумі елементарних сил на цих лезах:

$$P_{o_i} = P_{o_i\text{верш}} + P_{o_i\text{вхід}} \quad (3.6)$$

Складові сили різання, які діють на фрезу та впливають на її пружне деформування: в напрямку осі фрези - осьова складова P_x ; в радіальному напрямку фрези – радіальна складова P_y . Ці ж складові сили різання в процесі фрезерування впадини, але в протилежному напрямку діють на заготовку зубчастого колеса, позначені штрихом. (рис.3.3).

Сила P_{o_i} , як функція площі зрізів змінюється за кутом повороту фрези. Дискова фреза є багатозубчастим інструментом, а на довжині її контакту з заготовкою може перебувати одночасно декілька зубців, тому сила різання $P_{o\Sigma}$ визначається як сума сил на всіх зубцях:

$$P_{o\Sigma} = \sum P_{o_i} \cdot$$

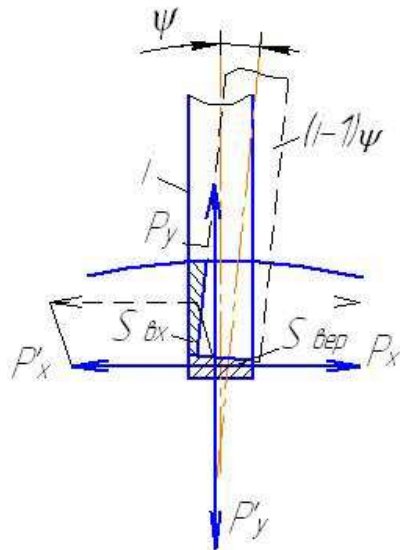


Рис.3.3. Складові сили різання на вершинному і вхідному лезах

Довжина дуги контакту фрези із заготовкою становить: $L_k = \varphi_k \cdot \frac{D_{af}}{2}$, а кількість зубців на цій довжині:

$$z_{ак} = \frac{L_k}{\tau_{фр}}$$

де D_{af} - зовнішній діаметр фрези; $\tau_{фр}$ – кутовий крок фрези; φ_k – кут контакту (рис.3.4).

Схема для розрахунку складових сили різання дисковою фрезою в ділянці, де товщина зрізу є максимальною, наведена на рис.3.4.

3.2. Дослідження впливу параметрів процесу зубонарізання на головну складову сили різання

Результати моделювання та дослідження сили різання та її складових, за методикою і розробленими залежностями, наведено в роботі [105]. На рис.3.5 зображено графіки, які характеризують зміну головної складової сили різання на вершинних лезах (а, б), на вхідних лезах (в, г) та сумарну силу на зубцях від модуля по куту повороту фрези (д, е).

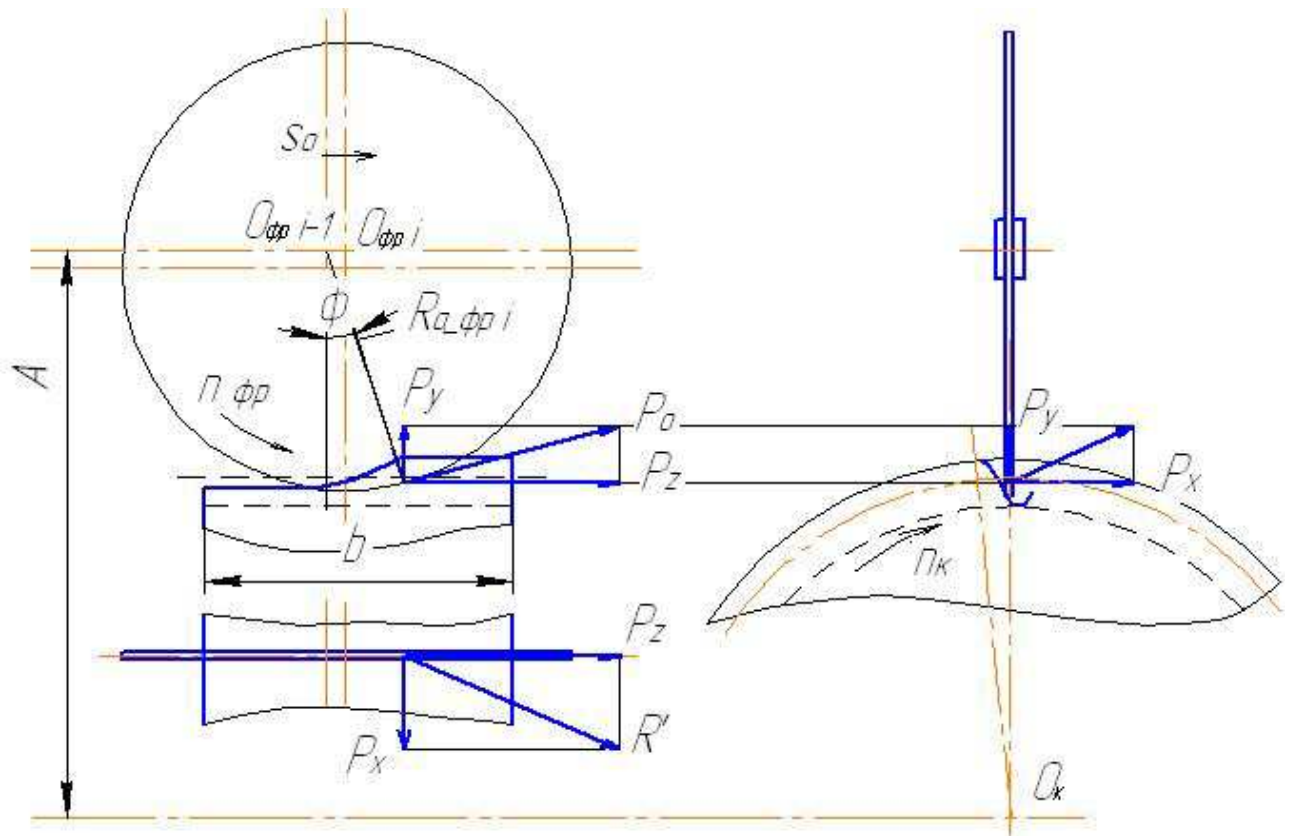


Рис.3.4. Сили, які діють в ділянці різання одного зубця по куту повороту фрези в перерізі з максимальною товщиною зрізу

На рис.3.6. наведено графіки сумарних сил залежно від модуля з урахуванням фактичної кількості зубців (від 1 до 4), які перебувають на довжині дуги контакту та здійснюють різання одночасно.

На рис.3.7 наведено залежності сумарних сил від кількості зубців фрези для модуля 7,5 мм при межі міцності на зсув 320 МПа; діаметр фрези 120 мм; осьова подача 2 мм/об.; $z_k = 20$, передній кут фрези 5^0 ; коефіцієнт осадження стружки 2,1; кут зсуву при різних значеннях кількості зубців фрези.

На рис.3.8 наведено залежності сумарних сил від осьової подачі фрези (а) і від зовнішнього діаметра фрези (б) для модуля 2,5 мм при межі міцності на зсув 320 МПа; діаметр фрези 120 мм; кількість зубців фрези $z_{фр} = 45$; $z_k = 20$, передній кут фрези 5^0 ; коефіцієнт осадження стружки 2,1; кут зсуву $26,3^0$.

На рис.3.9 наведено залежності сумарної сили P_o на входних лезах, яка не залежить від діаметра фрези ($D_{аф} = 60 - 160$ мм; модуль 2,5 мм; межа міцності

на зсув 320 МПа; осьова подача 2 мм/об.; кількість зубців фрези $z_{фр} = 45$, колеса 20, передній кут фрези 5^0 ; коефіцієнт осадження стружки 2,1).

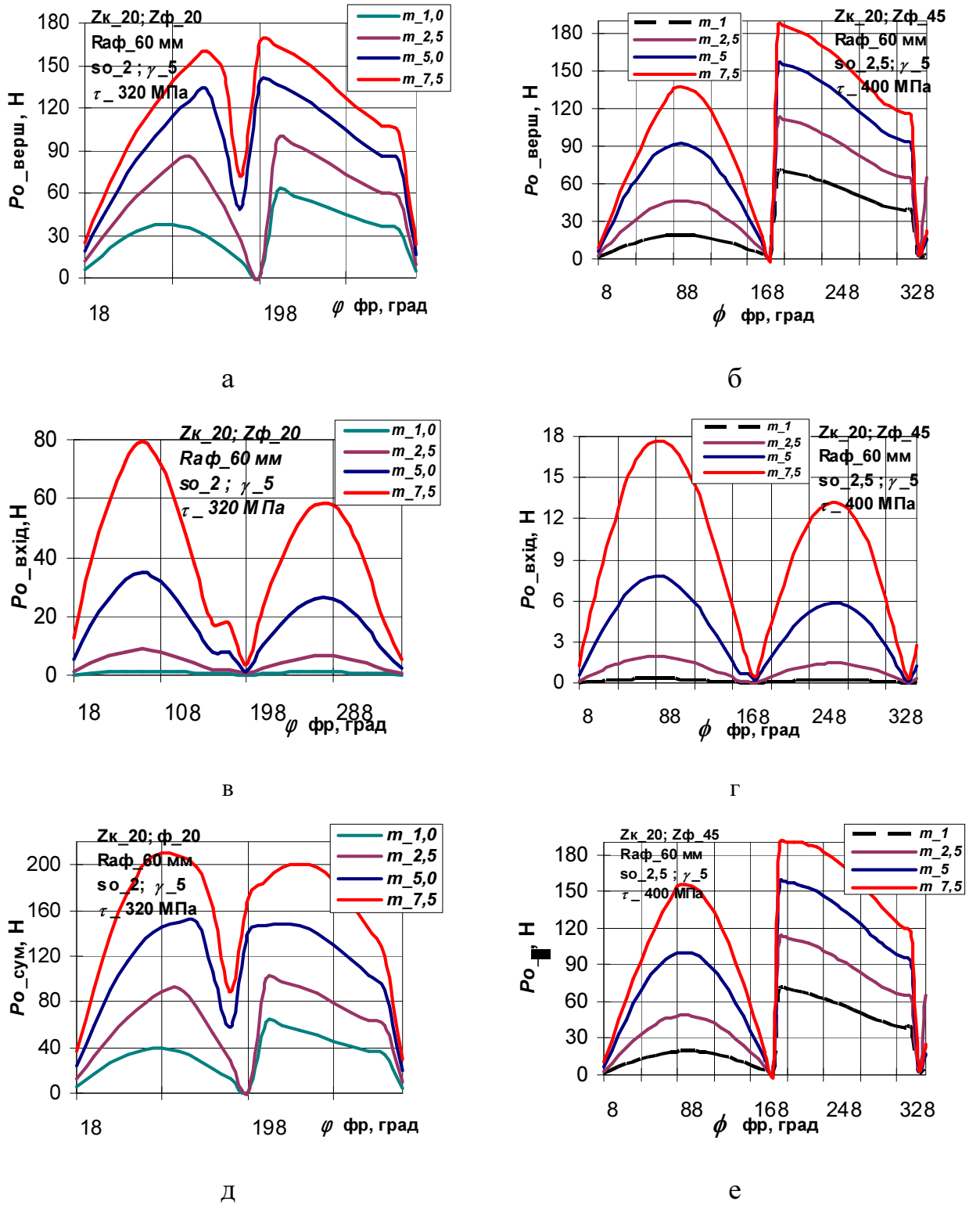


Рис.3.5. Головна складова на вершинному лезі (а, б), вхідному лезі (в,г) та сумарна на зубцях сила різання (д, е)

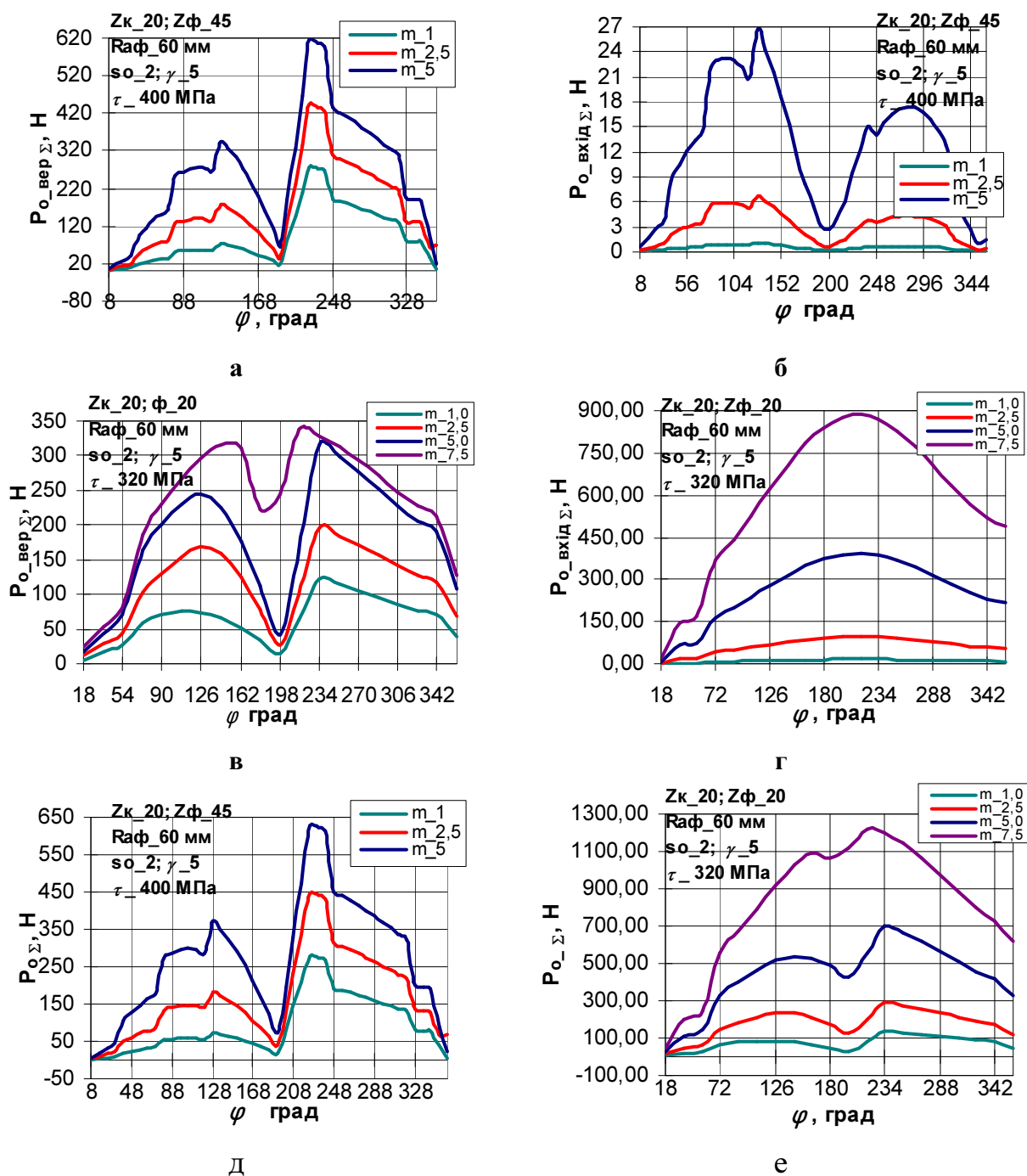


Рис.3.6. Головна складова сили різання на усіх зубцях на довжині дуги зубофрезерування на вершинних лезах (а, в) вхідних лезах (б,г) та сумарна на активних зубцях (г,е)

На рис.3.10 для тих же початкових даних наведені графіки, що характеризують максимальні за оберт значення сумарних сил на всіх одночасно працюючих зубцях дискової фрези на довжині контакту з заготовкою, на ділянці збільшення ексцентриситету і врізання (т.1) і зменшення

ексцентриситету та виходу (т.2): а – від модуля; б – від кількості зубців фрези; в – від осьової подачі; г – від діаметра фрези.

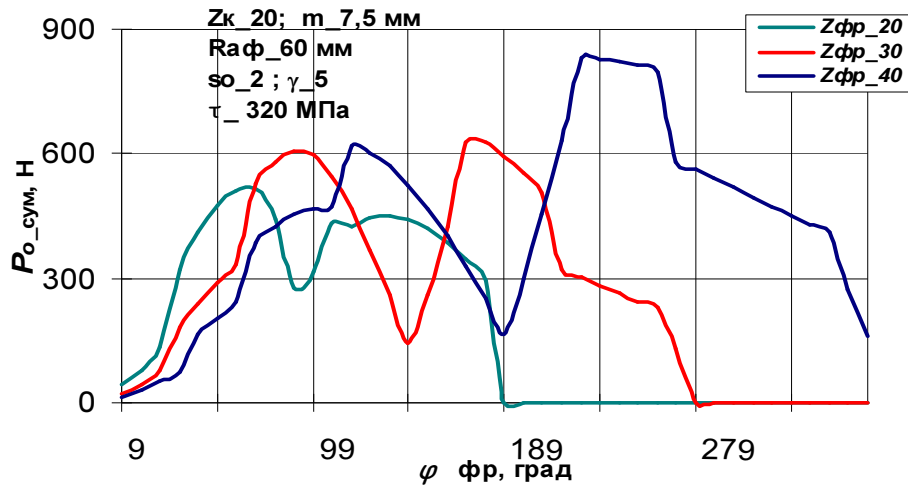


Рис.3.7. Сумарна сила різання на довжині дуги контакту в залежності від кількості зубців фрези

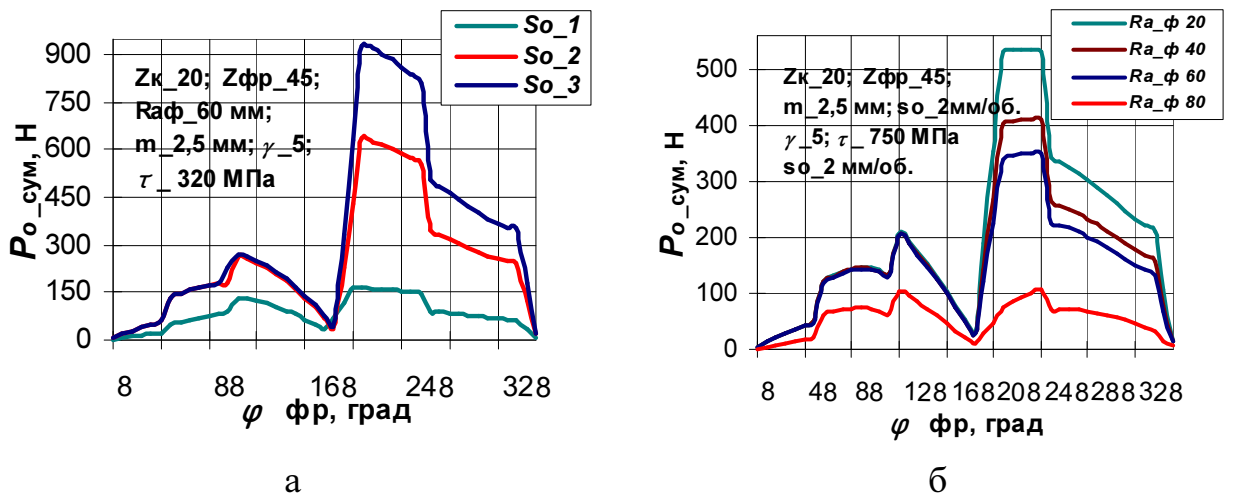


Рис.3.8. Залежності сумарних сил від осьової подачі фрези (а) і від зовнішнього діаметра фрези (б)

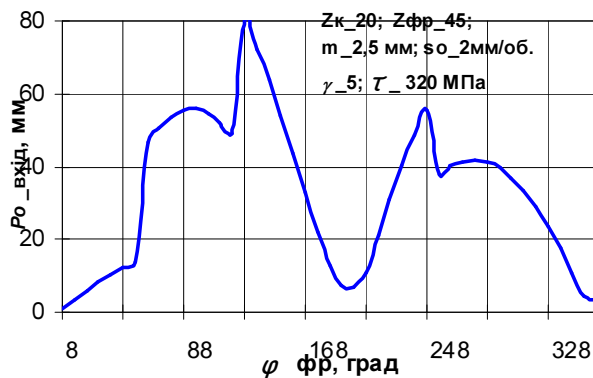


Рис.3.9. Сумарна сила на входних лезах при зміні зовнішнього діаметра фрези в межах 60 – 120 мм

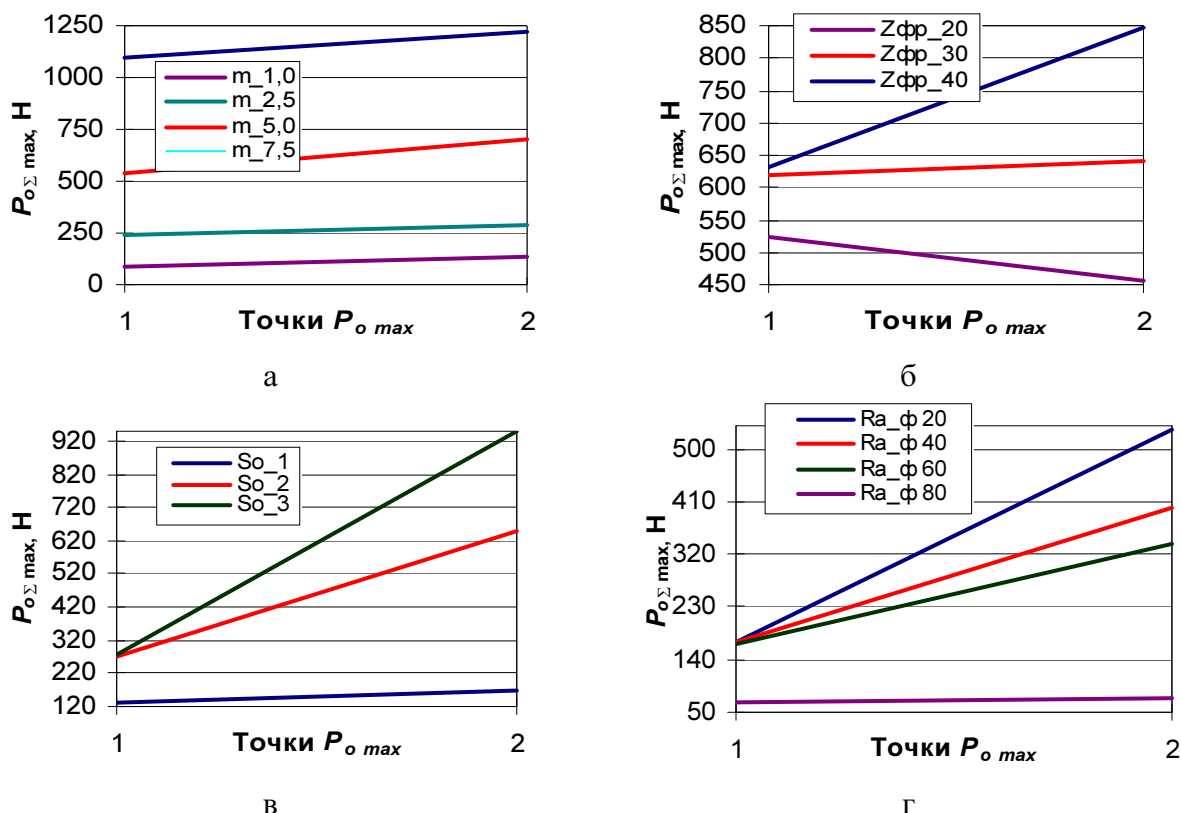


Рис.3.10. Максимальна сумарна на дузі контакту сила різання на ділянці врізання (т.1) і виходу (т.2) фрезив залежності від: а – модуля; б – кількості зубців фрези; в – осьової подачі; г – діаметра фрези

Висновки по розділу 3.

1. Виведено залежності для розрахунку сили різання та її складових в радіально-коловому способі зубофрезерування. Силу різання представлено функцією площі поперечного перерізу зрізів, інтенсивності деформування припуску та міцності матеріалу заготовки.

2. Встановлено, що залежність сумарної сили різання від кута повороту фрези в межах $0-360^0$ є нелійною функцією, а процес зубонарізання в РК-способі нестационарний. Графік зміни сили різання в одній впадині має два екстремуми. Найбільша сила різання припадає на зубці, які знаходяться на кутах повороту фрези $\sim 110^0$ та $\sim 210^0$, відповідно, ці зубці виконують основну роботу з усунення припуску; найменш навантаженими є зубці на ділянці максимального ексцентриситету.

3. Сила різання на ділянці зменшення глибини різання і виходу фрези більша, ніж на ділянці врізання. Проте, ця закономірність порушується при зменшенні кількості зубців фрези, а також при малих значеннях осьової подачі та модуля і для фрез великого діаметру - різниця між значеннями сили різання на цих ділянках стає незначною.

4. Внаслідок нерівномірності сили різання процес різання в РК-способі характеризується нерівномірністю і супроводжується ударними навантаженнями на фрезу і зубофрезерний верстат, які негативно впливають на точність оброблення і якість робочих поверхонь зубців. Коливання навантаження спричиняє нерівномірне зношування зубців фрези.

5. На бокових вхідних лезах сила різання P_x у 3 – 5 разів менша від сили на вершинних лезах. Дія цієї бокової сили на зубчасте колесо, яке обробляють, є малозначимою внаслідок значної крутильної жорсткості стола зубофрезерного верстата. Разом з тим, приймаючи до уваги малу товщину дискових фрез, які використовуються в РК-способі, ця сила, що діє на радіусі кола виступів фрези, є достатньою для деформування фрези в осьовому напрямку. Оскільки величина даної сили змінюється в широких межах протягом одного оберту інструменту, фреза зазнає періодичних пружних деформацій в її осьовому напрямку, що може служити причиною виникнення вібрацій та втрати сталості в пружній системі зубофрезерного верстата.

6. Періодичні пружні відтискання фрези від оброблюваної поверхні зубця в тангенційному для зубчастого колеса (осьовому для фрези) напрямку, що здійснюються з частотою, рівною кількості зубців колеса, спричиняють зниження якості поверхонь зубців та точності зубооброблення.

7. Порівняння сили різання дисковою фрезою та черв'ячною фрезою [78] показує, що для однакових умов обробки і осьової подачі ця сила в РК-способі в 2,5-3,5 рази менша.

8. Для зменшення величини сили різання, коливань і пружних деформацій та підвищення точності і якості нарізання коліс радіально-коловим способом рекомендується наступне:

- збільшення швидкості різання та розімкнення кінематичного зв'язку між обертанням фрези і обертанням стола зубофрезерного верстата, зокрема, використання мультиплікатора на осі фрези [43, 45, 53];

- застосування дискових фрез із збільшеною кількістю зубців для розподілення припуску між більшим числом різальних елементів;

- почергова зміна на зубцях фрези кута нахилу вершинного леза;

- додатній задній кут на бокових лезах фрези для зменшення його кута загострення і тертя по задній поверхні;

- використання для закріплення фрези притискних шайб і кілець збільшеного діаметру.

9. Дані про нерівномірність силового навантаження фрези при усуненні припуску із впадини між зубцями можуть служити основною для удосконалення процесу різання, вирівнювання сили різання в одній впадині шляхом зміни кінематики процесу (закону повздовжнього переміщення фрези), або зміни конструкції фрези.

РОЗДІЛ 4. ПРУЖНІ ДЕФОРМАЦІЇ ДИСКОЇ ФРЕЗИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ТОЧНІСТЬ ПРОЦЕСУ. МІКРОНЕРІВНОСТІ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ ЗУБЦІВ КОЛІС, НАРІЗАНИХ РК-СПОСОБОМ

Для встановлення величини сумарної похибки зубчастих коліс, які нарізають РК-способом та її структури виявлено множину первинних похибок та проаналізовано їх вплив на точність процесу і величину сумарної похибки зубообробки (ДОДАТОК 1). Досліджено, що найбільший вплив на зниження точності обробки мають відхилення, викликані періодичними пружними коливаннями в системі зубофрезерного верстата.

Визначимо відхилення профілю зубчастого колеса внаслідок пружних деформацій в часі одного оберту дискової фрези в межах $0 - 360^\circ$ [106 - 108]. Рівняння синусоїди в прямокутній системі координат [25]:

$$\begin{cases} x = (R_{\omega_к} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \\ y = -(R_{\omega_к} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases}, \quad (4.1)$$

де e – амплітуда синусоїди (ексцентриситет фрези); $R_{\omega_к}$ – ділительний радіус зубчастого колеса; φ – кут повороту фрези; Z_k – кількість зубців колеса.

4.1. Пружні деформації фрези в осьовому напрямку

В результаті бокової сили, що діє на дискову фрезу в напрямку її осі і яка виникає внаслідок зрізання частини припуску боковими вхідними лезами (P_x) фреза зазнає періодичних пружних деформацій Δ_{xJ} , які змінюються в часі одного оберту фрези.

Величина деформування фрези Δ_{xJ} на її зовнішньому діаметрі R_ϕ під дією сили P_x буде становити:

$$x_{xJ} = \frac{P_x \cdot R_\phi^3}{3 \cdot E \cdot j}, \text{ мм}, \quad (4.1)$$

де j – момент інерції перетину фрези; E – модуль пружності матеріалу.

Модуль пружності для гартованих сталей $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, момент інерції фрези відносно осі становить [109]:

$$j = \frac{R_\phi \cdot b^3}{12}, \text{ мм}^4, \quad (4.2)$$

де b – товщина фрези.

З урахуванням виразу (4.2) отримуємо таку залежність величини деформування фрези в осьовому напрямку:

$$x_{xJ} = 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{P_x \cdot R_\phi^2}{b^3}, \text{ мм}. \quad (4.3)$$

На рис.4.1 наведено графіки зміни по куту повороту пружного осьового деформування фрези від дії бокової сили різання (діаметр фрези 120 мм; товщина 3; межа міцності матеріалу на зсув 350 МПа; коефіцієнт осадження стружки 2,6).

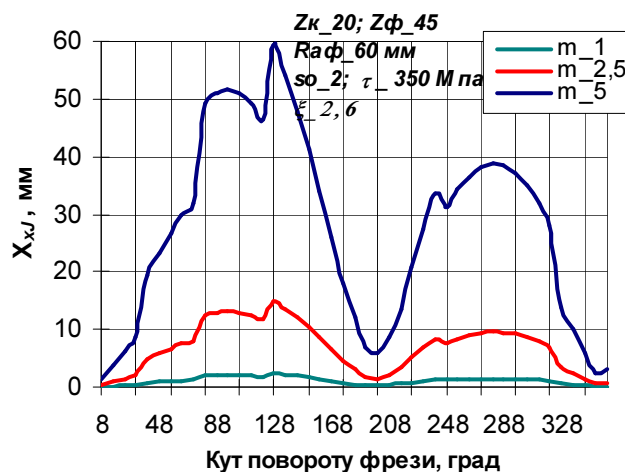


Рис.4.1. Пружні деформації дискової фрези в осьовому напрямку

$$D_{af} = 120 \text{ мм}; \tau = 350 \text{ МПа}; \xi = 2,6; b = 3 \text{ мм}$$

Приймаючи до уваги формулу для бокової складової сили різання на зубці, яка зумовлена різанням боковим вхідним лезом фрези, її залежність, відповідно до виразу (3.5) буде мати вид:

$$P_x = \tau \cdot \xi \cdot S_{ax_cp},$$

а з урахуванням середньої площі перерізу зрізу входними лезами (2.21) отримуємо вираз для бокової сили, що діє на дискову фрезу:

$$P_x = 0,078 \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{2,02} \cdot Z_\phi^{-0,955}. \quad (4.4)$$

Підставимо цей вираз в залежність (4.3), тоді максимальна деформація фрези в її осьовому напрямку буде становити:

$$\Delta x_{xJ} = 1,48 \cdot 10^{-6} \tau \cdot \xi \cdot R_\phi^2 \cdot m^{2,02} \cdot Z_\phi^{-0,955} \cdot b^{-3}. \quad (4.5)$$

Графік деформації фрези в осьовому напрямку від дії середнього значення бокової сили різання (4.4) наведено на рис.4.2.

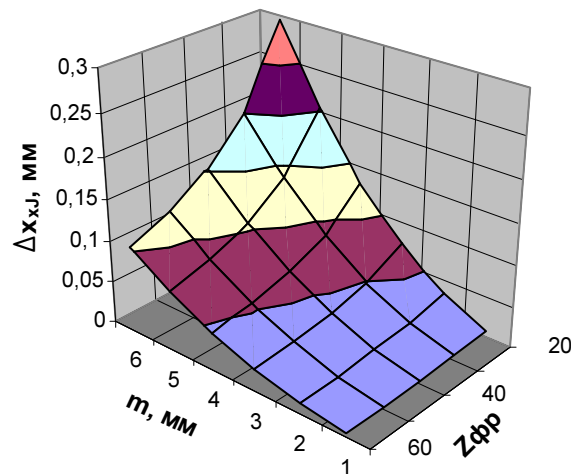


Рис.4.2. Пружні деформації дискової фрези в осьовому напрямку
($\tau = 350$ МПа; $\xi = 2,6$; $b = 3$ мм)

Внаслідок деформування фрези в осьовому напрямку (4.5) змінюється координата «x» синусоїди та форма зубця, а рівняння синусоїди буде наступним:

$$\begin{cases} x = \left(R_{\omega_к} + \Delta x_{\omega} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_\kappa} \\ y = - \left(R_{\omega_к} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_\kappa} \end{cases} \quad (4.6)$$

Графічно фактичний і номінальний профілі зубців, який утворюється в результаті деформації дискової фрези в напрямку її осі наведено на рис.4.3.

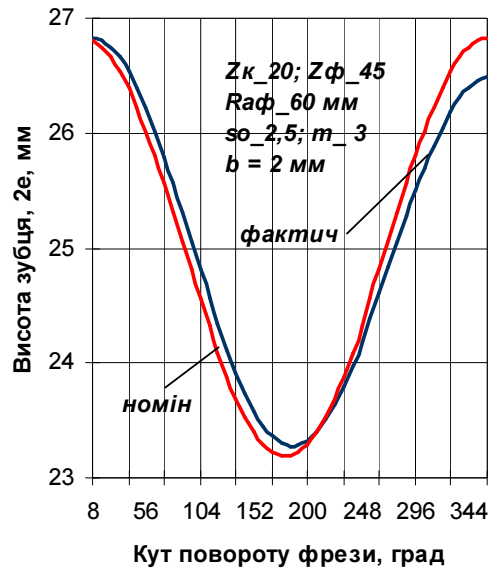


Рис.4.3. Фактичний і номінальний профілі зубців внаслідок пружних осьових деформацій на повній висоті синусоїди при товщині фрези 2 мм

Похибку профілю зубців, викликану чинником (4.5) можна визначити проєкцією максимального відхилення в осьовому напрямку на лінію зачеплення, тобто:

$$f_f^1 = 1,48 \cdot 10^{-6} \tau \cdot \xi \cdot R_\phi^2 \cdot m^{2,02} \cdot Z_\phi^{-0,955} \cdot b^{-3} \cdot \cos \alpha_\omega, \quad (4.7)$$

де α_ω - кут зачеплення.

4.2. Пружні деформації технологічної системи в радіальному напрямку

Величина пружного деформування та відтиснення на лінії контакту в радіальному напрямку визначається радіальною жорсткістю J_y системи ВПД зубофрезерного верстата:

$$\Delta y = \frac{P_y}{J_y}, \text{ мм}; P_y = P_o \cdot \sin \Phi, \quad (4.8)$$

де P_y – радіальна складова сили різання зубофрезерування; Φ – кут передньої поверхні зубця фрези, що відповідає максимальній товщині зрізу (2.5), (рис.2.3).

На рис.4.4 наведено графіки пружного деформування системи ВПД в радіальному напрямку при радіальній жорсткості 30 кН/мм по куту повороту фрези від дії максимальної сили P_y . На рис.4.5 наведено залежність найбільшого за оберт фрези радіального деформування від модуля зубчастого колеса для тих же даних при жорсткості верстата в радіальному напрямку 10, 20 і 30 кН/мм.

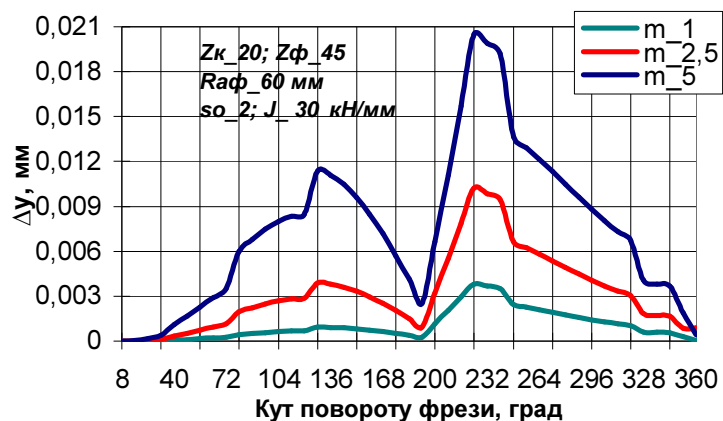


Рис.4.4. Пружне деформування системи ВПД в радіальному напрямку при по куту повороту фрези від дії максимальної сили

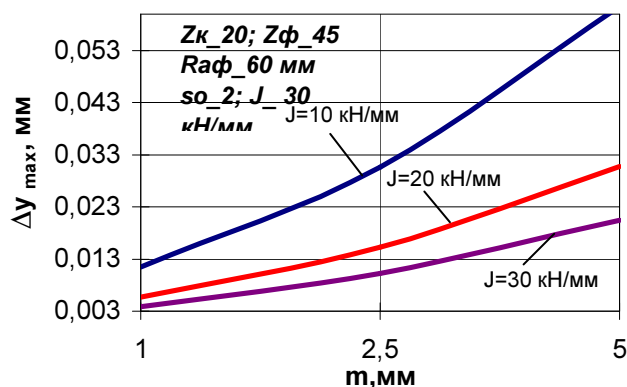


Рис.4.5. Залежність найбільшого за оберт фрези радіального деформування від модуля зубчастого колеса в радіальному напрямку

Відхилення профіля $r_{\Delta y}$, зумовлене радіальними пружним деформаціями по куту повороту фрези можна визначити за зміни координати «у» на величину (4.8):

$$\begin{cases} x = (R_{\omega_к} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \\ y = -(R_{\omega_к} + \Delta y + e \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases}, \quad (4.9)$$

Графічно цю похибку можна показати як відхилення синусоїдного профілю (рис.4.6) де наведено профілі зубців - номінального та з урахуванням пружної деформації системи в радіальному напрямку.

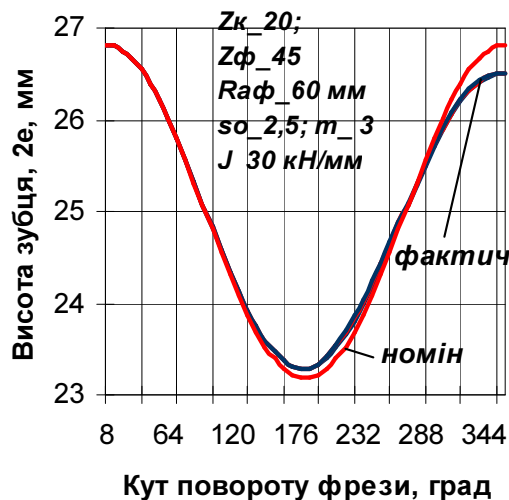


Рис.4.6. Відхилення синусоїдного профілю від номінального внаслідок пружної деформації системи в радіальному напрямку

Найбільші пружні деформації будуть відповідати максимальній силі P_{y_max} , величину якої можна знайти із урахуванням виразу для площі перерізу зрізів (2.20):

$$\Delta y_{\max} = \frac{9,332 \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{0,49} \cdot s_o^{0,945} \cdot Z_{\phi p}^{-0,157} \cdot R_{\phi}^{-0,415}}{J_y} \cdot \sin \Phi, \quad (4.10)$$

На рис.4.7 наведено графік залежності радіального пружного деформування дискової фрези від подачі і модуля зубчастого колеса.

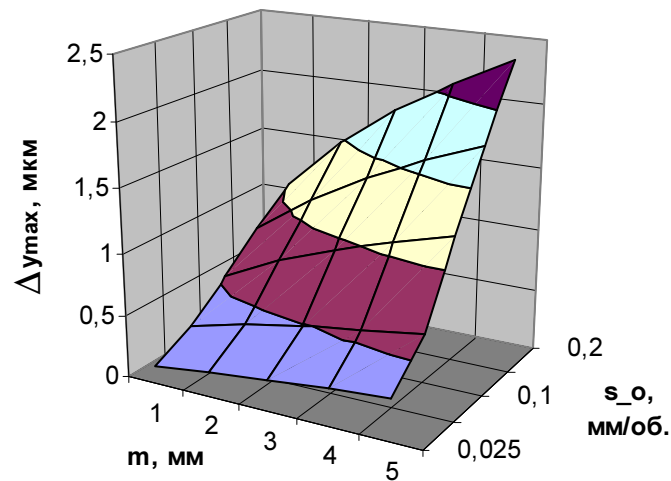


Рис.4.7. Радіальні пружні деформації дискової фрези

$$J_y = 30 \text{ кН/мм}; \phi = 25^0; \tau = 350 \text{ МПа}; \xi = 2,6; D_{a_фр} = 100 \text{ мм}; Z_{фр} = 52$$

Похибка профілю зубця визначається проектуванням (4.10) на лінію зачеплення, тобто:

$$f_f^{11} = \frac{9,332 \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{0.49} \cdot s_o^{0.945} \cdot Z_{фр}^{-0.157} \cdot R_\phi^{-0.415}}{J_y} \cdot \sin \phi \cdot \sin \alpha_\omega. \quad (4.11)$$

Як видно із наведених вище даних, пружні деформації дискової фрези в її радіальному напрямку мають менший вплив на точність порівняно з осьовими деформаціями, бо жорсткість пружної системи верстата і зокрема фрези, як твердого тіла, в радіальній площині значно більша, ніж в напрямку осі фрези.

4.3. Крутильні деформації на вісі стола верстата

При нарізанні косозубчастого колеса з кутом нахилу зубців β в дотичному напрямку на колесо додатково до сили P_z (рис.3.4) діє проекція головної складової P_o сили різання на вісь OZ - сила $P_{z_к}$ (рис.4.8). Якщо дія сили P_z на колесо зі столом верстата є неістотною внаслідок малого значення площі зрізів на вхідних лезах, то сила $P_{z_к}$ може спричиняти значні відхилення

в законі обертання стола верстата з заготовкою і тангенційні похибки зубообробки косозубчастого колеса.

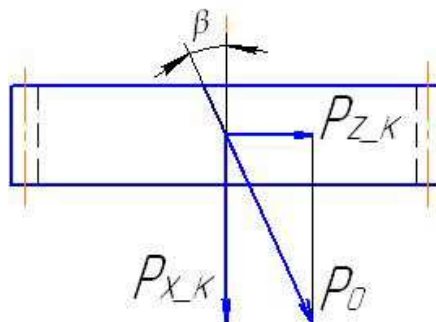


Рис.4.8. Додаткова сила, яка виникає в дотичному напрямку при нарізанні косозубчастого колеса

Якщо крутильна жорсткість стола верстата разом з встановленим на ньому пристроєм і заготовкою становить G , Нм/рад, то величина крутильного деформування стола верстата, яка визначає похибку обкочування, буде дорівнювати:

$$\Delta\varphi = \frac{M}{G} = 10^{-3} \cdot \frac{P_o \cdot \cos\Phi \cdot \sin\beta \cdot m \cdot Z_k}{2 \cdot G}, \text{ рад}, \quad (4.12)$$

де: $m \cdot Z_k = D_{\omega_k}$ - дільний діаметр колеса, мм; Φ – кут передньої поверхні i -го зубця, що відповідає максимальній товщині зрізу; 10^{-3} – коефіцієнт для узгодження розмірностей величин.

Крутильні пружні деформації діють періодично з частотою, рівною зубцевій, а їх зміна в межах однієї впадини між зубцями колеса здійснюється за законом, близьким до зміни сили P_o . На рис.4.8 наведено профілі зубців, утворених без даної похибки та з врахуванням її зміни відповідно до залежності (4.12). Для осьової подачі 1 мм/об., крутильної жорсткості стола верстата $G = 300$ НМ / рад та кута нахилу зубців косозубого колеса 25° максимальне відхилення профілів дорівнює 0,3261 мм.

На рис.4.9, а наведено відхилення синусоїдального профілю під дією змінного обертового момента на осі колеса для тих же даних при величинах осьової подачі 1, 2 і 3 м/об. Згідно з теорією синусоїдального зачеплення [110]

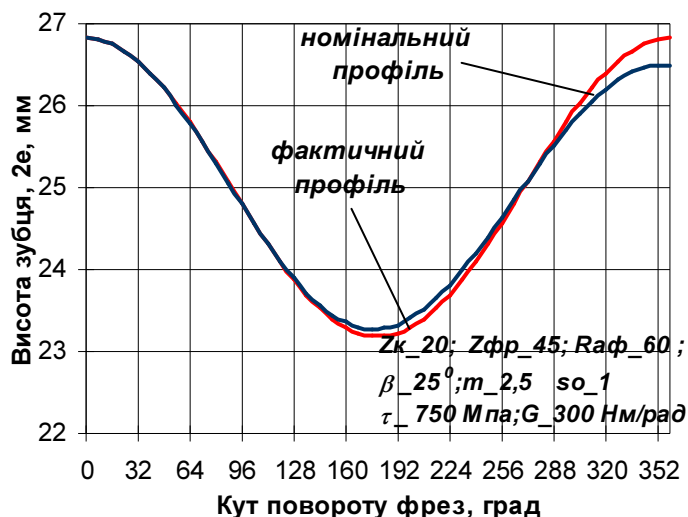


Рис.4.8. Фактичний і номінальний профілі зубців внаслідок пружних крутильних деформацій на осі колеса при товщині фрези 2 мм

робоча висота зубця синусоїдального зубця лежить в межах $\pm 0,6 e$; кут повороту фрези, який відповідає висоті зубця $1,6 e$ рівний 325° . З урахуванням цього, а також того, що при повороті фрези на кут від 0° до 180° формуються ліві профілі, а в межах $180^{\circ} - 360^{\circ}$ - праві профілі на рис.4.9, б похибки представлені по лівих і правих профілях.

Похибка профіля внаслідок крутильних деформацій стола верстата:

$$f_f^{111} = 10^{-3} \cdot \frac{P_o \cdot \cos \Phi \cdot \sin \beta \cdot m \cdot Z_k}{2 \cdot G} \cdot R_{\omega}, \quad (4.13)$$

де R_{ω} - радіус ділильного кола зубчастого колеса, яке нарізають.

4.4. Сумарна похибка оброблення, викликана пружними деформаціями в технологічній системі

Оскільки елементарні похибки (4.10) - (4.13) приведені до лінії зачеплення, то сумарна похибка профіля зубчастого колеса, викликана пружними деформаціями системи ВПД зубофрезерного верстата буде рівна:

$$f_{f_деф} = \pm f_f^1 \mp f_f^{11} \mp f_f^{111}, \quad (4.14)$$

де верхні і нижні знаки відносяться до лівих і правих профілів зубців.

На рис.4.10 показано, як змінюються номінальні профілі внаслідок сумарних пружних деформацій технологічної системи верстата (а) та сумарну похибку оброблення (б) залежно від осьової подачі по куту повороту фрези.

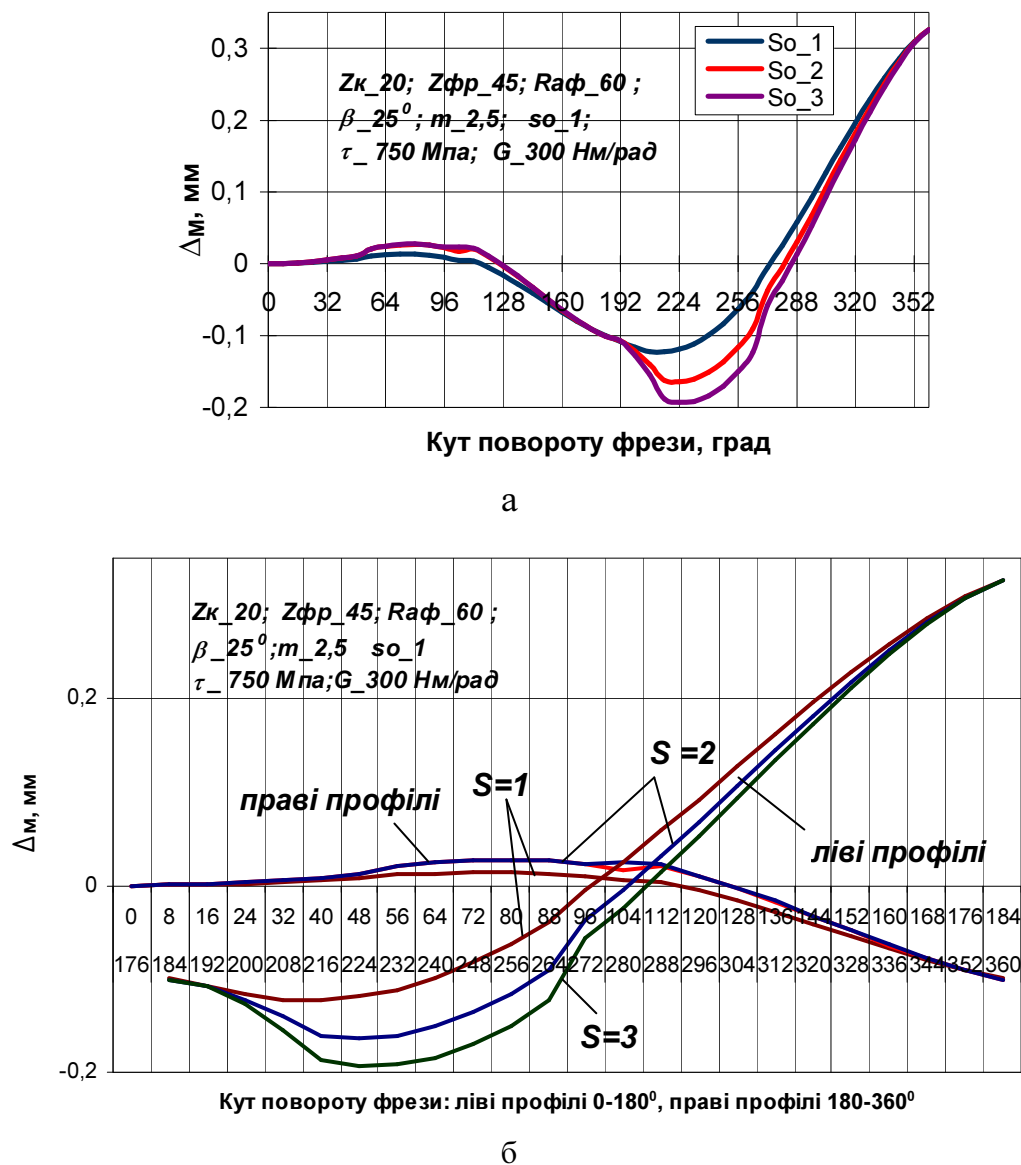


Рис.4.9. Відхилення профіля зубців внаслідок крутильних пружних деформацій по куту повороту фрези (а) та окремо для лівих і правих профілів (б)

Форма синусоїдального профілю зубця колеса внаслідок сумарного пружного деформування і номінальний профіль зубця для тих даних, які використані вище, показано на рис.4.10.

Приклади розрахунку сумарної похибки зубонарізання РК-способом для різних початкових даних наведено в ДОДАТКУ 2.

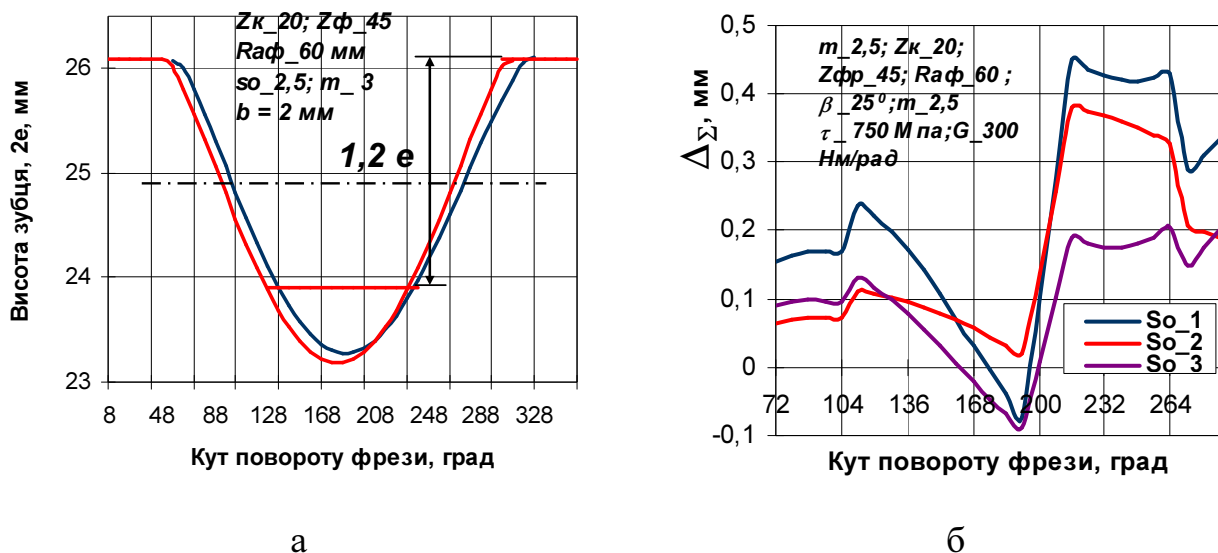


Рис.4.10. Фактичний і номінальний профілі зубців та сумарна похибка обробки на робочій висоті зубця ($h = 1,2 e$) при товщині фрези 2 мм

4.5. Мікронерівності профілів зубців

Під час прорізання западини між зубцями дисковою фрезою на утвореній поверхні зубця залишаються сліди від поверхні різання в площині фрези (вздовж впадини) та в радіальній площині колеса. Перше відхилення поверхні виникає внаслідок осьового переміщення інструменту, а друге – внаслідок обертання заготовки зубчастого колеса та дискретності різів при неперервному обточуванні.

4.5.1. Мікронерівності поверхні внаслідок осьової подачі показані на рис.4.11. На відміну від черв'ячної фрези «брижі» на поверхні від дискової фрези в РК-способі мають змінну висоту внаслідок зміни ексцентриситета i , відповідно миттєвого радіуса різання фрези. На рис.4.11, а показано сліди двох різів фрези, зміщених в часі на величину подачі на зуб фрези s_o на ділянці врізання, де $\rho_i < \rho_{(i-1)s_o}$, а на рис.4.11, б – форма відхилення поверхні зубця з даною похибкою.

Величина залишкового сліду h_s в функції від кута повороту фрези може бути визначена з координат перетину двох кіл радіусом ρ_i , зміщених на величину осьової подачі :

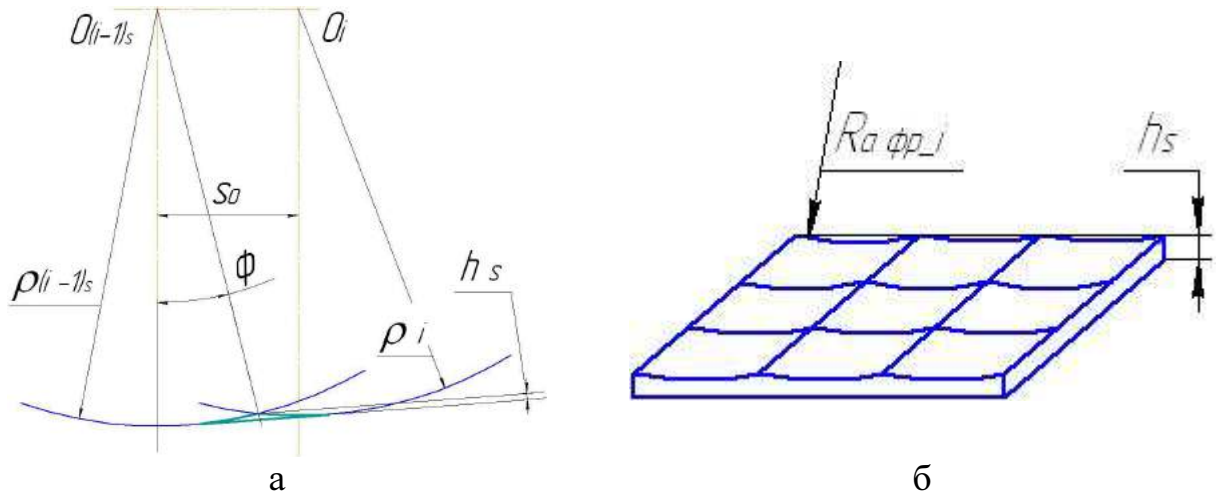


Рис.4.11. Утворення мікрівідхилення на поверхні зубця внаслідок осьової подачі та форма мікронерівностей на поверхні зубця

$$h_s = \rho_i - \rho_i \cdot \cos \phi = 2 \cdot \rho_i \cdot \sin^2 \frac{\phi}{2} . \tag{4.15}$$

Оскільки $\Phi = \arcsin \frac{s_o}{2 \cdot \rho_i}$, то висота мікронерівностей внаслідок осьової подачі буде рівна:

$$h_s = \frac{s_o^2}{8 \cdot \rho_i} , \tag{4.16}$$

де ρ_i - миттєвий радіус різання.

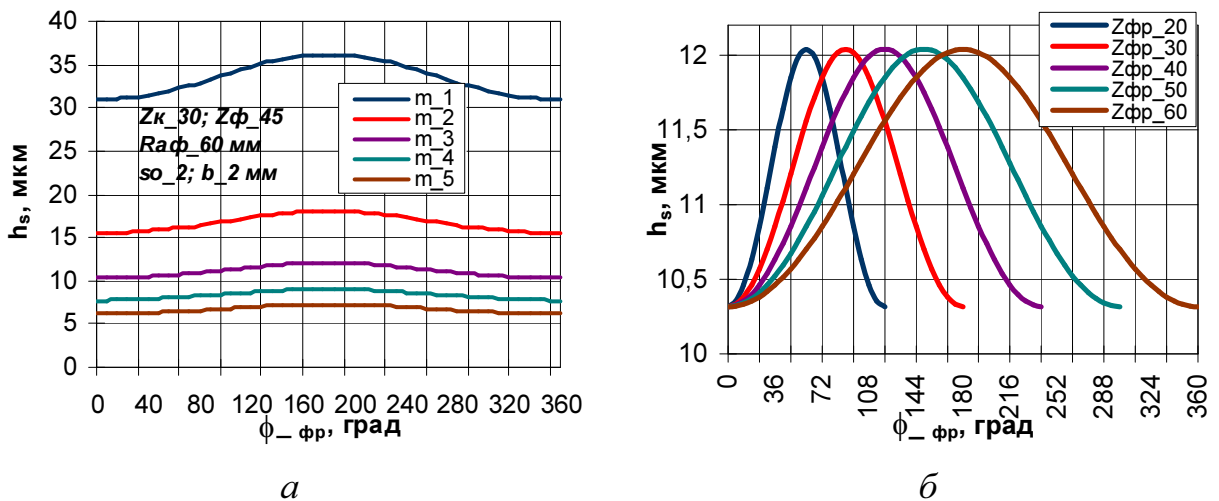


Рис.4.12. Залежність параметра h_s мікронерівностей профілів від модуля (а) та кількості зубців фрези (б) по куту повороту фрези

На рис.4.12 показано графік залежності параметра h_s мікронерівностей профілів від модуля (а) та кількості зубців фрези (б) по куту повороту фрези, а

на рис.4.13 - залежність максимального значення параметра h_s мікронерівностей від модуля (а), осьової подачі (б) та кількості зубців колеса (в).

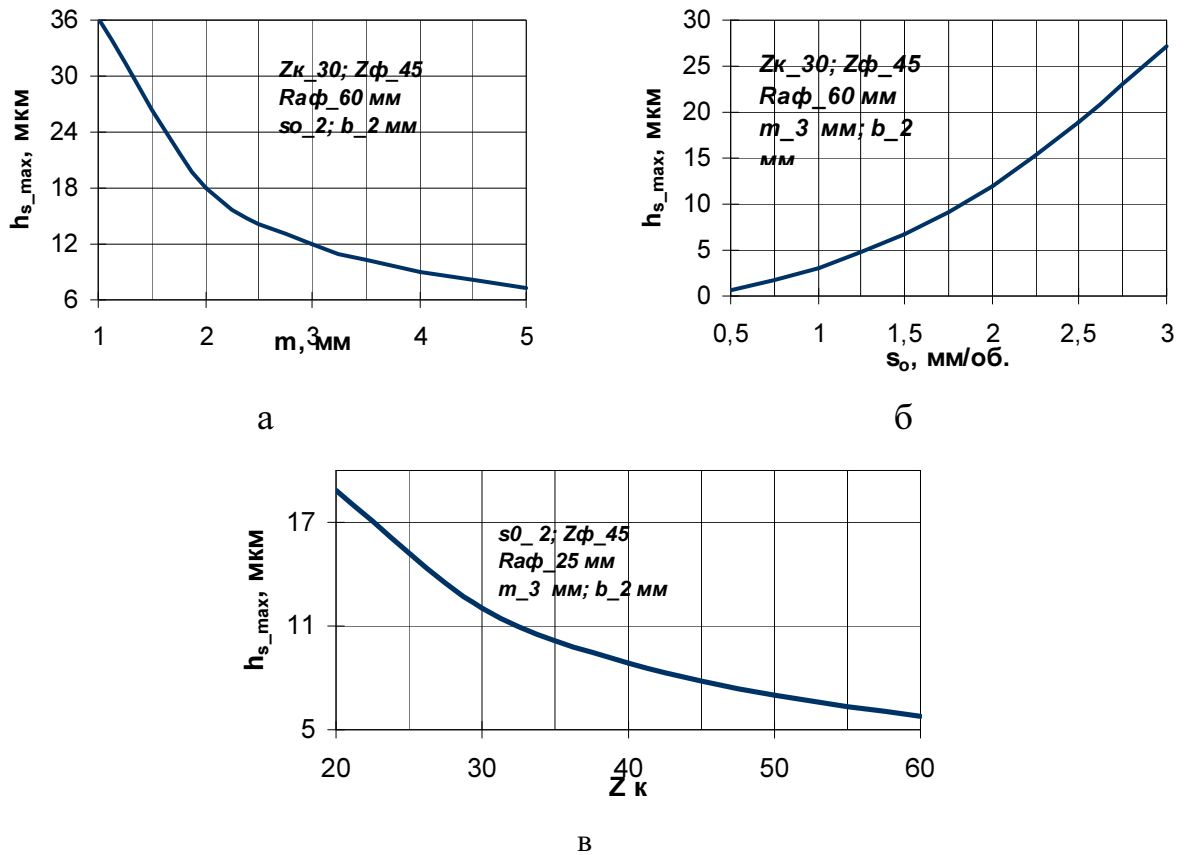


Рис.4.13. Залежність максимального значення параметра h_s мікронерівностей від модуля (а), осьової подачі (б) та кількості зубців колеса (в)

4.5.2. Мікронерівності внаслідок руху обкочування. Схема, яка пояснює виникнення мікронерівностей h_ϕ профілю внаслідок дії цього чинника наведена на рис.4.14. Величину h_ϕ можна визначити як функцію товщини зрізів на вершинних лезах фрези та одиничного кута обкочування ψ :

$$h_\phi = a_{\text{вер}} \cdot \sin \psi. \quad (4.17)$$

Графіки залежності висоти h_ϕ від модуля та від кількості зубців фрези наведені на рис.4.15.

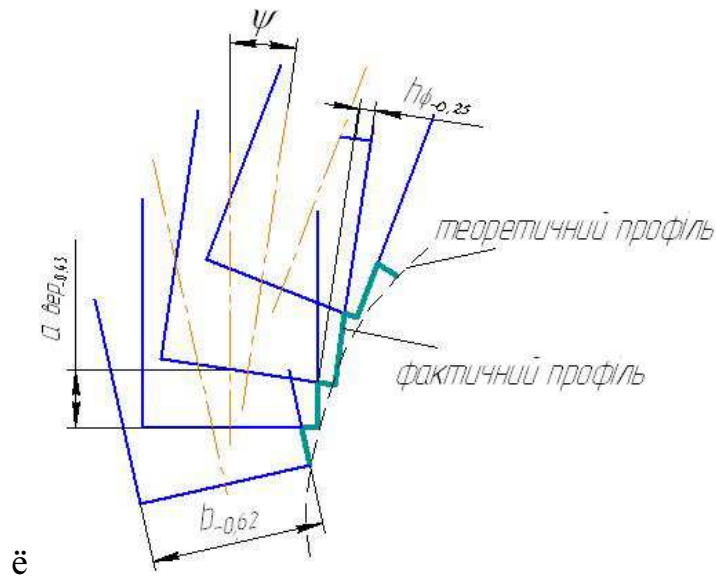


Рис.4.14. Утворення мікронерівностей профілю внаслідок руху обкочування

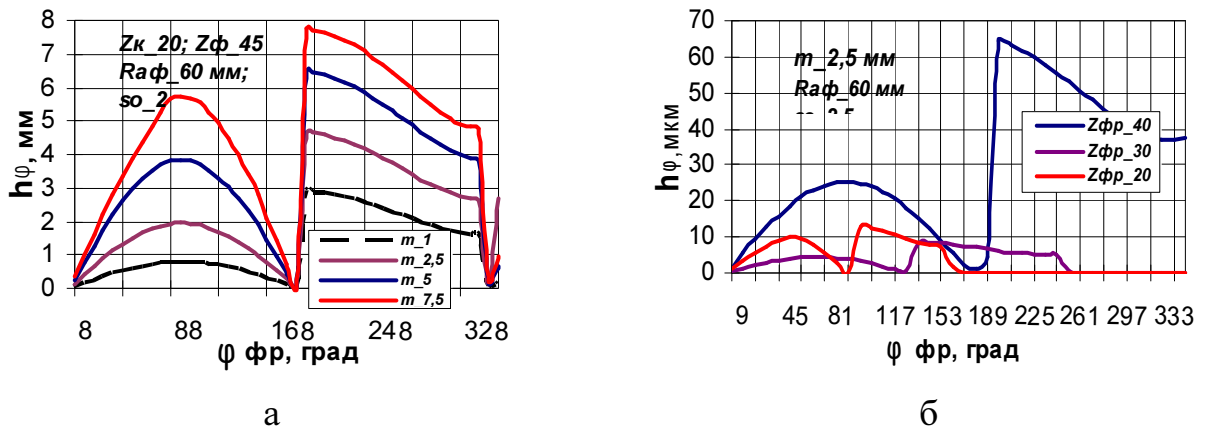


Рис.4.15. Залежність параметра h_φ мікронерівностей від модуля (а) та від кількості зубців фрези (б)

кількість зубців колеса $z_\kappa = 30$, фрези - $z_{\varphi r} = 45$; діаметр фрези $R_{a\varphi r} = 120$ мм; осьова подача $s_o = 2$ мм/об.; ширина фрези $b = 2$ мм

Сумарне мікровідхилення профілів зубчастих коліс є результатом обох кінематичних рухів, а загальна висота мікронерівностей буде рівна сумі похибок h_s (4.16) і h_φ (4.17):

$$h_\Sigma = h_s + h_\varphi = \frac{s_o^2}{8 \cdot \rho_i} + a_{вер} \cdot \sin \psi. \quad (4.18)$$

На рис.4.16 наведено графіки сумарного максимального відхилення профілів зубчастих коліс модулів 1 мм, 3 мм і 5 мм.

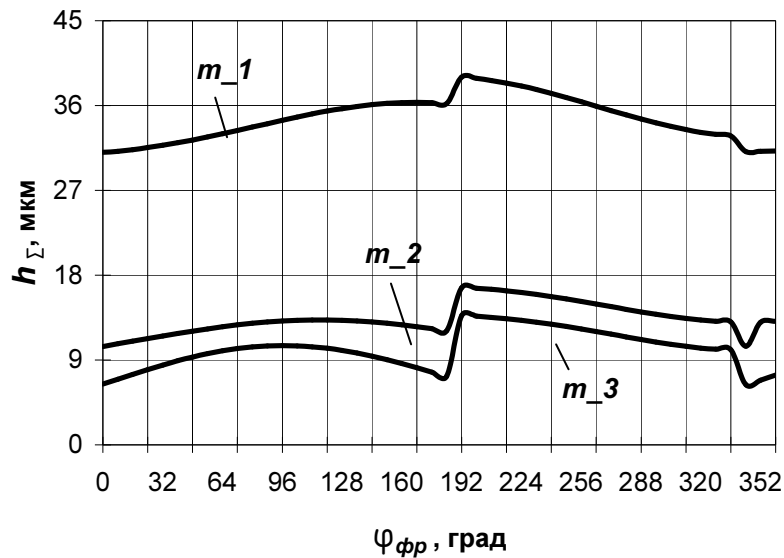


Рис.4.16. Сумарне відхилення мікронерівностей профілів по куту повороту фрези для $m = 1$ мм, 3 мм і 5 мм
кількість зубців колеса $z_k = 30$, фрези - $z_{фр} = 45$; діаметр фрези $R_{афр} = 120$ мм; осьова подача $s_o = 2$ мм/об.; ширина фрези $b = 2$ мм

Рівняння (4.18) дозволяє визначати граничну величину осьової подачі залежно від параметра шорсткості, який треба витримати при зубофрезеруванні. Якщо покласти: $h = R_z$, то

$$s_o \leq \sqrt{8 \cdot (R_z - a_{вер} \cdot \sin \psi) \cdot R_{ф}} \quad \text{мм/об.}, \quad (4.19)$$

де R_z , - параметр шорсткості по десяти точках (ГОСТ 2789-73).

Наприклад, на основі моделювання параметрів зрізів залежно від числа зубців фрези для модуля 5 мм , товщини фрези 2 мм і діаметра фрези 120 мм встановлено максимальні значення товщини зрізів a_{max} на вершинних лезах фрези. Для $R_z = 20$ мкм на рис.4.17 і в табл.4.1 наведено максимально допустиму величину осьової подачі з умови забезпечення заданої шорсткості.

Табл.4.1

$Z_{фр}$	20	30	40
ψ , град	0,9	0,6	0,45
a_{max} , мм	1,131	0,827	0,567
$S_{o\ max}$, мм/об.	0,52	2,33	2,73

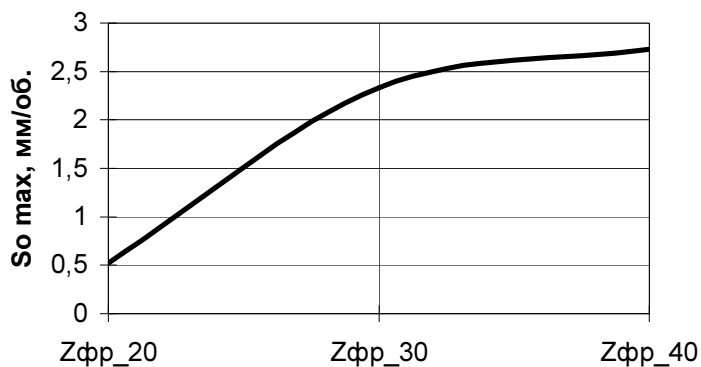


Рис.4.17. Максимальна величина осевої подачі з умови $R_z < 20$ мкм залежно від кількості зубців колеса

$$R_{a\ фр} = 120\ \text{мм};\ b = 2\ \text{мм};\ R_z = 20\ \text{мкм}$$

На рис.4.18. наведено фрагменти правих і лівих профілів зубців з мікронерівностями, які виникають внаслідок руху обкочування, збільшених у 45 разів з допомогою мікроскопа марки БМИ. Профілі на рис.4.19, а, б, в отримані при нарізанні металевих заготовок із сталі 20 і сталі 45, а на рис.4.19, г, д - коліс з синтетичної смоли. Середня висота мікронерівностей при кількості зубців фрез 45 і 60 і кількості зубців колеса 22 становить, відповідно, 12 та 9 мкм, що відповідає залежності (4.17).

При використанні мультиплікатора на осі фрези і розриванні кінематичного зв'язку між обертанням заготовки та фрези збільшується кількість різів фрези у число разів, яке дорівнює передавальному числу мультиплікатора. Внаслідок збільшення кількості різів припуск розподіляється між більшим числом зубців та зменшуються параметри різів. Встановлено, що для мультиплікатора з передавальним співвідношенням $u = 3$ товщина зрізів і

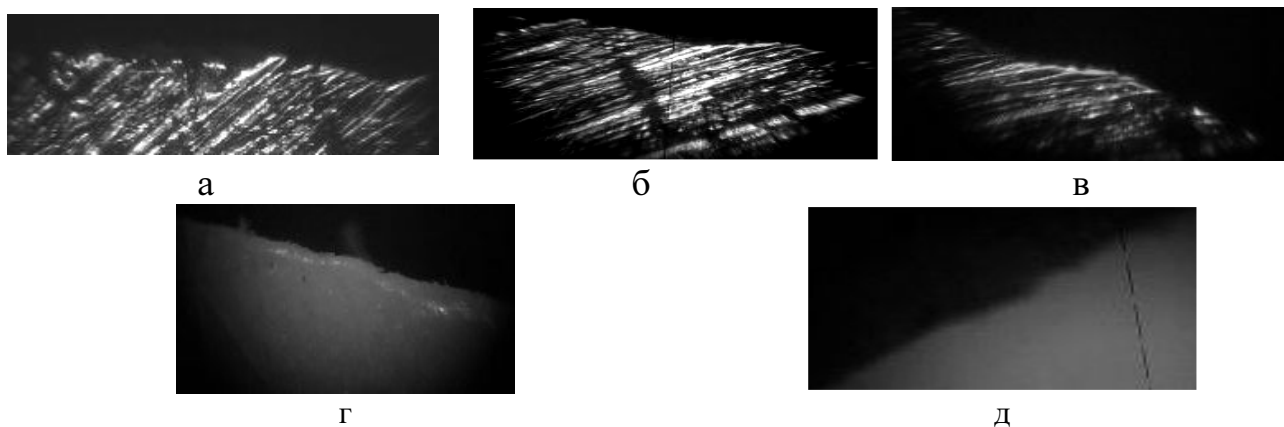


Рис.4.18. Мікронерівності на профілях зубців, які виникають внаслідок руху обкочування: а - в – метал; г,д – синтетична смола

площа перерізу зрізів на вершинному лезі зменшується у 3 рази, а на боковому вхідному лезі – на 15-20% [2, 3, 47]. Із зміною товщини зрізів зменшується висота мікронерівностей внаслідок руху обкочування. На рис.4.19 наведено графік, на якому показано зміну параметра h_ϕ на профілі зубців зубчастого колеса при нарізанні колеса 5 мм без мультиплікатора та з мультиплікатором при $u = 2, 3$ і 4 , виходячи з того, що для мультиплікатора:

$$h_\phi = 0,3 \cdot a_{\text{вер}} \cdot \sin \psi ; \quad \psi = \frac{2 \cdot \pi}{u \cdot Z_k \cdot Z_{\phi p}}$$

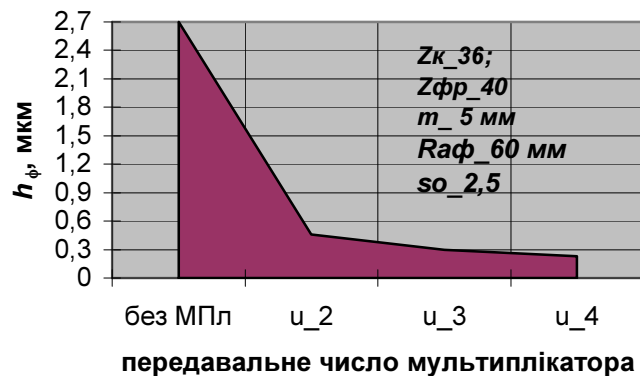


Рис.4.19. Зміна висоти мікронерівностей зубця внаслідок руху обкочування при різанні без мультиплікатора та з мультиплікатором ($u = 2, 3, 4$)

Висновки по розділу 4.

1. На основі закономірностей зміни площі перерізу зрізів і сили різання досліджено радіальні, осьові і крутильні пружні деформації дискової фрези та заготовки і їх вплив на точність профілів, які нарізають.

2. Встановлено, що найбільший вплив на зниження точності мають осьові пружні деформації та коливання фрези. Ці залежності мають два екстремуми по куту повороту фрези, а їх максимальне значення припадає на вхідну ділянку профілювання, тобто на ліві профілі зубців колеса, що нарізають. Максимальні відхилення профілів виникають в середній частині лівих і правих профілів.

3. Пружні деформації системи в радіальному напрямку можуть впливати на точність при різанні на повну глибину профілю і при зубофрезеруванні з великими осьовими подачами. При однакових початкових умовах відхилення профілів внаслідок радіальних деформацій становлять 0,2 - 0,3 від осьових деформацій.

4. Крутильні деформації мають вплив на точність при нарізанні косозубих коліс, а максимальне відхилення профілів припадає на вихідну частину різання фрези.

5. Мікронерівності профілів зубців колеса, яке нарізають РК-способом утворюються внаслідок руху обкочування та осьового переміщення фрези. Складова мікронерівностей профілів зубчастих коліс, яка визначається осьовою подачею значно більше залежить від модуля, ніж від кількості зубців дискової фрези, в той час, як складова, що визначається одиничним кутом обкочування значно більше залежить від числа зубців інструменту, ніж від модуля колеса.

6. Перша складова мікронерівностей профілю має найбільшу висоту в ділянці дна впадини, а друга – на середині висоти зубців, по обидвох (лівих і правих) профілях, при цьому на вихідній по ексцентриситету частині фрези висота мікронерівностей може бути у два рази вищою, ніж на вхідній частині. Залежно від умов обробки висота мікронерівностей може становити до половини похибки профілю, викликаних пружними деформаціями.

РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ РК-СПОСОБОМ

5.1. Дослідження осьової складової сили різання зубофрезерування в РК-способі на основі методів планування експерименту

Метою досліджень було встановлення експериментальної залежності осьової складової сили різання від чинників РК-способу зубонарізання та перевірки достовірності теоретичної моделі сили різання. Досліджувався процес зубофрезерування з мультиплікатором, як технічним засобом підвищення якості і продуктивності радіально-колового способу нарізання зубчастих коліс [111].

5.1.1. Методика проведення експерименту.

5.1.1.1. Тарування інструментів. Тарування дискових фрез здійснювалося для встановлення залежності величини пружного деформування дискової фрези від сили, яка діє на фрезу в процесі зубофрезерування в осьовому напрямку. Експерименти проводили за двома методиками залежно від конструкції дискової фрези.

У першому випадку досліджувалися тонкі дискові фрези з швидкорізальної сталі Р6М5. Дослідження проводили на токарно-гвинторізному верстаті мод.16Б25ПС. Дискова фреза в оправці була встановлена в центрах верстату, навантаження здійснювали з допомогою пневмоциліндра з системою регулювання тиску. Пневматична схема керуванням пневмоциліндром показано на рис.5.1, а установка для вимірювання наведена на рис.5.2. Вимірювання величини сили здійснювали з допомогою лабораторного манометра з діапазоном зміни тиску до 0,4 МПа і ціною поділки 0,002 МПа. Сила на пневмоциліндрі визначалася за таблицею тарування «Тиск – сила» виробника («AIGNEP Spa», Італія) (рис.5.2). Зусилля прикладали в точці, близькій до зовнішнього діаметра фрез з урахуванням середньої глибини різання на зубофрезерному верстаті. Деформацію фрез в

осьовому напрямку фіксували з допомогою мікрометричного індикатора з ціною поділки 0,005 мм. Графіки тарування фрез товщиною 1,1 мм, 1,4 мм і 2,0 мм наведено на рис.5.3.

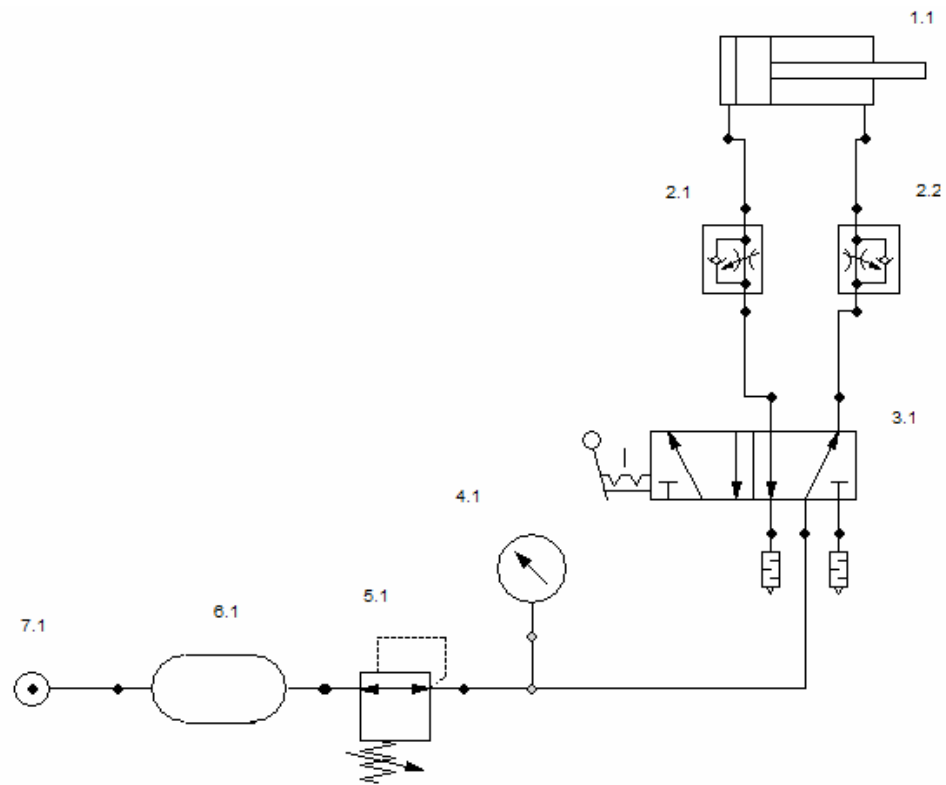


Рис.5.1. Пневматична схема керуванням пневмоциліндром
 1.1 – пневмоциліндр двосторонньої дії діаметром поршня 10мм та ходом 50мм;
 2.1 , 2.2 – дроселі регулювання швидкості переміщення штока пневмоциліндра;
 3.1 – пневморозподільник 2-ох позиційний 5-ти лінійний з ручним керуванням;
 4.1 – манометр;
 5.1 – прищезійний регулятор тиску;
 6.1 – ресивер;
 7.1 – джерело стиснутого повітря.

У другому випадку тарувалася збірна дискова фреза, оснащена пластинами з твердого сплаву ТК. Фреза на оправці встановлювалася в центрах токарно-гвинторізного верстату мод.16К20, а для вимірювання величини сили використовували динамометр, закріплений на супорті верстата в різцетримачі. Навантаження здійснювалося осьовим переміщенням супорта (рис.5.4), його величина визначалася з допомогою мікрометра і тарувального графіка.

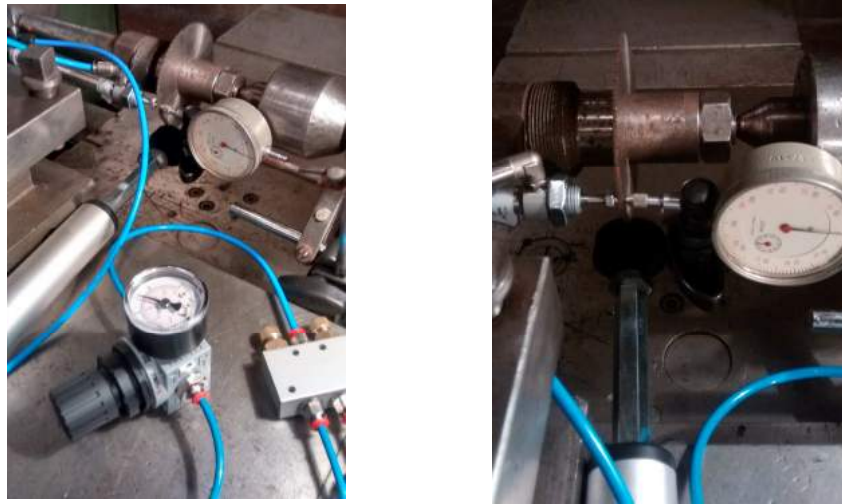


Рис.5.2. Тарування дискової швидкорізальної фрези з допомогою пневмоциліндра

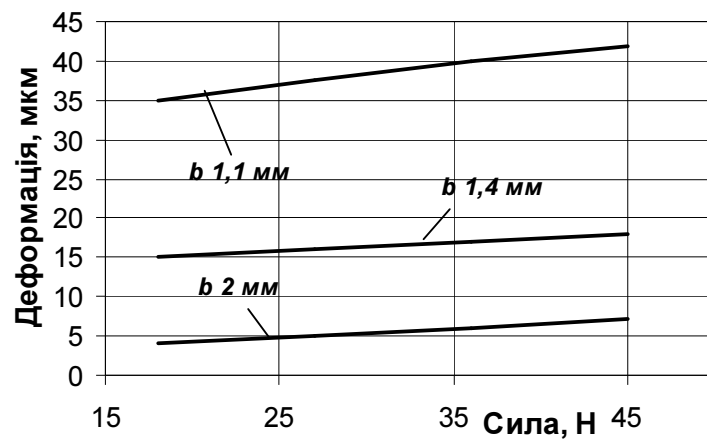


Рис.5.3. Графіки тарування дискових фрез

Величина осьового деформування дискової фрези фіксувалася з допомогою мікрометричного індикатора, ціна поділки 0,002 мм.



а



б

Рис.5.4. Тарування збірної дискової фрези з пластинами з твердого сплаву ТК: а – вимірювання деформації фрези; б – вимірювання сили навантаження

5.1.1.2. Вимірювання сили різання за осьовими коливаннями дискових фрез. На другому етапі під час нарізання зубчастих коліс на зубофрезерному верстаті пружні деформації фрез фіксували з допомогою індуктивного давача лінійного переміщення мод. XS4 (рис.5.5); в табл. 5.1 наведено його технічні характеристики. Вихідні аналогові сигнали з давача в діапазоні 4...20 mA частотою 100 Гц поступали на контролер і через кабель RS-232 - на комп'ютер (рис.5.6) та опрацьовувалися з допомогою електронних таблиць Excel.

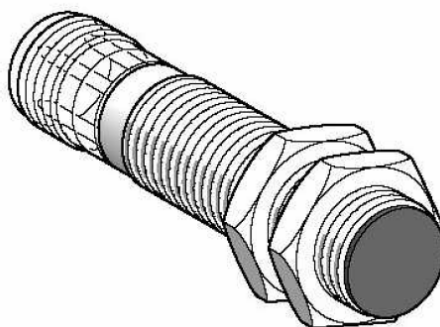


Рис.5.5. Індуктивний давач лінійного переміщення XS4

Табл.5.1

Технічні характеристики давача переміщень

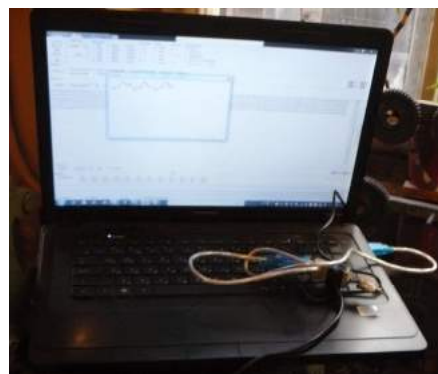
Діапазон аналогового виходу	4...20 mA
Напруга живлення	12...24 В ПС
Діапазон спрацьовування	0,8...8 мм
Точність повторення	≤ 3%
Частота обміну	≤ 500 Hz

На рис.5.6 і рис.5.7 показано загальний вид верстата з давачем осьового переміщення для вимірювання бокової сили різання на фрезі із швидкорізальної сталі і на збірній твердосплавній фрезі.

Сигнали про деформації фрези знімалися в різних впадинах при дублюванні експериментів. Співставлення графіків зміни осьової складової сили різання в одній впадині між зубцями з експериментальними даними показало співпадіння графіків зміни сили різання (рис.5.8).



а



б



в



г

Рис. 5.6. Експериментальна установка для запису коливання (а, б) та робочий простір верстата з фрезою із швидкорізальної сталі (в, г)



Рис.5.7. Робочий простір верстата з здавачем для вимірювання сили різання на збірній фрезі

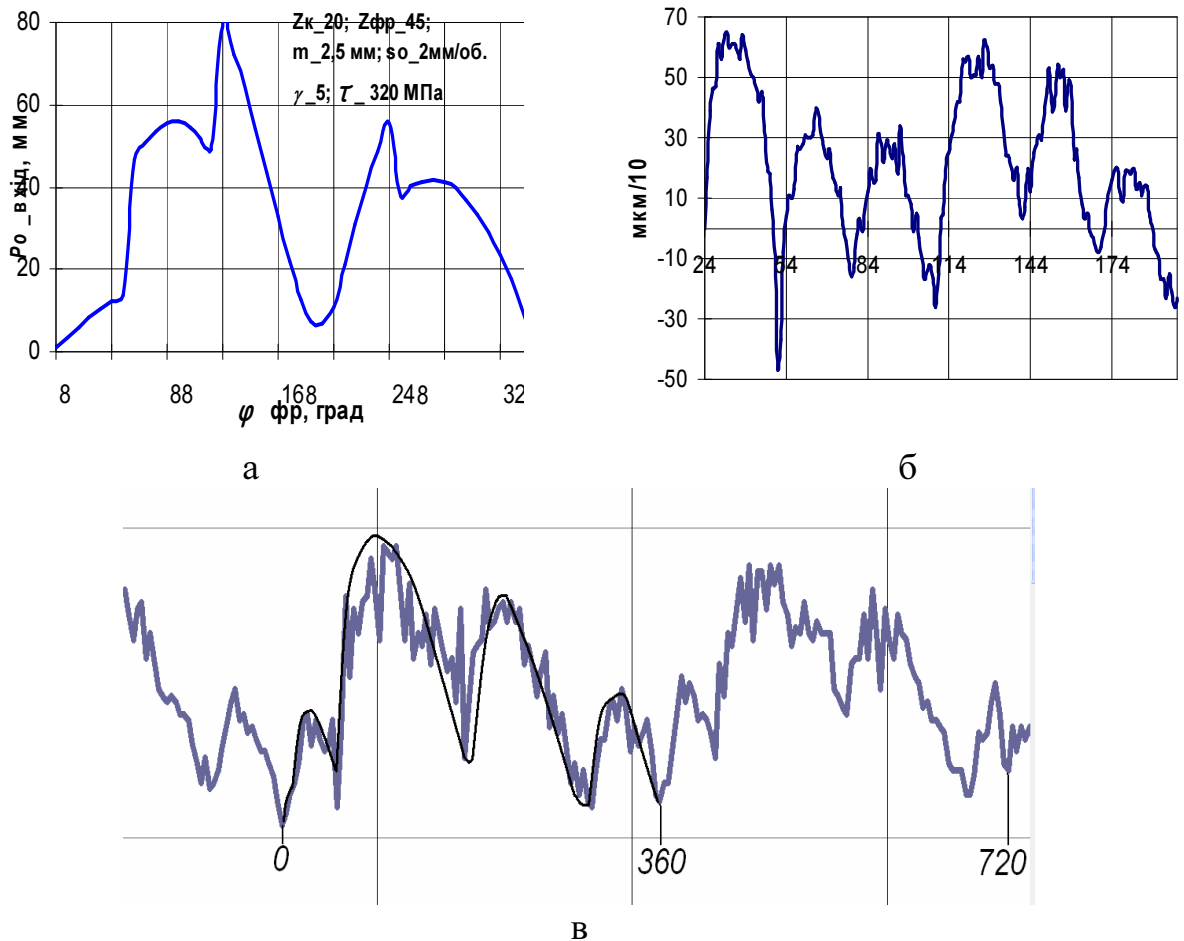


Рис.5.8. Осьова складова сили різання: а - теоретичний графік на основі параметрів зрізів; б, в – типові експериментальні діаграми сили різання за два оберти фрези

5.1.2. Планування експерименту для визначення функції відгуку бокової складової сили різання

5.1.2.1. Початкові дані та матриця планування експерименту. Для перевірки параметрів рівняння (4.4) використано методи повного факторного експерименту [112-114].

Виходячи із встановленої залежності (4.4) вибрано двохфакторний експеримент типу 2^2 , а змінними факторами - модуль та кількість зубців фрези з межами зміни величин: модуль: $m = 1 \text{ мм} - 3 \text{ мм}$; кількість зубців - 45 – 72 (рис.5.9).

Вихідні параметри: зовнішній діаметр фрез 60 мм, 63 мм, 80, 100 мм (рис.5.11); осьова подача $s_0 = 0,153 - 0,502 \text{ мм/об.}$; ширина вершинного леза 1,6 мм і 2 мм; колесо – прямозубе, кількість зубців 14 і 23, матеріал – межа

міцності на зсув 300 МПа; обладнання – зубофрезерний верстат мод.516 з мультиплікатором на осі фрези, $i = 3$; швидкість різання 52,8 м/хв. - 72,6 м/хв.; середній коефіцієнт осадження стружки - 1,65. Для вказаних початкових даних вираз для середньої бокової сили різання має наступний вид:

$$P_x = 38,6 \cdot m^{2,02} \cdot Z_\phi^{-0,955} \quad (5.1)$$

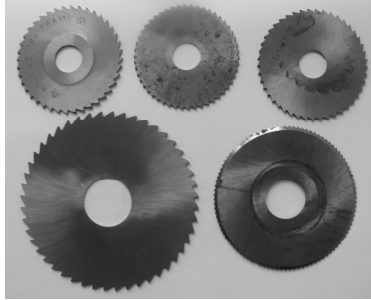


Рис.5.9. Набір дискових фрез із швидкорізальної сталі

Після логарифмування та лінеаризації залежність (5.1) представлена поліномом, у виді якого будемо шукати функцію відгуку з врахуванням взаємодії факторів:

$$\hat{y} = b_0 + p \cdot x_1 + k \cdot x_2 + q \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (5.2)$$

де: $C_p = 38,6$ – коефіцієнт рівняння; p , k , q - показники ступенів; $\ln P_y = y$; $\ln C_p = b_0$; $\ln m = x_1$; $\ln Z_\phi = x_2$.

Результати кодування наведені в табл.5.2.

Табл.5.2

Кодування факторів

Рівень факторів	m , мм		Z_ϕ	
	x_1	$\ln x_1$	x_2	$\ln x_2$
Верхній, +1	3,0	1,1	72	4,28
Основний, 0	2,0	0,69	60	4,09
Нижній, -1	1,0	0	47	3,85

Матриця планування експеримента наведена в табл.5.3

5.1.2.2. Експериментальні дані та їх опрацювання.

В табл.5.4 наведено результати вимірювання осьової складової сили різання у чотирьох дослідах при двохкратній повторюваності.

Перевірка відтворюваності дослідів проводилася основі критерія Кохрена G . В табл.5.5 наведено результати розрахунку дисперсії

Матриця планування експерименту

№	Чинники				Функція		
	x_0	x_1	x_2	$x_1 \cdot x_2$	y_i^1	y_i^{11}	\bar{y}_i
1	+	+	+	+	y_1^1	y_1^{11}	\bar{y}_1
2	+	-	+	-	y_2^1	y_2^{11}	\bar{y}_2
3	+	+	-	-	y_3^1	y_3^{11}	\bar{y}_3
4	+	-	-	+	y_4^1	y_4^{11}	\bar{y}_4

відтворюваності. При достовірній ймовірності відтворюваності $P = 0,95$, для чотирьох дослідів ($N = 4$) і їх двохкратній повторюваності ($k = 2$) дисперсія і середнє квадратичне відхилення становлять, відповідно:

$$S^2 = \frac{(y_{j-k} - \bar{y}_k)^2}{N \cdot (k - 1)} = 0,0268; S = \pm 0,1637, \text{ а величина критерію Кохрена рівна:}$$

$$G = \frac{S_{v \max}^2}{S^2} = \frac{0,0441}{0,1072} = 0,4114.$$

Для початкових даних експеримента табличне значення $G_{таб} = 0,9065$.

Оскільки $G < G_{таб}$, то результати дослідів можна вважати відтворюваними.

Перевірку значимості знайдених коефіцієнтів визначено з допомогою критерія Стюдента t_k :

$$S_{b-i}^2 = \frac{S^2}{N \cdot k} = \frac{0,0268}{4 \cdot 2} = 0,0034; S = \pm 0,058.$$

На основі даних з матриці ПФЕ типу 2^2 , (табл.5.6) коефіцієнти функції відгуку рівні: $b_0 = 0,86$; $b_1 = 1,12$; $b_2 = -0,23$; $b_{12} = 0,015$, а рівняння регресії в кодованих змінних:

$$Y = 0,86 + 1,12 x_1 - 0,23 x_2 + 0,015 x_1 x_2.$$

Таблична величина критерія Стюдента t_k для $P = 0,95$ та кількості ступенів вільності $f = N \cdot (r - 1) = 4$ рівна 2,776, а половина довжини достовірного інтервалу $\Delta b_i = t_k \cdot S_{b_i} = 0,133$.

Табл. 5.4

Осьова сила різання в експериментах

Сила різання P_z , Н		Середнє значення сили різання \overline{P}_y , Н	$\ln \overline{P}_y$
Експеримент 1	Експеримент 2		
5,76	5,88	5,82	1,76
0,57	0,63	0,62	-0,48
8,75	9,16	8,96	2,19
0,91	1,05	0,98	-0,02

Табл.5.5

Дисперсія відтворюваності

№ дослідів	$y_{j_k} - \overline{y}_k$	$(y_{j_k} - \overline{y}_k)^2$
1-1	5,76 - 5,82	$3,6 \cdot 10^{-3}$
1-2	5,88 - 5,82	$3,6 \cdot 10^{-3}$
2-1	0,57 - 0,62	$2,5 \cdot 10^{-3}$
2-2	0,63 - 0,62	$3,6 \cdot 10^{-3}$
3-1	8,75 - 8,96	$44,1 \cdot 10^{-3}$
3-2	9,16 - 8,96	$40,0 \cdot 10^{-3}$
4-1	0,91 - 0,98	$4,9 \cdot 10^{-3}$
4-2	1,05 - 0,98	$4,9 \cdot 10^{-3}$
		$\Sigma 0,1072$

Табл.5.6

№ дослідю	Коди чинників			Сила різання P_y , Н		Середнє значення сили різання $\overline{P_y}$, Н	$\ln \overline{P_y}$
	x_1	x_2	$x_1 x_2$	Дослід 1	Дослід 2		
1.	+	+	+	5,76	5,88	5,82	1,76
2.	-	+	-	0,57	0,63	0,60	-0,51
3.	+	-	-	8,75	9,16	8,96	2,19
4.	-	-	+	0,91	1,05	0,98	-0,02

Умові $|b_i| \geq \Delta b_i$ задовольняють коефіцієнти $|b_0| = 0,86$; $|b_1| = 1,12$; $|b_2| = -0,23$; значення коефіцієнта b_{12} неістотне і в рівнянні регресії не враховується.

Перевірка адекватності моделі. Дисперсія адекватності визначено з залежності:

$$S_{ad}^2 = \frac{k}{N - n} \sum_k (\overline{y_k} - \hat{y}_k)^2.$$

Розрахункове значення дисперсії адекватності для трьох членів полінома, кількості дослідів $N = 4$ і кількості повторюваності дослідів $k = 2$ становить 0,023, а критерій Фішера рівний 0,13. Оскільки розрахункове значення цього критерія менше його критичного значення, рівного 4,07, то можна зробити висновок, що модель адекватна.

Розрахункові функції відгуку:

$$\hat{y}_1 = 0,86 + 1,12 (+1) - 0,23 (+1) = 1,75;$$

$$\hat{y}_2 = 0,86 + 1,12 (-1) - 0,23 (+1) = -0,49;$$

$$\hat{y}_3 = 0,86 + 1,12 (+1) - 0,23 (-1) = 2,21;$$

$$\hat{y}_4 = 0,86 + 1,12 (-1) - 0,23 (-1) = 0,03.$$

Наступні розрахунки приведені в табл.5.7

Табл. 5.7

№ дослідю	\bar{y}_k	\hat{y}_k	$(\bar{y}_k - \hat{y}_k)$	$(\bar{y}_k - \hat{y}_k)^2$
1	1,76	1,75	0,01	$1,0 \cdot 10^{-4}$
2	-0,51	-0,49	0,02	$4,0 \cdot 10^{-4}$
3	2,19	2,21	0,02	$4,0 \cdot 10^{-4}$
4	-0,02	0,03	0,05	$25 \cdot 10^{-4}$
				$\Sigma 34 \cdot 10^{-4}$

$$S_{ad}^2 = \frac{2}{4 - 3} \cdot 0,0034 = 0,0068.$$

$$\text{Критерій Фішера: } F = \frac{S_{ad}^2}{S^2} = \frac{0,0068}{0,0268} = 0,254.$$

Критичне значення критерію Фішера для даних умов дорівнює $F_{кр} = 7,71$.

Оскільки умова $F < F_{кр}$ виконується, то модель адекватна.

Перетворенням незалежних змінних x_i в безрозмірні X_i отримуємо вирази:

$$X_1 = \frac{2 (\ln \bar{x}_1 - 1,1)}{1,1} + 1 = 1,82 \ln \bar{x}_1 - 1;$$

$$X_2 = \frac{2 (\ln \bar{x}_2 - 4,28)}{4,28 - 3,85} + 1 = 4,65 \ln \bar{x}_2 - 18,9.$$

Модель в натуральних змінних:

$$\begin{aligned} Y &= 0,86 + 1,12 \cdot (1,82 \ln m - 1) - 0,23 \cdot (4,65 \ln Z_{\phi p} - 18,9) = \\ &= 3,74 + 2,04 \cdot \ln m - 1,07 \cdot \ln Z_{\phi} \end{aligned}$$

тобто:

$$\ln P_x = e^{3,74} + 2,04 \cdot \ln m - 1,07 \cdot \ln Z_{\phi}$$

$$e^{3,71} + \ln m^{2,04} + \ln Z_{\phi p}^{-1,07}$$

Після потенціювання рівняння (5.3) отримаємо шукану залежність для бокової сили різання:

$$P_x = 40,9 \cdot m^{2,04} \cdot Z_{fp}^{-1,07} . \quad (5.4)$$

Відхилення теоретичних параметрів рівняння (1) від експериментальних за рівнянням (3) становить: $\Delta C_p = 6,3\%$; $\Delta p = 1\%$; $\Delta k = 10,7\%$,що, загалом, підтверджує достовірність теоретичної залежності сили різання та можливість її використання для вибору режимів різання, а також параметрів фрези та верстата в радіально-коловому способі нарізання зубчастих коліс.

Висновки по розділу 5

1. Розроблена сучасна методика експериментальних досліджень сили різання, яка полягає в записі з допомогою індукційного безконтактного давача на комп'ютер пружних деформацій фрез, викликаних силою різання і її складовими. Деформаціям ставиться у відповідність величина сили різання на основі попереднього тарування дискових фрез двох видів - суцільної швидкорізальної та збірної з пластинами твердого сплаву.

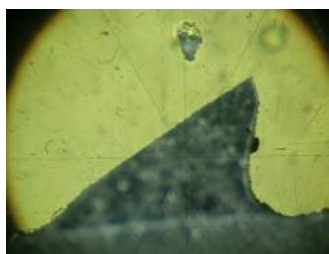
2. Дослідження підтвердили, що теоретичні графіки зміни осьової складової сили різання в одній впадині і закономірності нерівномірності силового навантаження повністю збігаються з експериментальними даними, що свідчить про правильність основних положень математичних моделей параметрів зрізів та сили різання.

3. На основі розробленої методики проведено повний факторний експеримент типу 2^2 з метою перевірки теоретичної залежності для розрахунку осьової складової сили різання, яка найбільше впливає на зниження точності зубюофрезерування. За усіма критеріями підтверджено адекватність експериментальної моделі теоретичній, що дає підстави використовувати цю модель для обґрунтування вибору та розрахунку технічних і технологічних параметрів процесу зубофрезерування, верстата та інструмента.

6. МЕТОДИКА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ПРУЖНИХ ДЕФОРМАЦІЙ. НАПРЯМКИ УДОСКОНАЛЕННЯ РАДІАЛЬНО-КОЛОВОГО СПОСОБУ

6.1. Вибір раціональних параметрів процесу РК-зубофрезерування

Ставилася задача підібрати значення параметрів технологічного процесу зубофрезерування РК-способом, які впливають на процес різання та формоутворення, а також на досягнену точність і шорсткість зубців. Важливість цієї задачі демонструє рис.6.1, на якому наведено типові види втрати працездатності дискових фрез внаслідок неправильно вибраних умов обробки: а, б - спрацювання зубців по передній і задній поверхнях, причина - велика швидкість різання; в - повне зношування, причина - велика глибина різання; г – виламування ділянки фрези, причина - велика осьова подача; д – зношування по бокових поверхнях зубців, причина – велика глибина різання; е - ламання фрези, причина – велика подача, мала кількість зубців фрези, великий діаметр фрези.



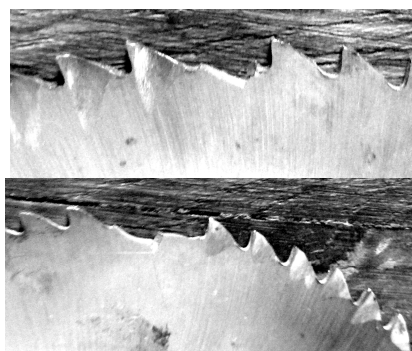
зношування по передній
поверхні
а



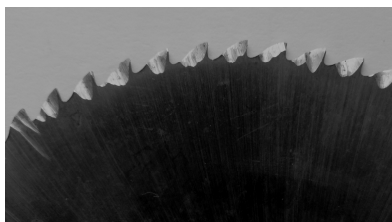
зношування по задній
поверхні
б



повне спрацювання
зубців
в



г



д



е

Рис.6.1. Типові види втрати працездатності дискових фрез в процесі РК-зубофрезерування

Залежності, отримані в розділі 4 та підтверджені експериментально в розділі 5, що характеризують вплив пружних деформацій на точність профілю та висоту мікронерівностей профілів охоплюють параметри, які характеризують початкові умови. Це дає змогу вирішити зворотну задачу, що виникає на етапі технологічного проектування – розрахувати та обґрунтувати значення конструктивних, технічних і технологічних параметрів процесу радіально-колового зубофрезерування, які здатні забезпечити технічні умови – дотримання допуску на відхилення профілю зубців і забезпечення необхідної величини параметра шорсткості поверхонь зубців. До регульованих параметрів можна віднести: зовнішній діаметр фрези D_ϕ (радіус R_ϕ); кількість зубців фрези Z_ϕ ; товщина фрези b ; радіальна жорсткість системи J_y ; приведена крутильна жорсткість стола верстата G ; осьова подача s_o .

Умову забезпечення необхідних точності і шорсткості можна представити так:

$$\begin{cases} f_{f_деф} = \pm f_f^1 \mp f_f^{11} \mp f_f^{111} \leq T_n \cdot [f_f] \\ h_\Sigma = \frac{s_o^2}{8 \cdot R_\phi} + a_{вер} \cdot \sin \psi \leq R_z. \end{cases}, \quad (6.1)$$

де $[f_f]$ – допуск на похибку профіля для заданої ступені точності зубчастого колеса; T_n – коефіцієнт, який враховує частку пружних деформацій в структурі сумарної похибки обробки; R_z – параметр шорсткості профіля зубця.

Встановлено, що для 8-9 ступенів точності зубчастих коліс величина коефіцієнта T_n залежить від припуску, який усувається із впадини між зубцями на останньому переході (табл.6.1).

Наприклад, для таких початкових даних: жорсткість верстата: радіальна 30 кН/мм, крутильна стола 300 кН/град; модуль колеса 3 мм, ексцентриситет 4,12 мм; кількість зубців колеса - 36, колесо прямозубе; матеріал заготовки – сталь 40Х, межа міцності на зсув 350 МПа, середній коефіцієнт осадження стружки $\xi = 2,6$; кут максимальної товщини зрізу 15^0 ; кут зачеплення $\alpha_\omega = 20^0$; різання на повну глибину профілю, $T = 0,45$

необхідно вибрати дискову фрезу і встановити величину осьової подачі, які мають забезпечити: допуск відхилення профілю 15 мкм, параметр шорсткості $R_z = 12,5$ мкм.

Табл.6.1

Коефіцієнт T_n при глибині різання			
повна висота профілю (однопрохідне різання)	висота	0,35 повної висоти профілю (другий прохід у двоохпрохідному різанні)	0,15 повної висоти профілю (третій прохід у трьохпрохідному різанні)
	0,45	0,25	0,15

Після підстановки вказаних початкових даних, на основі системи нерівностей (6.1) отримуємо:

$$\begin{cases} \pm 0,0428 \cdot s_o^{0,945} \cdot Z_{\phi p}^{-0,157} \cdot R_{\phi}^{-0,415} \mp 4,3 \cdot 10^{-4} R_{\phi}^2 \cdot Z_{\phi}^{-0,955} \leq 6,75 \cdot 10^{-3} \text{ мм}; \\ \frac{s_o^2}{8 \cdot R_{\phi}} + a_{\text{вер}} \cdot \sin \frac{10}{Z_{\phi}} \leq 0,0125 \text{ мм}. \end{cases}$$

Назначимо параметри: фреза - зовнішній діаметр $D_{\phi} = 100$ мм, кількість зубців 48; для даних умов середня товщина зрізів на вершинному лезі $a_{\text{вер}} = 0,22$ мм:

$$\begin{cases} \pm 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot s_o^{0,945} \mp 22,4 \cdot 10^{-3} \leq 6,75 \cdot 10^{-3}; \\ 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot s_o^2 + 0,72 \cdot 10^{-3} \leq 12,5 \cdot 10^{-3}, \end{cases}$$

звідки отримуємо:

- з умови точності:

- по лівих профілях $s_o^{0,945} \leq 6,34$, або $s_o \leq 7,06$ мм/об.;

- по правих профілях $s_o^{0,945} \leq 3,4$, або $s_o \leq 3,65$ мм/об.;

- з умов шорсткості: $s_o^2 \leq 4,71$, або $s_o \leq 2,17$ мм/об.

Остаточно призначаємо $s_o = 2,17$ мм/об. Цю величину необхідно скоректувати по верстату, прийнявши з паспортних даних найближче менше значення подачі.

6.2. Регулювання параметрів процесу зубофрезерування на основі системи моделювання динамічних процесів

Для більш повного врахування чинників процесу РК-способу і точніших розрахунків можна призначати технічні та технологічні параметри процесу зубофрезерування з допомогою системи динамічного імітаційного моделювання Simulink MATLAB. Ця система дає змогу моделювати перехідні процеси у пружній системі верстата і оцінювати їх вплив на точність зубчастого колеса і шорсткість поверхонь зубців. Подавши на вхід динамічної моделі пружної системи процесу різання (ПС ПР) гармонічний сигнал, що описує закономірність зміни товщини зрізів на бокових вхідних лезах, на виході ПС ПР отримуємо імітацію осьової складової сили різання, яка збуджує коливання фрези в осьовому напрямку (ПС В) (рис.6.1) [95, 107,108, 115].

Цей вихідний сигнал ПС В характеризує пружні коливання в ділянці зони різання і контакту інструменту з заготовкою, тобто періодичні деформації дискової фрези і викликану ними похибку обробки. Амплітуда коливань фрези з частотою, кратною кількості її зубців відповідає висоті мікронерівностей на поверхнях зубців колеса, а амплітуда, кратна оберту фрези визначає граничне значення похибки профілю зубців нарізованого колеса.

Динамічна характеристика складової сили різання на передній поверхні зубця фрези від зміни товщини зрізаного шару бокового леза в операторній формі та рівняння коливань на власних частотах описана за даними [116].

Постійні часу перехідних процесів в пружній системі процесу різання можна визначити на основі реологічного моделювання [117, 118].

Так, при $[\tau] = 1100$ МПа і передньому куті інструменту $\gamma = 6,5^0$ з допомогою моделювання отримуємо: кут зсуву $\Phi = 38^0$; коефіцієнт осадження

стружки $\xi = 1,4$; товщина стружки $a_c = 1,62$; довжина ділянки контакту стружки $C_L = 1,63$. Для цих даних при товщині зрізу на боковому лезі фрези 0,5 мм і швидкості різання 100 м/хв. постійна часу стружкоутворення T_P буде дорівнювати $5,4 \cdot 10^{-4}$ с.

Значення інерційної постійної часу коливання і постійної часу демпфування маси, яка зв'язана з фрезою можна розрахувати на основі методики, наведеної в роботі [115].

Наприклад, якщо маса інструментального вузла 10 кг, ширина фрези 2,5 мм, зовнішній діаметр 200 мм, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\lambda = 0,3$, то жорсткість вузла фрези становить 3 кН/мм; постійні часу рівні: $T_1 = 0,058$ с; $T_2 = 0,0055$ с; власна частота коливань $f_c = 12,6$ Гц.

Жорсткість інструментальної ланки, яка обмежується жорсткістю фрези, як найбільш податливої складової можна визначити розрахунково [106].

Динамічні характеристики ланок пружної системи верстата, приведені до ділянки контакту зубчастого колеса з інструментом можна встановити експериментально з допомогою методики [119].

Схему динамічної системи верстата з параметрами пружних ланок, розрахованих для вказаних початкових умов наведено на рис.6.2.

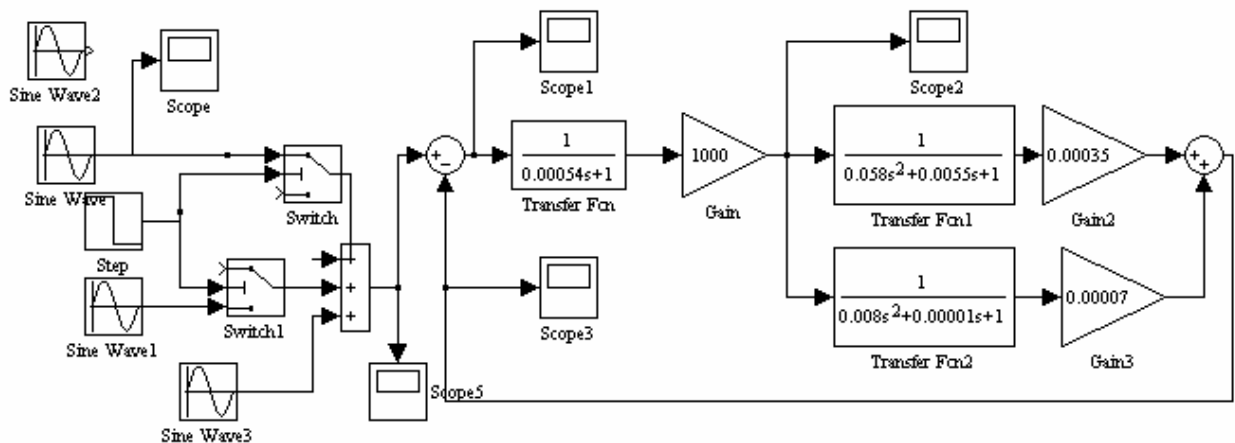


Рис.6.2. Схема пружної системи верстата з пружною системою процесу різання в системі Simulink

На основі моделювання для встановлених початкових умов можна визначити похибку профілю та висоту мікронерівностей, а також регулювати

процес зубофрезерування вибором конструктивних і технічних параметрів і призначенням раціональних величини подачі і швидкості різання для забезпечення заданих технічних умов на виготовлення зубчастого колеса.

Так, для цих початкових умов, для модуля колеса 2,5 мм при діаметрі фрези 200 мм і її товщині 3 мм; кількість зубців: фрези - 45, колеса – 20 на рис.6.3 показано коливання сили різання, а на рис.6.4, а – викликані цією силою пружні коливання, розмах яких характеризує похибку профіля, а відхилення профілю на вищих частотах - мікроколивання. З результатів імітації перехідних процесів в системі Simulink амплітуда коливання сили різання становить 275 Н, похибка профілю 0,45 мм, висота мікронерівностей 75 мкм.

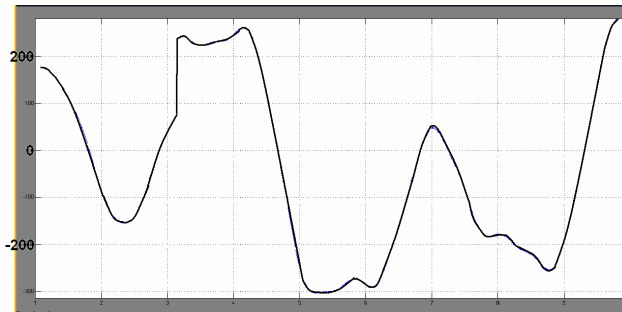
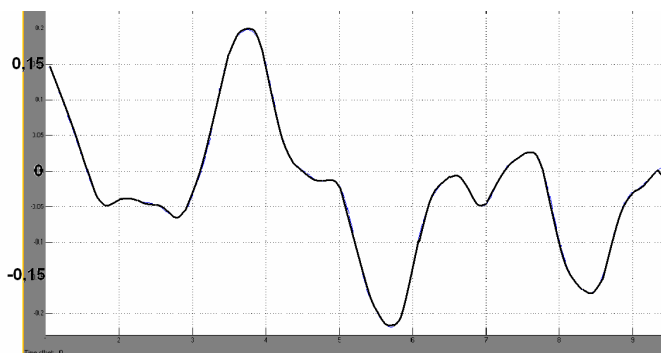
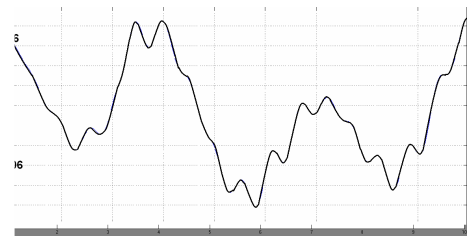


Рис.6.3. Коливання сили різання
 $[\tau] = 1100 \text{ МПа}; \gamma = 6,5^\circ; \Phi = 38^\circ; \xi = 1,4$

Прийнявши ширину фрези 4 мм, а зовнішній діаметр 160 мм, для тих же інших початкових даних отримуємо: постійні часу коливання в ланцюзі фрези: $T_1 = 0,0126 \text{ с}; T_2 = 0,0012 \text{ с};$ власна частота коливань $f_c = 12,6 \text{ Гц}.$ Для цих значень параметрів висота мікронерівностей не перевищує 15 мкм, а похибка профілю зменшилася до величини 0,16 мм (рис.6.4, б).



а



б

Рис.6.4. Похибка профілю зубця колеса початкова (а) і після зміни параметрів фрези (б)

6.3. Удосконалення кінематика зубофрезерного верстата для радіально-колового способу зубофрезерування

Технологічні можливості РК-способу дозволяють нарізати колеса будь-яких профілів, для цього необхідно забезпечити зміну рівномірного руху інструмента. Вирішення цієї задачі можливе модернізацією зубофрезерного верстату і використанням для переміщення дискової фрези керованих приводів [120-123].

У схемі на рисунку 6.5 обертання дискової фрези надається від шпинделя зубофрезерного верстата через зубчасту пасову передачу з натяжним роликом, при цьому пасова передача виконує роль мультиплікатора і забезпечує підвищення обертів на осі фрези. Натяжний ролик компенсує зміну міжцентрової віддалі у пасовій передачі внаслідок періодичного зворотно-поступального переміщення каретки, величина якого відповідає модулю нарізаного колеса, а частота – кількості зубців нарізаного колеса; каретка рухається по напрямних салазках. Привід переміщення каретки з фрезою надається від серводвигуна, а закон її лінійного переміщення встановлюється системою числового програмного керування двигуна, або контролером. Весь механізм міститься на консолі, яка монтується на поворотній частині інструментального супорта верстата для можливості нарізання косозубих коліс.

Другий варіант компонування зубофрезерного верстата, який працює за РК-способом, або його модернізації показано на рисунку 6.6. Обертання дискової фрези надається від серводвигуна, керованого контролером, або комп'ютером (в експериментальних дослідженнях). Встановлення частоти обертів фрези залежить від матеріалу зубців, її діаметру та фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки і розраховується на основі моделі точності і якості зубчастих поверхонь, утворюваних РК-способом.

Періодичне зворотно-поступальне радіальне переміщення дискової фрези з зубцевою частотою здійснюється з допомогою серводвигуна 8.

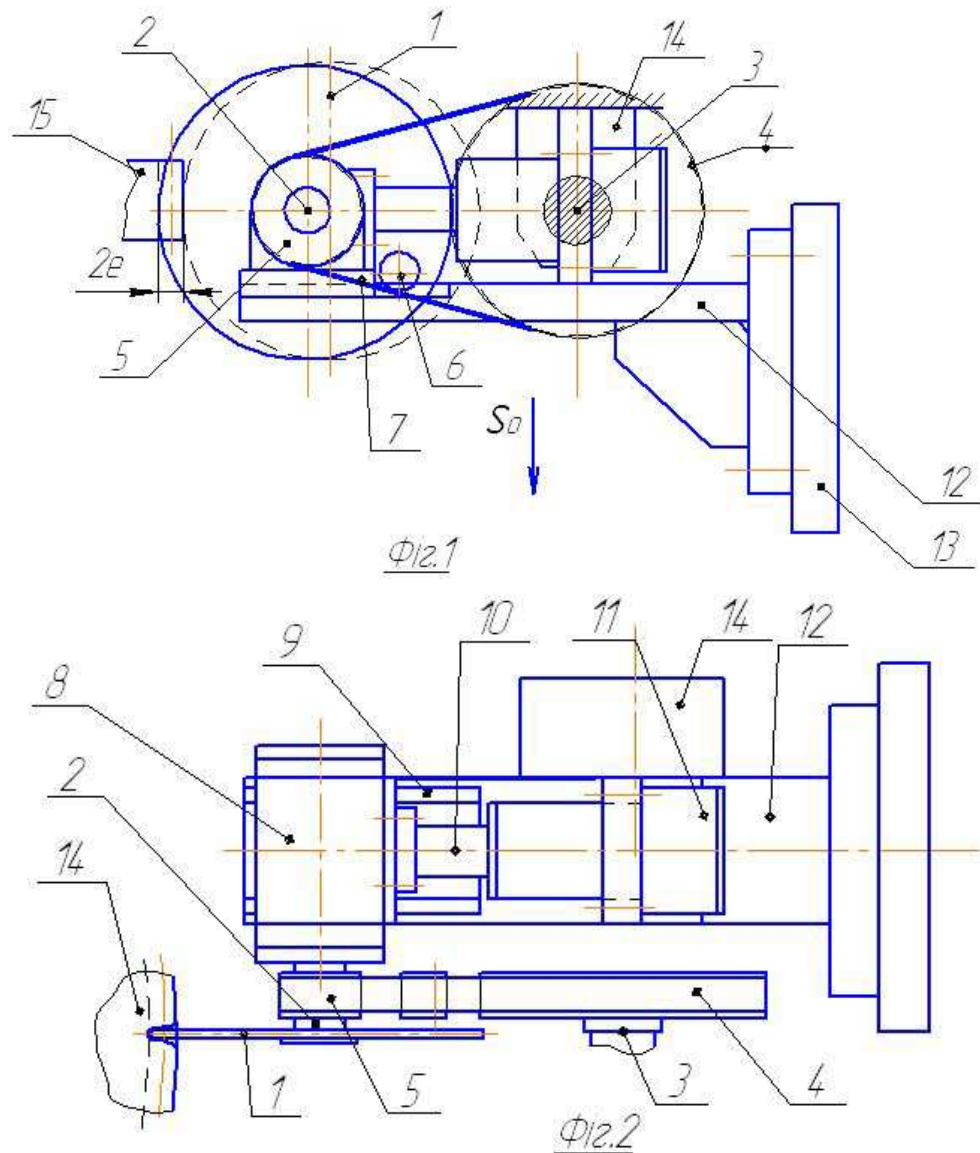


Рисунок 6.5. Робоча ділянка зубофрезерного верстата з приводами головного руху від інструментального шпинделя та переміщення каретки від серводвигуна

1- дискова фреза; 2 - інструментальний вал; 3 - вісь шпинделя зубофрезерного верстата; 4 - ведуче колесо пасової передачі; 5 – ведене колесо пасової передачі; 6 – натяжний ролик пасової передачі; 7 – пас; 8 – корпус інструментального валу; 9 – напрямні салазки; 10 - рухомий шток крокового двигуна; 11 - кроковий двигун; 12 – платформа; 13 – супорт зубофрезерного верстата; 14 – контрпідтримка шпинделя зубофрезерного верстата; 15 – зубчасте колесо, яке нарізають.

Числове програмне керування двома координатами – швидкістю різання і швидкістю осьового переміщення фрези дозволяє нарізати зубчасті поверхні будь-яких профілів – евольвентних, зачеплення Новикова, аркових та ін. зміною швидкості переміщення (закону руху) інструментальної каретки.

Рух колової подачі - обертання стола з заготовкою може здійснюватися від одного приводу – асинхронного двигуна і черв'ячної передачі. Цей рух відбувається з однією швидкістю незалежно від параметрів нарізаних коліс, а адаптація процесу до заготовки відбувається програмуванням рухів фрези і каретки.

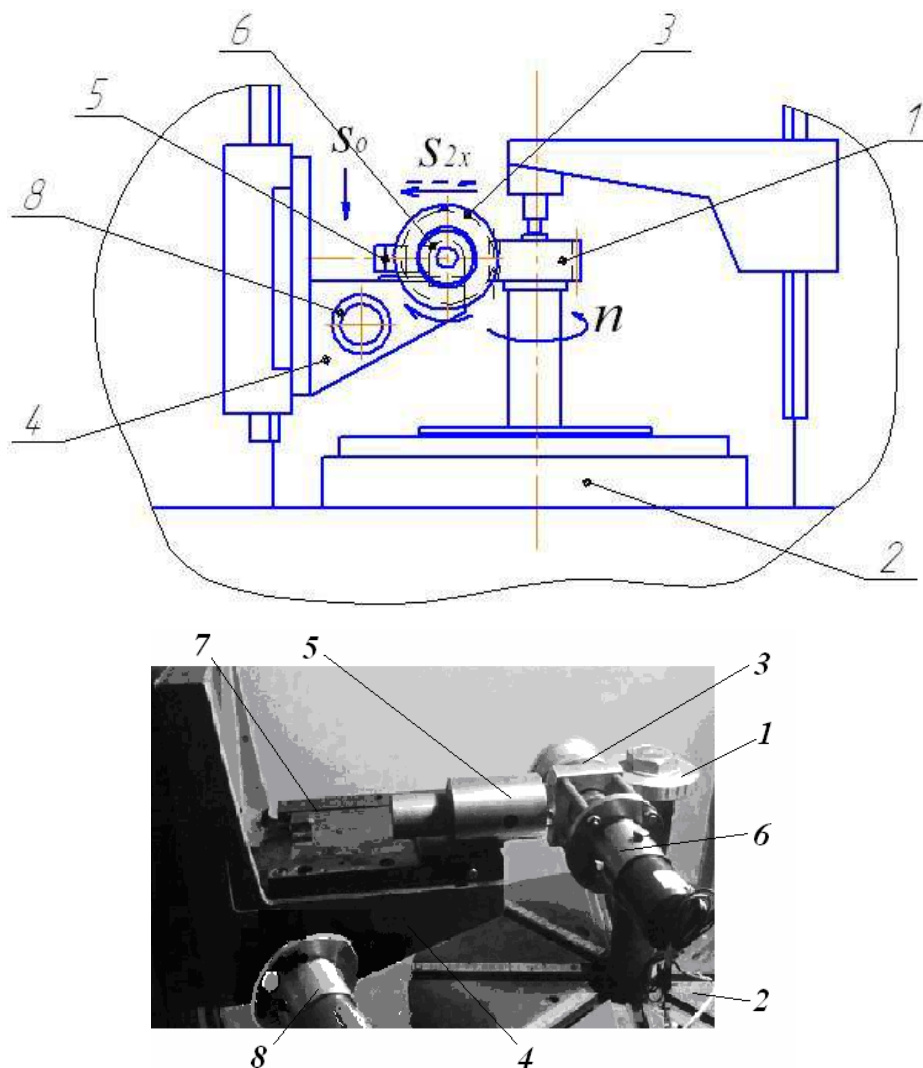


Рисунок 6.6. Робочий простір зуборезного верстата з керованими приводами для нарізання коліс за РК-способом

1 – заготовка; 2 – стіл верстата; 3 – дискова фреза; 4 – консоль з напрямними; 5 – модуль фрези; 6 – серводвигун приводу головного руху; 7 – каретка; 8 – серводвигун приводу періодичного радіального переміщення каретки

6.4. Впровадження у виробництво синусоїдальних зубчастих коліс та передач

Проведені наукові дослідження технологічного процесу нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом показують широку

універсальність технології цього способу та можливість її використання для різних типів і видів зубчастих коліс. Разом з тим, пряме використання цієї технології передбачає виготовлення синусоїдних зубчастих коліс, що досягається при найменших виробничих витратах. Розроблення і обґрунтування основних положень нової технології, яка дає змогу значно скоротити виробничі втрати і підвищити продуктивність процесу зубонарізання дає підстави для впровадження і використання синусоїдальних зубчастих коліс і передач в машинобудування, зважаючи на відомі їх переваги у порівнянні з евольвентними (табл. 6.2) [17, 18, 110, 124, 125].

Висновки по розділу 6

1. На основі отриманих в роботі математичних залежностей та результатів досліджень створено теоретико – практичну основу для вибору, призначення і розрахунку раціональних конструктивних, технічних і технологічних параметрів (робочих режимів) процесу радіально-колового зубофрезерування та розроблено рекомендації для можливості їх використання в промисловості.

2. Найбільш ефективним напрямком удосконалення РК-способу зубофрезерування є модернізація універсальних зубофрезерних верстатів з ручним керуванням. Вона полягає в установці на місці фрезерного супорта консолі з кареткою для зворотно-поступального переміщення фрези і оснащення робочих рухів – переміщення супорта і обертання фрези серводвигунами відповідної потужності, керованими програмно. Така модернізація дасть змогу одним інструментом нарізати колеса не лише різних модулів та кількості зубців, але й різних видів зачеплення – евольвентних, синусоїдальних, Новикова, аркових тощо. Це забезпечить найвищий рівень універсальності обладнання і інструменту, максимально збільшить продуктивність процесу зубонарізання та економію виробничих витрат в технології виготовлення зубчастих коліс.

Табл. 6.2. Порівня характеристик передач

Евольвентна передача	Синусоїдальна передача
мінімальна кількість зубців, нарізаних без підрізання	
17	3
рівень шуму	
високий, особливо на високих швидкостях	нижчий на 10-15 %, менша швидкість удару в зачепленні
напруження в основі ніжки зубця	
макс. радіус – не більше 0,2 т – місце концентрації згинних напружень	плавна перехідна поверхня, окреслена синусоїдою, відсутність ділянки концентрацій напружень, вищий опір згину
товщина зубця на ділільному діаметрі	
	більша кут зачеплення в передачі можна змінювати в межах від 15° до 40°, відповідно, міняючи товщину зубців біля основи і їх міцність
коефіцієнт торцьового перекриття	
	вищий, більше зубців в зачепленні, менші питомі навантаження в передачі
навантажувальна здатність	
висока	вища на 30-50%: можливість передавати більшу енергію. При однакових силових параметрах - на 20 -30 % менші маса та габарити приводу
-	більші зносостійкість та довговічність
-	краща протидія спрацюванню, менша циклічна втомлюваність і вища контактна міцність в передачі

3. Запропоновані шляхи модернізації та зміни в кінематиці верстатів для зубонарізання радіально-коловим способом дають змогу:

1 – нарізати колеса будь-яких профілів, що розширяє технологічні можливості серійних верстатів та їх універсальність;

2 – скоротити кінематичні ланцюги і значно спростити налагодження верстатів;

3 – внаслідок зменшення сили різання забезпечити істотне зменшення витрат енергії та досягти підвищення точності нарізання зубчастих коліс;

4 – за рахунок збільшення швидкості різання та осьової подачі, скорочення основного часу, а також часу на переналагодження обладнання підвищити продуктивність процесу зубонарізання.

4. Теоретичні та практичні дослідження технології радіально-колового зубофрезерування та її висока ефективність створюють передумови для широкого впровадження та використання в машинобудуванні синусоїдальних зубчастих коліс і передач, які мають істотні переваги порівняно з евольвентними колесами і передачами.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу обґрунтованого вибору раціональних технологічних, конструктивних і технічних параметрів технологічного процесу зубофрезерування радіально-коловим способом для забезпечення заданої якості зубчастих поверхонь шляхом розроблення математичних моделей і комплексного описання та дослідження процесу зубофрезерування з урахуванням впливу пружних деформацій на точність зубооброблення.

1. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що серед відомих способів нарізання зубчастих коліс радіально-коловий спосіб характеризується високою ефективністю та універсальністю, проте, на даний час не достатньо розроблені теоретичні засади цього технологічного процесу для забезпечення якості зубчастих коліс.

2. Запропоновано теоретико-математичні залежності для послідовного моделювання взаємозв'язаних чинників радіально-колового способу зубофрезерування: параметрів зрізів, сили різання, пружних деформацій технологічної системи та похибок зубооброблення. Виведено залежності для розрахунку товщини, ширини і площі перерізу зрізів на зубцях і лезах, параметри яких періодично змінюються в часі оберта фрези. Встановлено, що за один оберт ці параметри набувають максимальних значень на середніх ділянках врізання (100° - 130°) та виходу фрези (240° - 280°); найбільші зрізи виконують вершинні леза.

3. Отримано вирази для розрахунку сумарної площі зрізів та параметрів зрізів вхідних бокових лез дискової фрези. Встановлено, що найбільший вплив на сумарну максимальну площу зрізів мають осьова подача, модуль і діаметр фрези та кількість її зубців; вплив параметрів m і s_0 лінійний; залежність від D_f і Z_f обернена. Площа зрізів боковими лезами залежить лише від модуля і осьової подачі і не залежить від інших чинників процесу.

4. Виведено залежності для розрахунку сили різання як функції площі перерізу зрізів, інтенсивності пластичного деформування та міцності матеріалу заготовки. Сила різання за оберт фрези є нелінійною функцією, найбільша сила виникає на зубцях, що відповідають кутам повороту фрези $\sim 110^{\circ}$ та $\sim 210^{\circ}$.

5. На основі аналізу сили різання встановлено, що процес зубонарізання РК-способом характеризується нерівномірністю, а коливання величини сили різання негативно впливають на точність оброблення, якість робочих поверхонь зубців та довговічність інструменту. Проте, сила різання дисковою фрезою порівняно з черв'ячною фрезою в однакових умовах обробки і осьової подачі в 2,5-3,5 рази менша. На бокових вхідних лезах сила різання P_x у 3 – 5 разів менша від сили на вершинних лезах.

6. Встановлено, що на точність зубчастого колеса найістотніше впливають періодичні пружні деформації фрези в її осьовому напрямку. Максимальні відхилення профілів зубців колеса виникають в середній частині лівих і правих профілів, при цьому більша похибка виникає на вхідній ділянці фрези. Відхилення профілів внаслідок радіальних деформацій становлять 0,2 - 0,3 від величини осьових деформацій, проте вони можуть впливати на точність при різанні на повну глибину профілю і нарізанні зубчастих коліс з великими осьовими подачами. Для зменшення сили різання та пружних деформацій рекомендується: збільшення швидкості різання; розімкнення кінематичного зв'язку між фрезою і столом верстата; збільшення кількості зубців інструменту; загострення фрез з почерговою зміною кута нахилу вершинного леза і утворення додатнього заднього кута на бокових лезах.

8. Висота мікронерівностей зубців, які утворюються внаслідок осьової подачі залежить від модуля і припадає на дно западини, а висота мікронерівностей, які виникають в результаті руху обкочування залежить від числа зубців інструменту і припадає на ділильний діаметр колеса. На виході фрези висота мікронерівностей до двох разів більша, ніж на вході.

9. Удосконалення технології зуборезування радіально-коловим способом можлива шляхом модернізації універсальних зубофрезерних верстатів: установці на місці фрезерного супорта консолі з кареткою для зворотно-поступального переміщення фрези і оснащення переміщення супорта і обертання фрези серводвигунами, керованими програмно. Це дає змогу одним інструментом нарізати колеса не лише різних модулів та кількості зубців, але й різних профілів, забезпечує універсальність обладнання та інструменту і високу ефективність процесу зубонарізання.

10. Розроблена сучасна методика експериментальних досліджень сили різання, яка базується на записі з допомогою комп'ютера пружних деформацій

фрези, вимірюваних безконтактним індукційним давачем. Дослідженнями за методом повного факторного експерименту типу 2^2 підтверджено збіжність теоретичних результатів сили різання і нерівномірності силового навантаження з експериментальними даними та можливість використовувати розроблені моделі у практиці.

11. На основі отриманих в роботі математичних залежностей та результатів досліджень створено основу для вибору, призначення і розрахунку раціональних технологічних, конструктивних і технічних параметрів технологічного процесу радіально-колового зубофрезерування та розроблено рекомендації для його практичного використання.

Список використаних джерел

1. Скоростное зубофрезерование [Текст] / О. И. Моисеенко, И. П. Захаренко, Л. С. Сидоренко [и др.] – Киев: «Техника», 1972. – 216 с.
2. Грицай І. Є. Стан і перспективи в галузі зубчастих передач і технології зубообробки [Текст] / І.Є. Грицай // *Машиностроение и техносфера XXI века* : сборник трудов XIX международной научно-технической конференции, в 3-х томах, 17-22 сентября 2012 г. - Севастополь. - Т3. - С. 202-209.
3. Gritsay. Sinusoidale Zahnradubersetzung als Alternative zur traditionellen ubersetzung und die Neue Schneidemethode von Zahnradern [Text] / Gritsay // «European Applied Sciences». - Stuttgart, Germany, 2013. - № 5-2. – S. 3-5.
4. Грицай І. Є. Удосконалення технології виготовлення зубчастих коліс на основі нового методу зубонарізання [Текст] / І. Є. Грицай, В. І. Вільшанецький // *Вісник НТУ "ХП"* : збірник наукових праць «Проблеми механічного приводу». – Харків, 2011. - С. 44-52.
5. Коганов И. А. Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей [Текст] / И. А. Коганов. — Тула: Приокское книжн. из-во, 1970. — 180 с.
6. Формоутворення зубчастих коліс різних класів вихідними дисковими формоутворювальними тілами [Текст] / А. Кривошея, Ю. Данильченко та ін. // 8-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : тези доповідей. – 23-25 травня 2007 р., Львів. - С. 101.
7. Пастернак С. І. Економічне обґрунтування методу контурної обробки деталей з періодичними профілями дисковим інструментом [Текст] / С. І. Пастернак, Ю. М. Данильченко, М. Г. Сторчак, А. В. Кривошея // *Вісник НТУ "ХП"*: збірник наукових праць «Проблеми механічного приводу». – Харків, 2009. - № 19. - С.118-126.
8. Бабичев Д. Т. О синтезе переходной кривой во впадине цилиндрических зубчатых колес и червяков [Текст] / Д. Т. Бабичев, А. В. Кривошея, М. Г.

Сторчак [и др.] // Вісник НТУ "ХП": збірник наукових праць «Проблеми механічного приводу». – Харків, 2013. - № 41. - ISSN 2079-0791.

9. Пастернак С. І. Силові характеристики контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом [Текст] / С. І. Пастернак, Ю. М. Данильченко, М. Г. Сторчак, А. В. Кривошея // Вестник НТУ "ХПИ": сборник научных трудов «Проблеми механічного приводу». - Харків, 2011. - № 28. - С.110-117.

10. Данильченко Ю. М. Математичне моделювання законів руху дискового інструменту при обробці зубчастих коліс довільного профілю [Текст] / Ю. М. Данильченко, А. В. Кривошея, С. І. Пастернак // Вестник НТУУ "КПИ" : сборник научных трудов, сер. Машиностроение, 2006. – № 49. – С. 112-118.

11. Пастернак С. І. Контурна обробка зубчастих коліс з довільним профілем зубів дисковими інструментами [Текст] / С. І. Пастернак, Ю. М. Данильченко [та ін.] : матеріали доповідей Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Прогресивні напрямки розвитку машино-приладобудівних галузей та транспорту". – Севастополь: В-во СевНТУ, 2007. – С. 90-91.

12. Данильченко Ю. М. Продуктивність контурної обробки зубчастих ланок дисковим інструментом [Текст] / Ю. М. Данильченко, С. І. Пастернак // Вестник НТУУ "КПИ" : сборник научных трудов, сер. Машиностроение, 2008. – № 53. – С. 215-225.

13. Данильченко Ю. М. Кінематика формоутворення циліндричних зубчастих коліс з заданим профілем дисковим інструментом [Текст] / Ю. М. Данильченко, А. В. Кривошея, С. І. Пастернак, Є. В. Короткий // Вестник НТУУ "КПИ" : сборник научных трудов, сер. Машиностроение, 2005. - № 46. – С.104-108.

14. Спосіб нарізки зубчастих коліс синусоїдальної передачі Благута [Текст] : пат. України № 73550 : МПК7 В23Р15/14 / Благут Е.М. Бюл. № 8. - 2005 р.

15. Грицай І. Є. Закономірності формоутворення та методичні похибки профілювання у радіально-коловому методі нарізання глобоїдних черв'ячних коліс [Текст] / І. Є. Грицай, Н. М. Юрчишин // Вісник НУ «Львівська

політехніка» : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2014. - № 772. - С. 14 -20.

16. Грицай І. Є. Математичне обґрунтування способу корекції профілів синусоїдальних зубчастих коліс в радіально-коловому методі формоутворення [Текст] / І. Є. Грицай, Н. М. Юрчишин // Підйомно-транспортна техніка. - 2013. - № 4 (40). - С.75-81.

17. Грицай И. Е. Зубчатые передачи и технологии их изготовления: новое в традиционном [Текст] / И.Е. Грицай, Е. Н. Благут // Оборудование и инструмент : международный информационно-технический журнал. - 2005. - № 2 (61). – С. 36-40.

18. Грицай І. Є. Зубчасті передачі синусоїдального зачеплення і новітня технологія їх виготовлення [Текст] / І. Є. Грицай // Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XII международной научно-технической конференции, 12-17 сентября 2005 г. – Севастополь. - С. 230-234.

19. Грицай І. Є. Синусоїдальні зубчасті колеса та новий ефективний метод їх виготовлення [Текст] / І. Є. Грицай, Е. М. Благут, В. З. Яворський // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы пятой ежегодной международной Промышленной конференции, 21-25 февраля 2005 г. – п. Славское, Карпаты. - С. 47-50.

20. Грицай І. Є. Синусоїдальні зубчасті колеса та новий ефективний метод їх виготовлення [Текст] / І. Є. Грицай, Е. М. Благут, В.З. Яворський // УИЦ «Наука. Техника. Технологія». - К., 2004. – С. 47-50.

21. Литвиняк Я. М. Технологічні особливості отримання зубчастих коліс із синусоїдальним профілем бічних поверхонь зубців [Текст] / Я. М. Литвиняк, І. Є. Грицай, І. І. Юрчишин // 7-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : тези доповідей, 18-20 травня 2005 р. - Львів. – С. 86-87.

22. Литвиняк Я. М. Технологічне забезпечення процесу формоутворення бокових поверхонь зубців синусоїдального профілю дисковим лезовим

інструментом [Текст] / Я. М. Литвиняк, І. Є. Грицай, І. І. Юрчишин // 8-й Міжнародний симпозиум українських інженерів-механіків у Львові : тези доповідей, 23-25 травня 2007 р. - Львів. – С. 102-103.

23. Грицай І.Є. Главные приводы и системы подачи современных станков с ЧПУ [Текст] / І. Є. Грицай // Международный информационно-технический журнал «Оборудование и инструмент для профессионалов». – 2007. - № 4 (91).

24. Грицай І. Є. Застосування дискових фрез із рухомою віссю обертання для покращення техніко-економічних показників виготовлення циліндричних зубчастих коліс [Текст] / І. Є. Грицай, Я. М. Литвиняк, А. М. Кук // Інструменти та інструментальне виробництво : матеріали першої науково-практичної конференції : збірник наукових статей, 24-25 жовтня 2007 р. - Львів, ЛьЦНТЕІ, 2007. – С. 31 – 32.

25. Литвиняк Я. М. Підвищення технологічної гнучкості операцій формоутворення зубців циліндричних зубчастих коліс в автоматизованому виробництві [Текст] / Я. М. Литвиняк, І. Є. Грицай, Є. М. Махоркін // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : укр. міжвідомчий наук.-техн. збірник. - Львів.: Вид-во НУ “Львівська політехніка”. - 2008. - №42. - С.157-163.

26. Грицай І. Є. Синусоїдальні зубчасті передачі як альтернатива традиційним передачам та новий метод їх виготовлення [Текст] / І. Є. Грицай, Я. М. Литвиняк // Вісник НТУ "ХПІ" : збірник наукових праць «Проблеми механічного приводу». – Харків, 2009. - № 19. – 168 с. – С. 43 – 53.

27.Грицай И.Е. Изготовление червячных колес глобоидальных передач [Текст] / И. Е. Грицай, Я. М. Литвиняк // Оборудование и инструмент для профессионалов. – сер. Металлообработка. – 2009. - №4. – С.18 - 20.

28. Литвиняк Я.М. Підвищення ефективності операцій виготовлення циліндричних евольвентних зубчастих коліс радіальним формоутворенням зубців [Текст] / Я. М. Литвиняк, І. Є. Грицай // Вісник НУ «Львівська політехніка» : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і

технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2009. - № 642. - С. 18 -24.

29. Грицай І. Є. Нарізання глобоїдальних черв'ячних коліс дисковим інструментом в умовах обкочування [Текст] / І. Є. Грицай, Я. М. Литвиняк // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы девятой ежегодной международной Промышленной конференции, 9-13 февраля 2009 г. – п. Славское, Карпаты. – К.: ИНТТ, 2009. - С. 97 - 99.

30. Литвиняк Я. М. Особливості нарізання дисковими фрезами підчас обкочування циліндричних зубчастих коліс [Текст] / Я. Литвиняк, І. Грицай, Є. Махоркін // 9-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : збірник наукових праць. - Львів: КІНПАТРІ ЛТД, 2009. – 332 с. – С. 198 - 199.

31. Литвиняк Я. М. Інструментальне забезпечення отримання евольвентного профілю зубців циліндричних коліс способом радіально-колового формоутворення [Текст] / Я. М. Литвиняк, І. Є. Грицай // Вісник НУ «Львівська політехніка» : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2010. - № 679. - С. 14 -22.

32. Грицай І. Є. Підвищення техніко-економічної ефективності процесів виробництва зубчастих коліс поєднанням традиційних та нових способів формоутворення [Текст] / І. Є. Грицай, Я. М. Литвиняк // Вісник НТУ "ХП" : збірник наукових праць «Проблеми механічного приводу». – Харків: вид-во НТУ «ХП», 2010. - № 26. – С. 30 – 35.

33. Грицай І. Є. Технологія нарізання евольвентних циліндричних коліс дисковим інструментом способом радіально-колового формоутворення [Текст] / І. Є. Грицай, Я. М. Литвиняк // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы десятой юбилейной международной ежегодной Промышленной конференции, 18-22 февраля 2010 г. – п. Славское, Карпаты. – К.: УИЦ «Наука. Техника.

Технология», 2010. - С. 297-300.

34. Грицай І. Є. Глобоїдальні черв'ячні передачі [Текст] / І. Є. Грицай, Я. М. Литвиняк // Ліфтова індустрія (рекламно-інформаційний журнал). - 2010. - № 01(07)(лютий-березень). - С. 32-33.

35. Грицай І. Є. Гібридні зачеплення як засіб підвищення ефективності процесів відновлення зубчастих коліс [Текст] / І. Є. Грицай, Е. М. Благут, В. І. Вільшанецький // Вісник НУ «Львівська політехніка»: збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2010. - № 679. - С. 5-9.

36. Вільшанецький В.І. Компьютерное исследование условий зацепления гибридных зубчатых передач [Текст] / В. І. Вільшанецький, І. Є. Грицай // Десятая международная научно-практическая конференция «Интеллект и наука»: сборник научных трудов, 28-29 апреля 2010 г. - Железногорск. - С.134 - 135.

37. Грицай І. Є. Повышение эффективности процессов восстановления и ремонта редукторов на основе новой технологии зубонарезания [Текст] / І. Є. Грицай, В. І. Вільшанецький // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня: материалы 13-й международной научно-практической конференции, 12-15 апреля 2011 г. - Санкт-Петербург, 2010. - С. 316-322.

38. Грицай І. Є. Дослідження сумарної похибки процесу нарізання синусоїдальних зубчастих коліс в умовах обкочування [Текст] / І. Є. Грицай // Вісник НУ «Львівська політехніка»: збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2011. - № 713. - С.154-160.

39. Грицай І. Є. Використання засад реінжинірингу в процесах ремонту редукторів на основі інтегрованої системи розрахунку та виготовлення

зубчастих коліс [Текст] / І. Є. Грицай, В. І. Вільшанецький // Вісник НУ «Львівська політехніка» : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2012. - № 746. - С. 192-195.

40. Грицай І. Є. Обкочувально-радіальний спосіб нарізання зубчастих коліс та його перспективи для виготовлення приводів для підйомно-транспортних машин [Текст] / І. Є. Грицай // Підйомно-транспортна техніка. - 2013. - № 3. - С. 35-39.

41. Kapelevich A.L. Direct Gear Design [Text] / A. L. Kapelevich. - CRC Press, 2013. - 324 p.

42. Kapelevich A.L. Geometry and design of involute spur gears with asymmetric teeth [Text] / A. L. Kapelevich // Mechanism and Machine Theory. – 2000. - № 35. - P 117–130.

43. Kapelevich A.L., Shekhtman Y.V. Area of existence of involute gears [Text] / A. L. Kapelevich, Y. V. Shekhtman // Gear Technology. - 2010 , January/February. - P 64–69.

44. Грицай І.Є. Підвищення техніко-економічної ефективності процесів виробництва зубчастих коліс поєднанням традиційних та нових способів формоутворення [Текст] / І. Є. Грицай, Я. М. Литвиняк // Вісник НТУ "ХПІ" : збірник наукових праць «Проблеми механічного приводу». – Харків : Вид-во НТУ "ХПІ". - 2010. - № 26. – С. 30 – 35.

45. Спосіб нарізування синусоїдальних зубчастих коліс [Текст] : пат. на корисну модель № 24957 / Грицай І.Є., Кук А.М., Посполітак В.А.; заявка № u2007 01105 від 02.02.2007; опубл. 25.07.2007, бюл. № 11.

46. Спосіб нарізання циліндричних синусоїдальних зубчастих коліс [Текст] : пат. на корисну модель № 24173 / Грицай І.Є., Кук А.М., Франт Ю.В.; заявка № u200700138 від 04.01.2007; опубл. 25.06.2007, бюл. № 9.

47. Спосіб нарізання циліндричних синусоїдальних зубчастих коліс [Текст] : пат. на корисну модель № 24078 / Грицай І.Є.; заявка № a200512641 від 27.12.2005; опубл. 25.06.2007, бюл. № 9.

48. Спосіб нарізання циліндричних синусоїдальних зубчастих коліс [Текст] : пат. корисну модель № 63902 / Грицай І.Є., Вільшанецький В.І., заявка № u20103266 від 21.03.2011 р., опубл. 25.10.2011, бюл. № 20.
49. Литвиняк Я. М. Технологічне забезпечення нарізання прямозубих зубчастих коліс дисковими інструментами при неперервному діленні зубообробки [Текст] / Я. М. Литвиняк // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій : збірник наукових статей I-ої міжнародної науково-технічної конференції, 22-24 жовтня 2008 р. - Львів, 2008. - С. 221-223.
50. Литвиняк Я. М. Розрахунок параметрів дискових інструментів для радіально-колового нарізання зубчастих вінців циліндричних зубчастих коліс [Текст] / Я. М. Литвиняк // Вісник НУ «Львівська політехніка» : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів: Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2011. - № 702. - С. 24-31.
51. Пастернак С. І. Дослідження кінематики формоутворення зубчастих коліс методом контурної обробки [Текст] / С. І. Пастернак, М. В. Іщенко, І. О. Рябека // Вісник НТУУ "КПІ" : збірка наукових праць «Машини і автоматизовані комплекси», 2010. - С. 71-76.
52. Сахаров Г. Н. Обкаточные инструменты [Текст] / Г. Н. Сахаров. – М.: Машиностроение, 1983. – 232 с.
53. Шишов В. А. Образование поверхностей резанием по методу обкатки [Текст] / В. А. Шишов. – М.: Машгиз, 1951. -152 с.
54. Коновалова И. В. Исследование загрузки и износа зубьев червячных фрез с криволинейным исходным контуром [Текст] / И. В. Коновалова, С. И. Самойлов // Прогрессивные процессы машиностроения : межвед. сб. науч. тр. ВолгПИ. – Волгоград, 1982. – С. 42 - 48.
55. Abud A. M. Dynamic analysis of the cutting forces of the cutting forces in gear hobbing. This thesis is submitted in fulfilment of the requirements for the degree of

- Doctor of Philosophy [Text] / A. M. Abud // School of Mechanical and Systems Engineering University of Newcastle upon Tyne, UK 2002. - 182 p.
56. Nicholas M. Patrikalakis. Shape Interrogation for Computer Aided Design and Manufacturing [Text] / Nicholas M. Patrikalakis, Takashi Maekawa // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. - 419 p.
57. Peter Herzhoff. Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung beim Walzfräsen mit HSS-Werkzeugen [Text] / Herzhoff Peter // Genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2007. - 112 p.
58. Illes Dudas. The theory and practice of worm gear [Text] / Dudas Illes // Penton Press, London, 2000. - 383 p.
59. Jan Klingelberg. Kegelräder Grundlagen, Anwendungen [Text] / Klingelberg Jan // Springer-Verlag Berlin – Heidelberg, 2008. – 407 p.
60. Lierath F. Trockenbearbeitung und Minimalmengen-schmierung beim Wälzfräsen größerer Moduln mit HSS-Werkzeugen, Abschlussbericht FVA-Forschungsvorhaben [Text] / Lierath F., Knoche H.-J., Herzhoff P.
61. An Analysis of Cutting Forces in Gear Hobbing [Text] / A. M. Abood, R. Bicker and A. Pennell // International Conference on Gears VDI-Berichte. Nr 1. 1665, 2002.
62. Bouzakis K.D. Gear Robbing Cutting Process and Tool Wear Prediction Models [Text] / K. D. Bouzakis, S. Kambogiannis, A. Antoniadis and N. Vidakis // Journal of Manufacturing Science and Engineering. Transactions of the ASME, Vol. 124, February 2002.
63. Санкин Ю. Н. Динамические характеристики вязкоупругих систем с распределенными параметрами [Текст] / Ю. Н. Санкин – Саратов: Изд-во СГУ, 1977. – 309 с.
64. Peter Gutmann. Zerspankraftberechtung beim walzfräsen [Text] / Gutmann Peter // Doktor ingenerius genehmichte Dissertation. - Rheinisch-Westfalischen Technischer Hochschule Aachenh, 1988. – 127 p.
65. Сидоренко А. К. Червячные фрезы. Опыт НМКЗ [Текст] / А. К. Сидоренко. – М.: Машиностроение, 1980. – 83 с.

66. Сидоренко А. К. Пути повышения производительности фрезерования зубьев крупномодульных цилиндрических зубчатых колес [Текст] / А. К. Сидоренко. - М.: ЦНИИТИМ, 1970. - 20 с.
67. Ничков А. Г. Мощность резания при зубофрезеровании с осевым и радиальным врезанием [Текст] / А. Г. Ничков // Станки и инструмент. – 1984, № 11. – С. 24 - 25.
68. Сахаров Г. Н. Металлорежущие инструменты [Текст] : учебник для вузов / Г. Н. Сахаров, О. Б. Арбузов, Ю.А. Боровой и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
69. Шунаев Б. К. Исследование зоны резания вершинными кромками при попутном осевом врезании червячной фрезы [Текст] / Б. К. Шунаев, С. С. Рябинин // Известия вузов. Изд. МВТУ им. Н.Баумана. - 1973, № 1. - С. 154-162.
70. Tapoglou Nikolaos. CAD-Based Calculation of Cutting Force Components in Gear Hobbing. Transactions of the ASME [Text] / Nikolaos Tapoglou. - 031009-8/Vol. JUNE 2012. - 134 p.
71. Грицай И. Е. Исследование закономерностей изменения сечений срезов при нарезании зубчатых колес червячными фрезами [Текст] / И. Е. Грицай // Український міжвідом. наук.-техніч. зб. «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів, 1990. Вип. 29. - С. 40-45.
72. Грицай І. Є. Моделювання параметрів зрізів, сил та моментів під час нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами [Текст] / І. Є. Грицай // Машинознавство. №7, 1998. - С.19-23.
73. Грицай И. Е. Влияние параметров срезов на динамические характеристики процесса резания червячными фрезами с разделенным исходным контуром [Текст] / И. Е. Грицай, Н. С. Когут // Вестник НТУУ "КПИ" : сборник научных трудов, сер. Машиностроение, 2000. - № 39. – С.163-177.
74. Грицай І. Є. Аналіз параметрів зрізів та розподілу навантаження під час роботи черв'ячної фрези з попутною та зустрічною подачею [Текст] / І. Є. Грицай // Вісник ДУ “Львівська політехніка” : збірник наукових праць

«Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів, 1999. - № 359. - С. 10-19.

75. Валиков Е. Н. Определение площади впадины, вырезаемой червячной фрезой за один оборот заготовки при обработке зубчатых колес с радиальной подачей [Текст] / Е. Н. Валиков, Л. А. Васин // Технология машиностроения. Исследования в области технологии машиностроения и режущего инструмента. Вып.23 – Тула: Изд-во ТПИ, 1971. – С.178 – 186.

76. Равська Н. С. Черв'ячна фреза з прогресивною схемою зрізання припуску [Текст] / Н. С. Равська, О. В. Мамлюк, О. А. Охріменко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. Краматорськ - Київ. – 2008. Вип. 23. - С. 12-22.

77. Равська Н. С. Визначення товщини зрізу при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами зубчастих коліс [Текст] / Н. С. Равська, О. А. Охріменко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. Краматорськ - Київ. – 2011. Вип. 28. – С. 3-13.

78. Литвиняк Я. М. Закономірності формування перетинів зрізів під час нарізання прямозубих зубчастих коліс дисковим інструментом методом обкочування [Текст] / Я. М. Литвиняк // Вісник НУ "Львівська політехніка" : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів, 2008. - № 613. - С. 31-38.

79. Пастернак С.І. Експериментальне дослідження контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом [Текст] / С. І. Пастернак, Ю. М. Данильченко, М. Г. Сторчак, А. В. Кривошея // "Вестник НТУ "ХПИ" : сборник научных трудов «Проблеми механічного приводу». – Харків, 2010. - № 26. - С. 94-101.

80. Производство зубчатых колес : справочник [Текст] / С. Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган [и др.]; под общ. ред. Б. А. Тайца. – М.: Машиностроение, 1990. – 464 с.

81. Мартыненко В. А. Исследование загрузки зубьев червячной фрезы графоаналитическим методом [Текст] / В. А. Мартыненко, В. В. Лоскутов, Т. Ф. Мchedlishvili // Повышение производительности обработки в машиностроении : тр. УПИ. – Свердловск, 1972. – С. 98 - 102.
82. Смирнов Н. Н. Многозаходные червячные фрезы с новыми схемами резания [Текст] / Н. Н. Смирнов // Прогрессивные процессы машиностроения. – Волгоград, 1982. – С. 8 - 15.
83. Овумян Г. Г. Повышение производительности и качества чистового зубонарезания [Текст] / Г. Г. Овумян, Е. В. Езерский, С. А. Хухрий. – М., 1979. – 65 с.
84. Гулида Э. Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических зубчатых колес [Текст] / Э. Н. Гулида. - Львов: Из - во Львов. ун-та, 1977. – 168 с.
85. Литвиняк Я. М. Моделювання впливу технологічних факторів на силові параметри процесу зубонарізання та точність циліндричних синусоїдальних зубчастих коліс [Текст] / Я. М. Литвиняк, І. Є. Грицай // 9-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : збірник наукових праць. - Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2009. – 332 с. – С. 196 - 198.
86. Розроблення ефективного методу виготовлення зубчастих коліс синусоїдального зачеплення [Текст] : звіт про НДР / НУ «Львівська політехніка»; кер. Грицай І. Є., 2008 р. - 38 с.
87. Кривошея А. В. Імітаційне моделювання процесу контурної обробки зубчастих ланок дисковим інструментом [Електронний ресурс] / А. В. Кривошея, В. В. Кривошея, Ю. М. Данильченко, С. І. Пастернак // Вісник НТУ "ХПІ": збірник наукових праць. Опубліковано в Інтернеті: <http://visnyk-nmmi.kpi.ua/images/stories/pdf/52/314.pdf>
88. Пастернак С. І. Експериментальне дослідження контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом [Текст] / С. І. Пастернак, Ю. М. Данильченко, М. Г. Сторчак, А. В. Кривошея // Вестник НТУ "ХПИ":

сборник научных трудов «Проблеми механічного приводу». - Харків, 2011. - № 26. - С. 94-101.

89. Балицька Н. О. Працездатність дискових пил, відрізних та прорізних фрез [Текст] / Н. О. Балицька // Вісник Житомирського державного технологічного університету : зб. наук. праць «Технічні науки». – 2011. - №4 (59). – С. 3-6.

90. Балицька Н. О. Питання визначення сил різання прорізних фрез із врахуванням допустимих відхилень їх конструктивних параметрів [Текст] / Н. О. Балицька // Вісник Житомирського державного технологічного університету : зб. наук. праць «Технічні науки». – 2012. - №3 (62). – С. 3-8.

91. Бабенко А. Є. Стійкість дискової фрези, навантаженої радіальною силою [Текст] / А. Є. Бабенко, Ю. А. Д'якова, Н. О. Балицька // Вісник НТУУ “КПІ” : збірник наукових праць, сер. Машинобудування, 2014. – 2(7). – С. 26-32.

92. Hrytsaj I. The theoretical and experimental research of the screw type hobs for two-way cutting of cylindrical cog-wheels of large modules [Text] / I. Hrytsaj // Scientific Research of Universities of Kosice. 3. 2001. - P. 27-31.

93. Грицай І. Аналіз силового поля черв'ячної фрези на основі параметрів зрізів [Текст] / І. Грицай, В. Свізінський, Я. Новіцький // 4-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : тези доповідей. – 19-21 травня 1999 р., Львів. - С. 107.

94. Силове поле при тонкому абразивному шліфуванні деталей тертя з нових композиційних сплавів для друкарської техніки [Текст] / А. П. Гавриш, П. О. Киричок [та ін.] // Прогресивные технологии и ситемы машиностроения : международный сборник науч. трудов. Вып. 1, 2 (45). - Донецк, 2013. – С. 85-90.

95. Грицай І. Є. Параметри поперечного перерізу зрізів в радіально-обкочувальному способі нарізання зубчастих коліс з осьюовою подачею [Текст] / І. Є. Грицай, С. І. Громнюк, А. М. Кук // Вісник НУ “Львівська політехніка” : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2014. - № 772. - С. 8-14.

96. Тайц Б. А. Точность и контроль зубчатых колес [Текст] / Б. А. Тайц. - М.: Машиностроение, 1972. - 368 с.
97. Зорев Н. Н. Расчет проекций силы резания [Текст] / Н. Н. Зорев. - М.: Машгиз, 1958. - 56 с.
98. Розенберг А. М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания [Текст] / А. М. Розенберг. – К.: Наукова думка, 1990. - 320 с.
99. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов [Текст] / Н. Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1956. – 386 с.
100. Ступницкий В. В. Исследование адиабатического сдвига стружки при механической обработке титановых и никелевых сплавов на основе анализа результатов имитационного реологического моделирования в системе DEFORM [Текст] / В. В. Ступницкий // Научный (производственно-практический) журнал «Веснік Гродзенскага Дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы», Гродно (Республика Беларусь), 2013. №3(158), серия 6. - С. 76-86.
101. Stupnytskyu Vadym. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment [Text] / Vadym Stupnytskyu // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 9, September, 2013. - P. 1181-1186.
102. Stupnytskyu Vadym . Thermodynamic pattern of the workpiece machining by the rheological imitation modelling in DEFORM-3D system [Text] / Vadym Stupnytskyu // Вісник НУ “Львівська політехніка” : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів, 2013. - № 772. - С. 102-114.
103. Stupnytskyu Vadym. Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the ethodsof Concurrent Engineering [Text] / Vadym Stupnytskyu // Europaische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift, ORT Publishing. - Stuttgart, Germany. № 3. - 2013 (Maart). Section 1. Volume 2. - P. 50-53.

104. Справочное пособие по сопротивлению материалов [Текст] / Под ред. М. И. Рудицина. – Минск: Госиздат БССР, 1958. – 510 с.
105. Hromniuk S. The study of the cutting force and its components in radial-circular cutting of the gears [Text] / S. Hromniuk, I. Hrytsaj // Вісник НУ “Львівська політехніка” : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів, 2014. - № 786. - С. 61-67.
106. Громнюк С. І. Пружні деформації в радіально-коловому способі зубонарізання та їх вплив на точність зубчастих коліс [Текст] / С. І. Громнюк, І. Є. Грицай // Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць III Всеукраїнської науково-технічної конференції, Львів-Карпати, 2015 р. – С. 38.
107. Громнюк С. І. Вплив динамічних чинників на якість зубчастих коліс в радіально-коловому способі зубонарізання [Текст] / С. І. Громнюк, І. Є. Грицай // 12 –й Міжнародний симпозиум інженерів-механіків у Львові : тези доповідей. – Львів, 28-29 травня 2015 р. – С. 82-83.
108. Hromniuk S. Cutter Force and Influence of Elastic Deformation of Technological System of Gear-Hobbing Machine on Precision of Radial-Circumferential Method of Gear Cutting / S. Hromniuk, I. Hrytsai // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science. - 2015. - Volume 1, Number 2. - pp. 67-74.
109. Справочник по сопротивлению материалов [Текст] / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К.: Наук. думка, 1988. – 736 с.
110. Аникин Ю. В. Синусоидальное зацепление [Текст] / Ю.В. Аникин. - Воронеж, 1974. – 64 с.
111. Грицай І. Є. Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-обертового методу в умовах обкочування [Текст] / І. Є. Грицай, С. І. Громнюк // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць Донбаської державної машинобудівної академії. Вип. 32. - 2013. - Краматорськ, 2013. - С. 226-229.

112. Пляскин И. И. Оптимизация технических решений в машиностроении [Текст] / И. И. Пляскин. - М.: Машиностроение, 1982. – 176 с.
113. Солонин И. С. Математическая статистика в технологии машиностроения [Текст] / И. С. Солонин. - М.: Машиностроение, 1972. – 360 с.
114. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях [Текст] / В. А. Вознесенский. - М.: Статистика, 1974. - 192 с.
115. Грицай І. Є. Технологічне забезпечення точності та безвідмовності процесу нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом з урахуванням дії динамічних чинників [Текст] / І.Є. Грицай, С.І. Громнюк // Український міжвідом. наук.-техніч. зб. «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів, 2015. Вип. 49. - С. 91-97.
116. Кудинов В. А. Динамика станков [Текст] / В. А. Кудинов. - М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
117. Ступницький В. В. Використання автоматизованого програмного комплексу DEFORM для дослідження температурних та деформаційних параметрів під час різання металів [Текст] / В. В. Ступницький, Б. Р. Магерус // Український міжвідом. наук.-техніч. зб. «Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів, 2012. Вип. 46. - С.145-152.
118. Ступницький В. В. Система автоматизованого формоутворення різанням на базі математичного апарату реологічної структурної моделі [Текст] / В. В. Ступницький, І. Є. Грицай, А. М. Кук // 11-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : тези доповідей. - 15-17 травня 2013 р., Львів. - С. 172-173.
119. Грицай І. Є. Метод оцінки динамічної характеристики металорізального верстату [Текст] / І. Є. Грицай // Вісник НУ “Львівська політехніка” : збірник наукових праць «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів, 2002. - № 467. - С. 114-118.

120. Громнюк С. І. Концепція зубофрезерного верстату на основі радіально-колового способу зубонарізання [Текст] / С. І. Громнюк, І. Є. Грицай // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХП», 2014. – С.142-152.
121. Громнюк С. І. Розширення технологічних можливостей універсальних зубофрезерних універсальних верстатів введенням керованого приводу головного руху [Текст] / С. І. Громнюк // "Технологічний аудит та резерви виробництва", №5/3(19). - Харків, 2014. – С. 23-27.
122. Громнюк С. І. Зміна кінематики зубофрезерного верстата для нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом [Текст] / С. І. Громнюк, І. Є. Грицай // Вісник НТУ "ХП" : збірник наукових праць «Проблеми механічного приводу». – Харків, НТУ «ХП», 2015. - № 34 (1143). – С. 30-34.
123. Спосіб нарізання зубчастих коліс [Текст] : пат. України № 97520: МПК (2015/01) B23F 5/00 / Громнюк С. І., Грицай І. Є.; заявник та патентовласник НУ «ЛП». - № u201407040; заявл. 23.06.2014; опубл. 25.03.2015, бюл. № 6.
124. Грицай І.Є., Благут Е.М., Яворський В.З. Синусоїдальні зубчасті колеса та новий ефективний метод їх виготовлення // УИЦ «Наука. Техника. Технологія», — К., 2004. – С. 47-50.
125. Грицай І.Є., Ступницький В.В. Дослідження синусоїдальних зубчастих передач. //Підйомно-транспортна техніка – 2007. - №4(24). – С.55-64.

Додаток А

Структура сумарної похибки і точність зубчастих коліс з урахуванням множини основних чинників радіально - колового процесу зубонарізання

А.1. Основні положення, на яких розроблена математична модель точності зубообробки в РК-способі.

1. Модель базується на засадах детермінування, що передбачає визначення її складових як невинуватих величин та можливості встановлення функціональних залежностей між початковими чинниками і елементарними похибкам зубооброблення.

2. В процесі зубонарізання в технологічній системі зубофрезерного верстата діють початкові чинники, які характеризують неточності самої системи ВПД, вплив робочих режимів, параметрів верстата, різального інструменту і спорядження на параметри точності та якості обробки.

3. Первинні технологічні і конструктивні чинники викликають часткові (елементарні) похибки нарізаного зубчастого колеса; сумарна похибка зубообробки визначається за правилом векторного сумування, як середнє квадратичне суми елементарних похибок.

4. Усі початкові чинники та їх вплив на відхилення в процесі зубообробки приведені до профілю колеса, оскільки лінія синусоїдального зачеплення не є прямою.

5. Відповідно до положень теорії точності нарізання зубчастих коліс усі початкові чинники, які викликають похибку оброблення можна поділити за такими ознаками:

- радіальні, які викликають відхилення в радіальному для колеса напрямку;
- тангенціальні, що діють дотично до ділильного кола зубчастого колеса;
- кінематичні, які викликають відхилення у взаємних переміщеннях інструменту і заготовки (рис.)

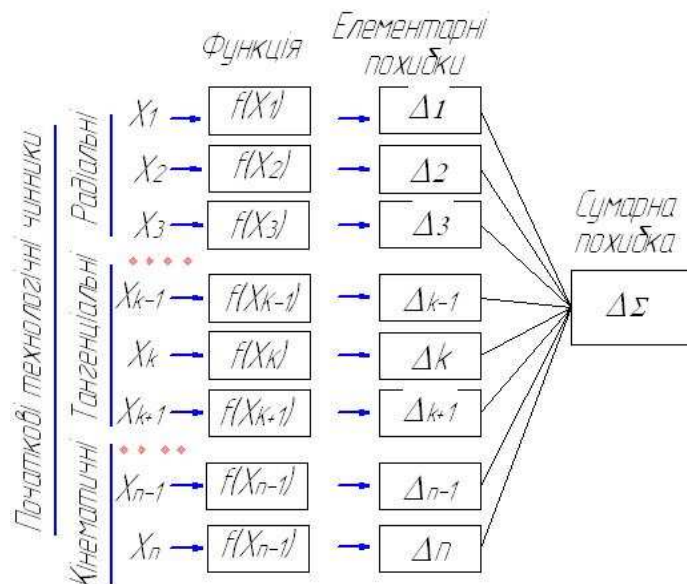


Рис.А.1. Схема виникнення та розрахунку сумарної похибки обробки на основі детермінованої моделі

6. Одним з показників якості оброблення є шорсткість поверхонь зубців, тому разом з моделюванням точності зубонарізання необхідно визначити вплив початкових технологічних чинників на параметри мікро- та макрогеометрії робочих поверхонь зубчастого колеса.

7. В структурі сумарної похибки присутні домінуючі складові, які характеризують вплив на точність та якість поверхонь зубців певних технологічних та конструкторських факторів.

8. З допомогою математичної моделі можна вирішити зворотну задачу моделювання точності - встановити такі значення параметрів радіально-колового нарізання, при яких забезпечується задана точність зубчастих коліс, шорсткість зубців за найменших витрат на технологічну операцію. Іншими словами вирішувана задача дає змогу керувати процесом зубонарізання як на етапі його проектування і технологічної підготовки виробництва, так і в режимі реального часу на зубофрезерному верстаті.

Основні початкові технологічні чинники, які викликають відхилення профілю нарізованого колеса.

Радіальні похибки

1. Сумарне радіальне биття на осі фрези.

2. Радіальне биття зубчастого колеса.

2. Пружні деформації системи «інструмент-заготовка» в радіальному напрямку .

Тангенційні похибки

3. Похибка установки фрези – відхилення її положення відносно міжосьової площини в осьовому напрямку.

4. Торцеве биття фрези, викликане відхиленням площини фрези від перпендикуляру до її осі (перекошування).

5. Похибка, викликана відхиленням кута зачеплення

6. Пружні деформації фрези в тангенційному (для зубчастого колеса, осьовому для фрези) напрямку.

7. Крутильні деформації на осі колеса під дією дотичної (тангенційної) складової сили різання.

Кінематичні похибки

8. Нерівномірність швидкості різання та викликана цим втрата узгодженого руху інструменту і заготовки, що здійснюється з частотою обертання фрези.

9. Нерівномірність обертання стола верстата, що спричиняє відхилення нарізаних поверхонь з частотою обертання заготовки зі столом верстата.

Мікронерівності поверхонь зубців

1. Складова висоти мікронерівностей поверхні внаслідок осьової подачі.

2. Складова мікронерівностей поверхні внаслідок руху обкочування.

А.2. Визначення елементарних похибок зубонарізання

А.2.1. Радіальні похибки зубообробки.

Похибка внаслідок радіального биття фрези.

Радіальне биття дискової фрези як сумарне зміщення її зовнішнього діаметра в радіальному напрямку виникає внаслідок биття інструментального шпинделя та його підшипників, зазору між валом та базовим отвором фрези,

власним зміщенням зовнішнього діаметру фрези відносно осі її базового отвору як похибки виготовлення інструмента (рис.А.1).

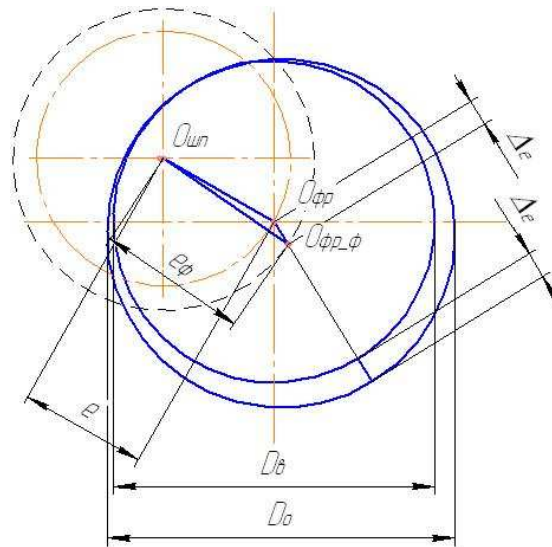


Рис.А.1. Похибка від радіального биття фрези

Внаслідок радіального зміщення Δe осі фрези отримує приращення сумарного ексцентриситету. Оскільки кут між заданим і додатковим ексцентриситетами наперед не відомий, e випадковою величиною в межах $0-360^\circ$ то сумарний ексцентриситет визначиться як їх геометрична сума, тобто:

$$e_\phi = \sqrt{e^2 + \Delta e^2}. \quad (\text{A.1})$$

Оскільки ексцентриситет фрези в РК-способі зв'язаний з рівноцінним (еквівалентним) модулем евольвентного колеса залежністю:

$$e = \frac{m}{2 \cdot \text{tg} \alpha_\omega}, \quad (\text{A.2})$$

то очевидно, що похибка ексцентриситету викличе похибку модуля. Як відомо, за теорією зубчастого зачеплення модуль рівний:

$$m = \frac{p}{\pi}, \quad (\text{A.3})$$

де p – основний крок зачеплення.

Виходячи з цієї залежності, відхилення величини модуля від номінального рівнозначне похибці основного кроку. Із залежностей (А.1) – (А.3) ця похибка буде рівна:

$$\Delta p = \pi \cdot \Delta m = 2\pi \cdot \left(\sqrt{e^2 + \Delta e_\phi^2} - e \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_\omega \quad (\text{А.4.})$$

Похибка (А.4) залежно від модуля і похибки ексцентриситету для $\Delta e = 0,1 \text{ мм}$ та $\alpha_\omega = 40^\circ$ відображена на на рис. А.2. Як видно із цих графіків, вплив похибки ексцентриситету зменшується із збільшенням модуля та, відповідно, основного кроку.

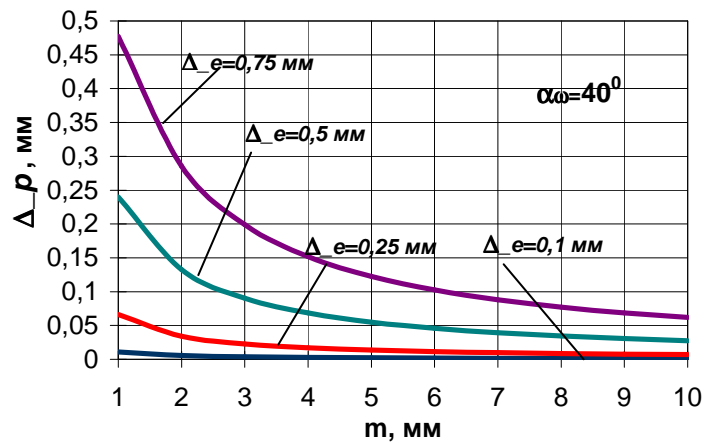


Рис.4.2. Похибка основного кроку колеса залежно від модуля і похибки ексцентриситету

На рис.А.3 наведено залежність похибки основного кроку колеса від кута зачеплення при зміні його значень в межах $15^\circ - 40^\circ$.

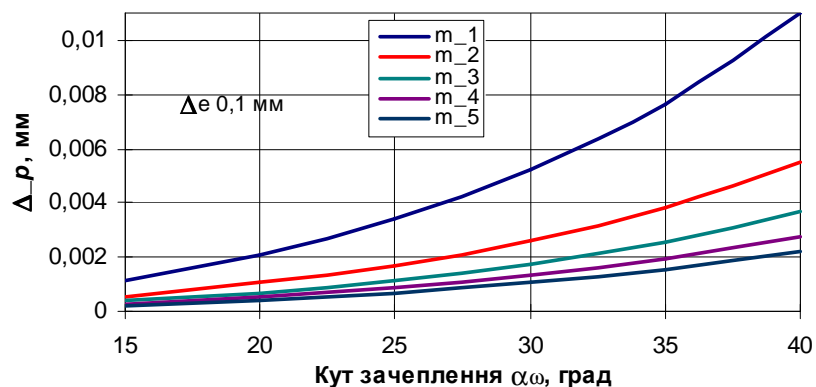


Рис.А.3. Залежність похибки основного кроку колеса від модуля та від кута зачеплення

Радіальне биття зубчастого колеса

Дана похибка, як і попередня, є циклічною, проте її період рівний часу оберту стола верстата з заготовкою. Її величина Δr , яка переноситься на зубець в процесі обробки залежить від кута між віссю симетрії впадини цього зубця і вектором радіального биття стола. Максимальне значення вказаної похибки на профілі має місце при кутах повороту стола відносно осі міжосьового перпендикуляру 0 та π , при цьому на профілі це відхилення припадає на вихідну ділянку при куті повороту фрези 2π .

Синусоїда в плоскій прямокутній системі відображається координатами

$$\begin{cases} x = (R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \\ y = -(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases}, \quad (\text{A.5})$$

де e – амплітуда синусоїди (ексцентриситет фрези); $R_{\omega_{-k}}$ – ділительний радіус зубчастого колеса; φ – кут повороту фрези; Z_k – кількість зубців колеса. Ширину вершинного леза у виразах (A.5) не будемо враховувати, бо цей параметр не впливає на похибку профіля зубця.

Радіальне биття на осі колеса Δr призводить до зміни номінальних координат синусоїди (A.5):

$$\begin{cases} x_1 = \left(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi + \frac{\Delta r}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \\ y_1 = - \left(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi + \frac{\Delta r}{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \right) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases} \quad (\text{A.6})$$

та похибки профілю Δf_r .

Профілі зубців з відхиленнями в радіальному (*радіал*) і тангенційному (*тангенц*) напрямках, які відповідають величині радіального биття колеса $0,5$ мм, та номінального профілю (*номін*) показано на рис.А.4.

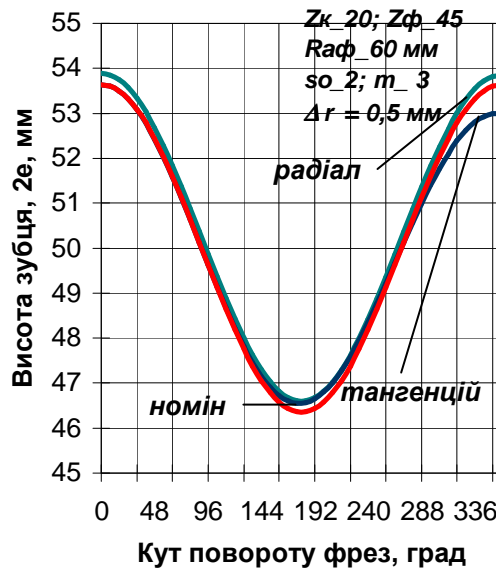


Рис.А.4. Профілі з урахуванням відхилення колеса в радіальному і тангенційному напрямках внаслідок радіального биття стола, та номінальний профіль зубця

Величина Δf_r слабо залежить від кількості зубців колеса, яке нарізають і практично не залежить від інших чинників. Її графік на ділянці $0-180^0$ повороту фрези наведено на рис.А.5.

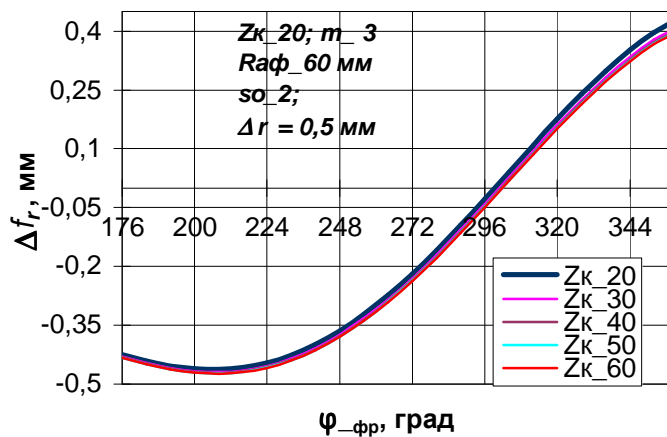


Рис.А.5. Графік похибок профілю зубця внаслідок радіального биття на осі стола верстата для $z_k = 20 \dots 60$

Пружні деформації технологічної системи в радіальному напрямку

Величина пружного деформування системи ВПД та відтиснення на лінії контакту фрези з зубчастим колесом визначається радіальною жорсткістю J_y : пружної системи верстата :

$$\Delta y = \frac{P_y}{J_y}, \text{ мм};$$

$$P_y = P_o \cdot \sin \phi,$$

де P_y – радіальна складова сили різання; ϕ – кут повороту фрези, що відповідає максимальній товщині зрізу (Розділ 3).

На рис.А.6 наведено графіки пружного деформування в радіальному напрямку по куту повороту фрези від дії максимальної сили P_y при радіальній жорсткості 30 кН/мм. На рис.А.7 наведено величину максимального радіального пружного деформування на одному оберті фрези для тих же початкових даних і модулів 1-5 мм при жорсткості верстата в радіальному напрямку 10, 20 і 30 кН/мм.

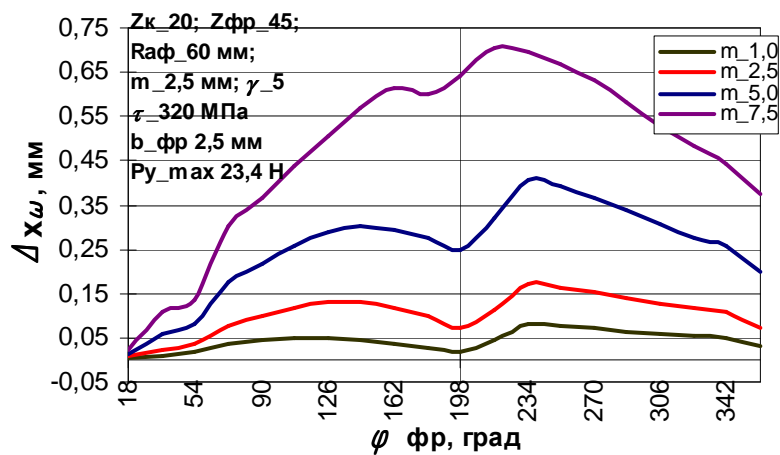


Рис.А.6. Радіальне пружне деформування фрези в функції від кута повертання

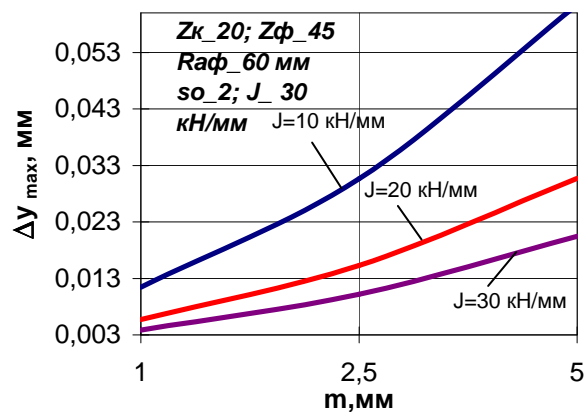


Рис.А.7. Максимальне радіальне пружне деформування на одному оберті фрези від дії радіальної складової сили різання

Похибку профілю $\rho_{\Delta y}$, зумовлену радіальними пружним деформаціями визначимо з умови зміни координати «у» на величину Δy :

$$\begin{cases} x = (R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \\ y = -(R_{\omega_{-k}} + \Delta y + e \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases}, \quad (\text{A.7})$$

На рис.А.8 наведено профілі зубців: номінального та з урахуванням пружної деформації системи в радіальному напрямку.

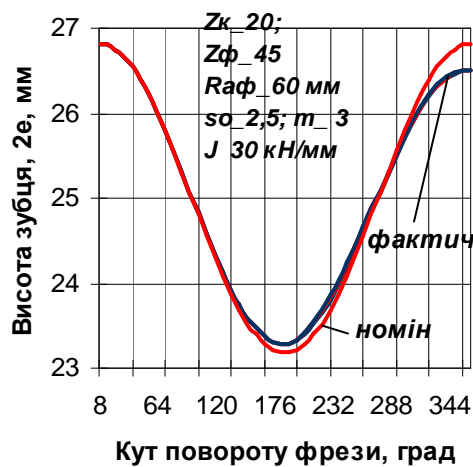


Рис.А.8. Номінальний профіль зубця та профіль з урахуванням пружної деформації системи в радіальному напрямку

Максимальні пружні деформації будуть зумовлені впливом максимальної сили $P_{y \max}$, величину якої можна знайти із урахуванням виразу для площі перерізу зрізів (Розділ 2):

$$\Delta y_{\max} = \frac{4,666 \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{0,49} \cdot s_o^{0,954} \cdot Z_{\phi}^{-0,157} \cdot D_{\phi}^{-0,415}}{J} \cdot \sin \phi, \quad (\text{A.8})$$

де кут ϕ , що відповідає максимальній товщині зрізу (роз.2) буде рівний:

$$\phi_{\max} = \arctg \frac{\Delta x_{\max}}{\rho_{\min}} = \arctg \left(\frac{\sqrt{2 \cdot R_{af} \cdot e - e^2}}{R_{af} - e} \right) \quad (\text{A.9})$$

А.2.1. Тангенційні похибки зубообробки. Ця група похибок є виникає в дотичному напрямку для колеса та в осьовому напрямку для системи координат фрези.

Похибка установки фрези в осьовому напрямку

Дана похибка визначається зміщенням положення дискової фрези на осі інструментального шпинделя, тобто, зміщенням площини фрези стосовно площини міжосьового перпендикуляру.

На рис.А.9 наведено контури двох синусоїдальних зубців : 1 – номінальний профіль; 2 – профіль, на якому відображається осьова похибка установки інструменту. Ця початкова похибка призводить до асиметричності форми зубців і впадин по правій і лівій системах профілів. Після нарізання зубчатого колеса одні з профілів стають більш пологими, а протилежні – набувають храповидної форми.

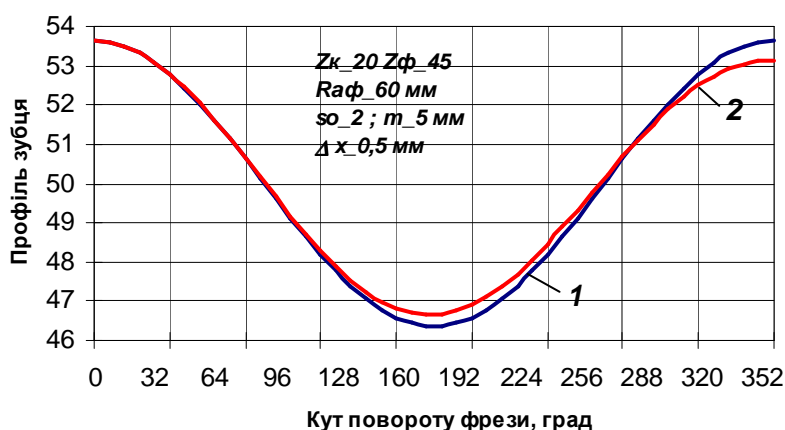


Рис.А.9. Контури зубця номінальної форми та з похибкою установки фрези в осьовому напрямку

Функція цієї похибки по куту повороту фрези визначається різницею номінального радіус-вектора синусоїди та його значення з урахуванням осьового зміщення фрези:

$$\Delta x = \rho_{ном} - \rho_{\Delta x}. \quad (A.10)$$

Величину $\rho_{\Delta x}$ розрахуємо з рівняння :

$$\rho_{\Delta x} = \sqrt{x_1^2 + y^2},$$

де її координата по X зміщена на величину Δx :

$$\begin{cases} x_1 = (R_{\omega_{-к}} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} - \delta \cdot \sin \varphi + \Delta x \cdot \sin \frac{\varphi}{Z} \\ y = -(R_{\omega_{-к}} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} - \delta \cdot \cos \varphi \end{cases}$$

Максимальне значення Δx на колесі має місце для $\varphi = 2 \pi$, при якому координати найбільшого відхилення рівні:

$$\begin{cases} x_1 = (R_{\omega_{-к}} + e \cdot \cos(2 \cdot \pi)) \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi}{Z_k} - \delta \cdot \sin(2 \cdot \pi) + \Delta x \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{Z} \\ y = -(R_{\omega_{-к}} + e \cdot \cos(2 \cdot \pi)) \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{Z_k} - \delta \cdot \cos(2 \cdot \pi) \end{cases}$$

тобто:

$$\begin{cases} x_1 = (R_{\omega_{-к}} + e) \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi}{Z_k} + \Delta x \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{Z} \\ y = -(R_{\omega_{-к}} + e) \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{Z_k} - \delta \end{cases}$$

На рис.А.10 і рис.А.11 наведено залежність максимальної тангенційної похибки зубчастих профілів від кількості зубців колеса та від кількості зубців дискової фрези при осьовому зміщенні фрези $\Delta x = 0,5$ мм.

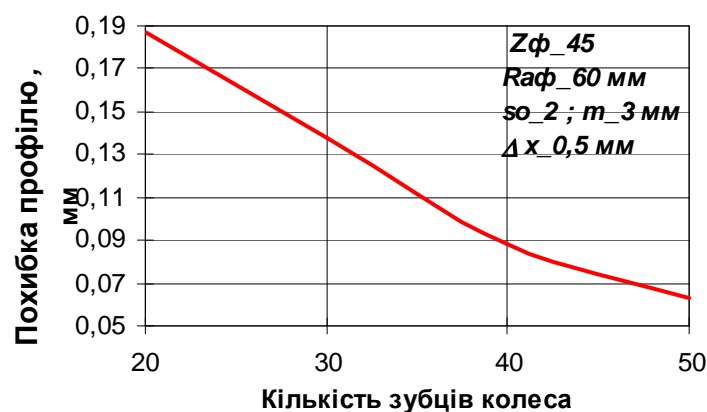


Рис.А.10. Залежність максимальної тангенційної похибки від кількості зубців колеса

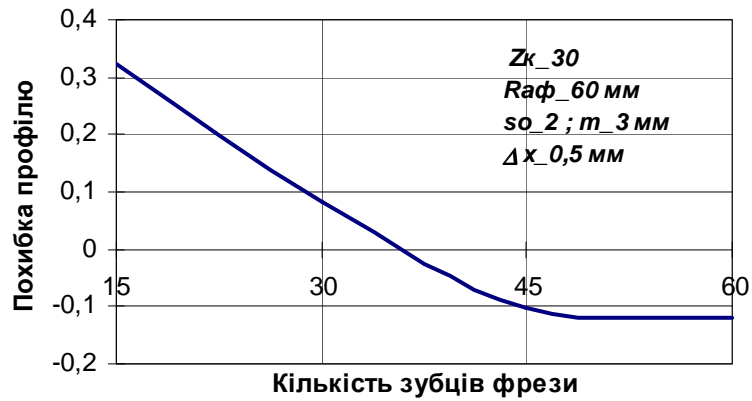


Рис.А.11. Залежність максимальної тангенційної похибки від кількості зубців дискової фрези

Торцеве биття фрези внаслідок кутового зміщення її площини (перекошування)

Дана похибка викликана кутовим відхиленням площини, в якій лежить фреза, відносно міжосьової площини, що проходить через вісь симетрії центрального зубця. Її перенесення на нарізуване колесо відбувається циклічно з частотою, кратною кількістю зубців колеса.

Якщо кут між положенням площини фрези і площини міжосьового перпендикуляру становить λ , то при зовнішньому діаметрі фрези $D_{a_фр}$ максимальне осьове відхилення буде рівне:

$$\Delta x_{\lambda} = \frac{D_{a_фр}}{2 \cdot \operatorname{tg} \lambda},$$

а поточні координати визначаються так (рис.):

$$\begin{cases} x_1 = \left(R_{\omega_к} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_{к}} + \frac{D_{a_фр}}{2 \cdot \operatorname{tg} \lambda} \cdot \sin \frac{\varphi}{Z} \\ y = - \left(R_{\omega_к} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_{к}} \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

На рис.А.12 наведено вид номінального профілю та фактичного з урахуванням похибки кутового відхилення площини осі 5° при діаметрі фрези 120 мм і модулі колеса 3 мм. На рис.А.13 показано графік зміни похибки $\Delta_{x\lambda}$

профілю по куту повороту колеса для діаметрів фрези 60 мм і 120 мм. Як видно з цього графіка, максимальна похибка кутowego положення практично не залежить від зовнішнього діаметра фрези.

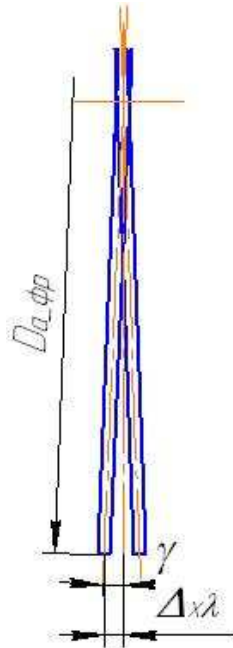


Рис.А.12. Початкове відхилення внаслідок перекошування осі фрези

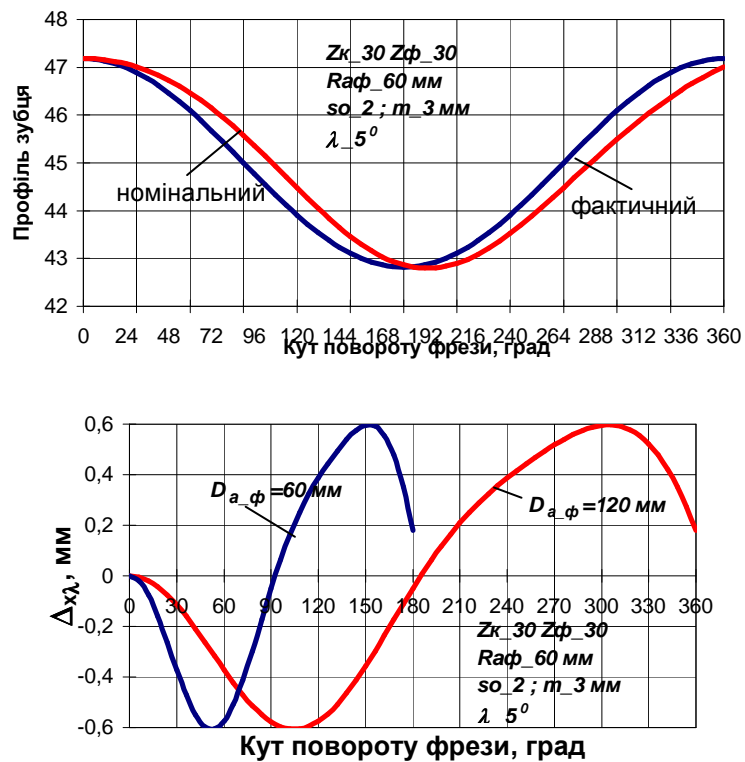


Рис.А.13. Профілі зубців номінального та з урахуванням похибки осьової установки фрези та похибка в функції від кута повороту фрези

Похибка, викликана відхиленням кута зачеплення

Вплив похибки $\Delta\alpha_\omega$ кута зачеплення на точність зубообробки можна встановити на основі залежності (А.3), з якої випливає, що:

$$\Delta p_{\alpha\omega} = \pi \cdot \Delta m = 2\pi \cdot e \cdot [tg\alpha_\omega - tg(\alpha_\omega + \Delta\alpha_\omega)]. \quad (A.12)$$

Графічно похибка основного кроку при значенні кута зачеплення 20° відображена на рис.А.14.

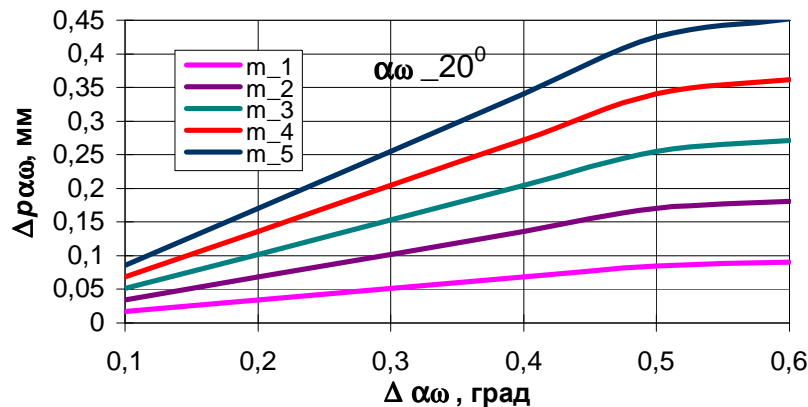


Рис.А.14. Максимальна похибка основного кроку в залежності від модуля

Пружні деформації фрези в осьовому напрямку.

В результаті дії на дискову фрезу бокової сили в напрямку осі фрези, яка виникає внаслідок зрізання частини припуску боковими вхідними лезами (P_x) та відповідає тангенційній, дотичній до колеса складовій силі P_z фреза зазнає дії пружної деформації Δ_ω , інтенсивність якої періодично змінюється в часі протягом одного оберту фрези.

Згідно з положеннями опору матеріалів будемо розглядати дискову фрезу як тверде тіло, защемлене жорстко в ділянці її установки на валу.

Для визначення величини пружного деформування фрези Δ_ω будемо виходити з того, що, на відміну від деформування защемленої балки, переріз якої залишається незмінним по всій довжині, згин дискової фрези є функцією не тільки віддалі від осі, але також є функцією змінних поперечного перерізу і його моменту інерції (рис.А.15).

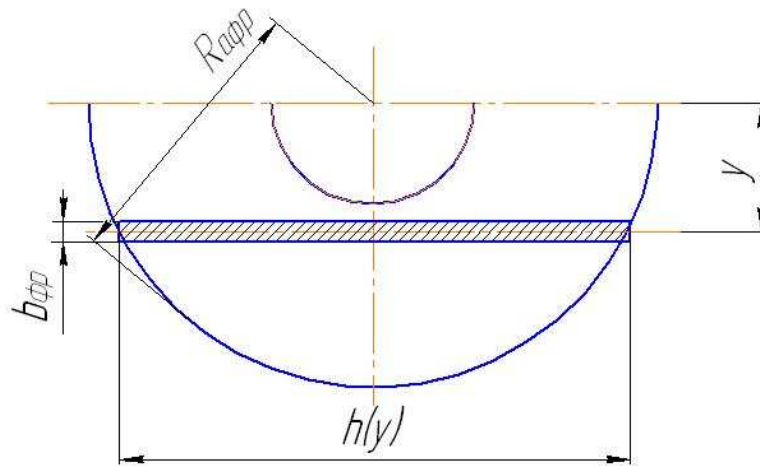


Рис.А.15. Поперечний переріз фрези як функція віддалі від осі

Зміна довжини $h(y)$ перерізу відповідає довжині хорди при зміні віддалі від центра круга, тобто:

$$h(y) = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot y \cdot R_{\text{фрр}} - y^2} \quad (\text{A.13})$$

З урахуванням виразу (А.13) момент інерції січення дискової фрези відносно нейтральної осі перерізу на віддалі y від центра буде мати вид:

$$J_y = \frac{h(y) \cdot b_{\text{фрр}}^3}{12} = \frac{b_{\text{фрр}}^3 \cdot \sqrt{2 \cdot y \cdot R_{\text{фрр}} - y^2}}{6}, \quad (\text{A.14})$$

а пружна деформація фрези:

$$\Delta x_{\omega} = \frac{P_z \cdot y^3}{3 \cdot E \cdot J_y} = \frac{2 \cdot P_z \cdot y^3}{E \cdot b_{\text{фрр}}^3 \cdot \sqrt{2 \cdot y \cdot R_{\text{фрр}} - y^2}}, \quad (\text{A.15})$$

де $b_{\text{фрр}}$ – товщина фрези; E – модуль пружності інструментального матеріалу. Для гартованих сталей $E = (3,2 - 3,6) \cdot 10^5$ МПа; прийнявши для розрахунків $E = 3,3 \cdot 10^5$ МПа, отримаємо такий вираз для пружного деформування дискової фрези по координаті $y = 0 \dots R_{\text{фрр}}$:

$$\Delta x_{\omega} = \frac{6,06 \cdot 10^{-6} \cdot P_z \cdot y^3}{b_{\text{фрр}}^3 \cdot \sqrt{2 \cdot y \cdot R_{\text{фрр}} - y^2}}, \text{ мм.} \quad (\text{A.16})$$

На рис.А.16 наведено графіки деформування дискової фрези на радіусі виступів зубців (60 мм) максимальною за оберт осьовою силою від подачі; ширина фрези 2, 3 і 4 мм. Максимальна сила при осьовій подачі: 1 мм/об. – 263,6 Н; 2 мм/об. – 269,26 Н; мм/об. – 2276,5 Н.

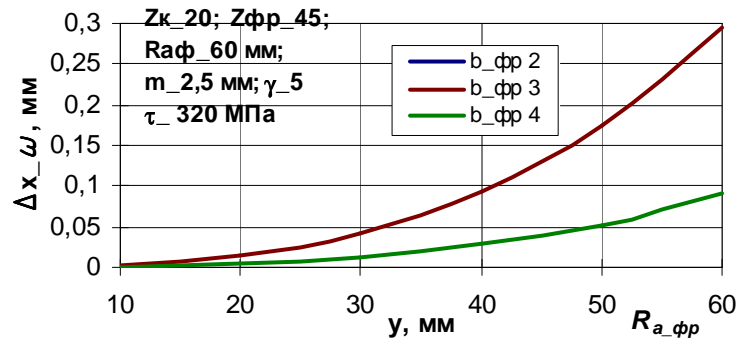


Рис.А.16. Деформування дискової фрези на радіусі виступів зубців
максимальною осьовою силою

Використаємо залежність для розрахунку сили різання P_o (Розділ 3) та вираз для середньої площі перерізу зрізу вхідними лезами (Розділ 2):

$$P_o = P_z = \tau \cdot \xi \cdot S_{\text{ex_cp}};$$

$$S_{\text{ex_cp}} = 0,078 \cdot m^{2,02} \cdot Z_{\phi}^{-0,955},$$

з чого :

$$P_z = 0,078 \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{2,02} \cdot Z_{\phi}^{-0,955}.$$

Деформація фрези цією силою на зовнішньому діаметрі фрези визначиться такою залежністю:

$$\Delta x_{xJ} = 0,47 \cdot 10^{-6} \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{2,02} \cdot R_{\phi p}^2 \cdot Z_{\phi p}^{-0,955} \cdot b_{\phi p}^{-3}, \text{ мм.} \quad (\text{A.17})$$

Графік деформації фрези в осьовому напрямку від дії сили (A.17) наведено на рис.А.17 ($\tau = 600$ МПа; $\xi = 2,0$; $b_{\phi p} = 2$ мм).

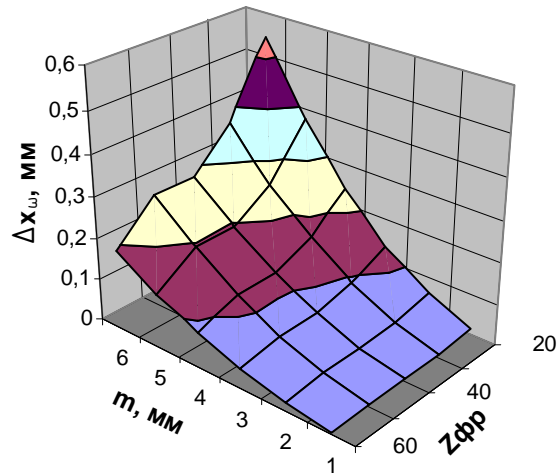


Рис. А.17. Деформації фрези в осьовому напрямку залежно від модуля і кількості зубців фрези

На рис.А.18 наведено графіки деформування дискової фрези від дії сумарної сили різання на бокових лезах по куту повороту фрези з урахуванням зміни миттєвого радіуса фрези внаслідок ексцентриситету; ширина дискової фрези 2,5 мм. Як видно, при модулі 2,5 мм та подачі 3 мм/об. максимальна деформація фрези в осьовому напрямку припадає на середню частину ділянки зменшення ексцентриситету на куті повороту фрези 216° і становить 0,673 мм.

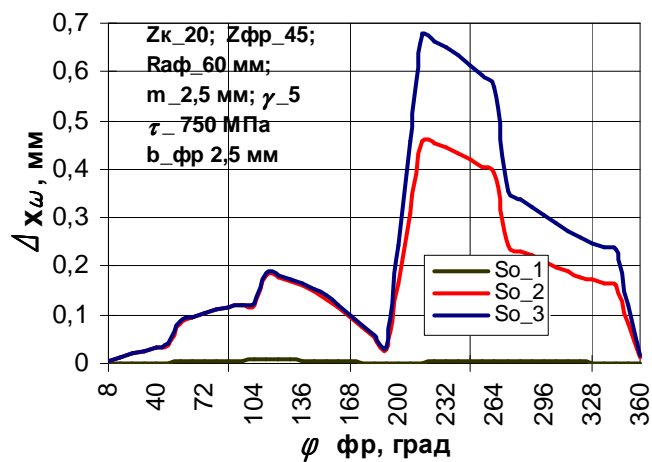


Рис.А.18. Деформування дискової фрези від дії сумарної сили різання на бокових лезах з урахуванням зміни миттєвого радіуса фрези внаслідок ексцентриситету

Ця похибка переноситься на бокову поверхню зубців, які нарізають та істотно впливає на точність зубонарізання, призводячи до похибки профілю внаслідок зміни координати « x » синусоїди відповідно до залежності:

$$\begin{cases} x = (R_{\omega_{\kappa}} + \Delta x_{\omega} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_{\kappa}} \\ y = -(R_{\omega_{\kappa}} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_{\kappa}} \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

Фактичний і номінальний профілі зубців, який утворюється в результаті деформації дискової фрези наведено на рис.А.19.

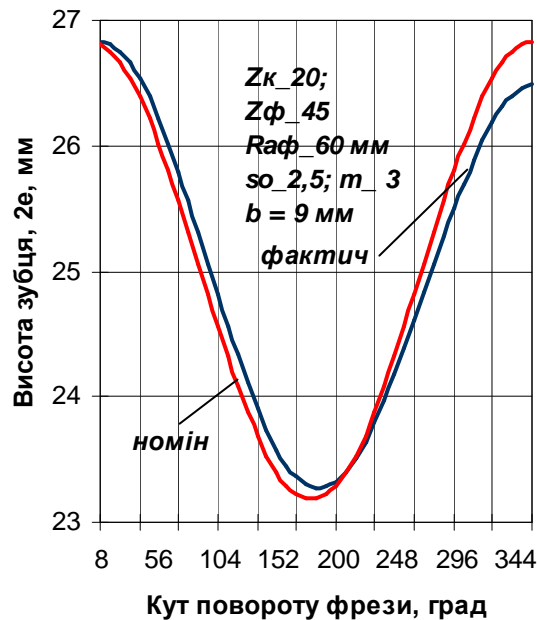


Рис.А.19. Фактичний і номінальний профілі зубців при товщині фрези 9 мм

Крутильні деформації на вісі стола верстата

При нарізанні косозубчастого колеса з кутом нахилу зубців β в дотичному напрямку на колесо додатково до сили P_z (Розділ 3) діє проекція сили P_o на тангенційну вісь - сила $P_{z_{\kappa}}$ (рис.А.20). Якщо дія сили P_z на колесо зі столом верстата є неістотною внаслідок малого значення площі зрізів на вхідних лезах, то сила $P_{z_{\kappa}}$ може спричиняти значні відхилення в законі обертання стола верстата з заготовкою і тангенційні похибки зубооробки.

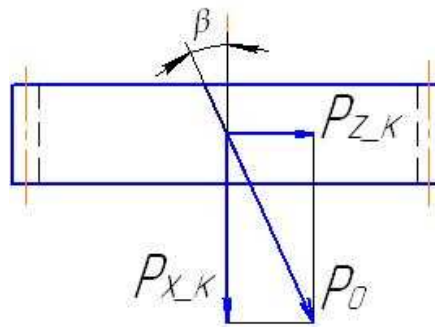


Рис.А.20. Сила, яка виникає в дотичному напрямку при нарізанні косо зубчастого колеса

Якщо крутильна жорсткість верстата стола разом з встановленим на ньому пристроєм і заготовкою становить G , Нм/рад, то величина крутильного деформування (скручування) стола, яка визначає похибку обкочування, буде дорівнювати:

$$\Delta\varphi = \frac{M}{G} = 10^{-3} \cdot \frac{P_o \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot m \cdot Z_k}{2 \cdot G}, \text{ рад}, \quad (\text{A.19})$$

де: $m \cdot Z_k = D_{\omega_k}$ - дільний діаметр колеса, мм; ϕ - кутове положення передньої поверхні i -го зубця фрези при зрізанні зубцем максимального припуску; 10^{-3} - коефіцієнт узгодження розмірності модуля (мм) і жорсткості (Н м). Крутильна жорсткість зубофрезерних верстатів нормальної точності залежно від максимального діаметра нарізаного колеса становить (200 - 500) Нм / рад.

Крутильні пружні деформації діють періодично з частотою, рівною зубцевій, а їх зміна в межах однієї впадини між зубцями колеса здійснюється за законом, близьким до зміни сили P_o . На рис.А.21 наведено профілі зубців, утворених без даної похибки та з врахуванням її величини. Для осьової подачі 1 мм/об., крутильної жорсткості стола верстата $G = 300$ НМ / рад та кута нахилу зубців косо зубчастого колеса 25° максимальне відхилення профілів дорівнює 0,3261 мм.

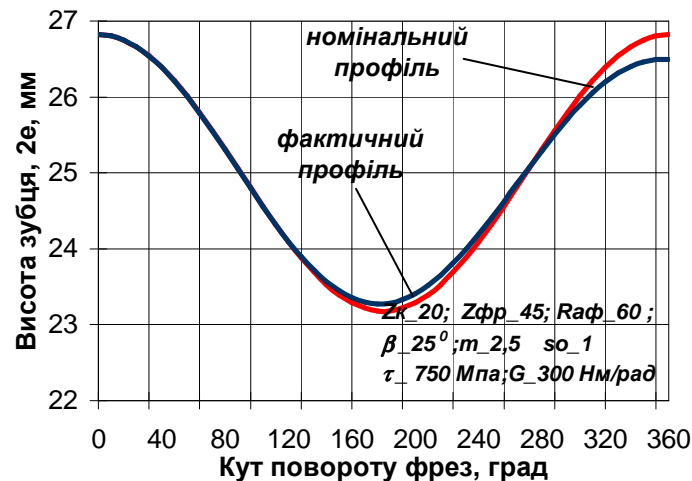


Рис.А.21. Зміна профілю зубця внаслідок пружних крутильних деформацій на осі верстата

На рис.А.22 наведено похибку синусоїдального профіля під дією змінного обертового моменту на осі колеса для тих же даних при осьовій подачі 1,2 і 3 м/об.

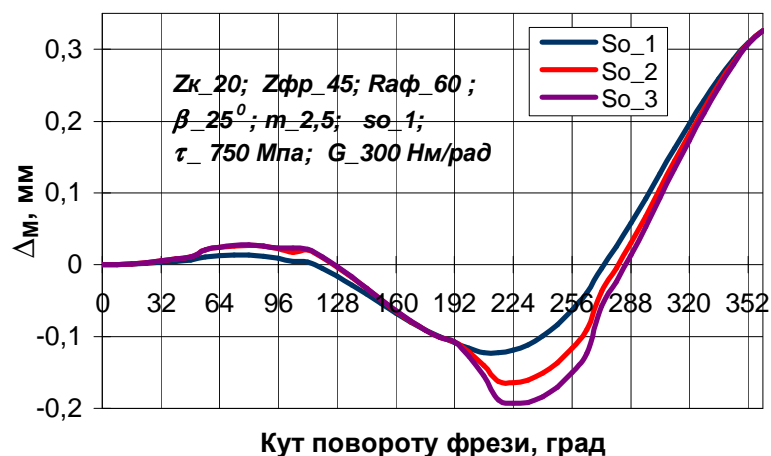


Рис.А.22. Похибка профілю внаслідок пружних крутильних деформацій на осі стола верстата

Кінематичні похибки характеризують порушення взаємозв'язаних рухів заготовки та інструменту і відображаються сумарним коливанням, яке містить окремі коливання у широкому діапазоні частот. Найвища частота відповідає частоті обертання фрези, а найнижча – частоті обертання зубчастого колеса зі столом верстата.

Нерівномірність швидкості різання та порушення узгодженого руху інструменту і заготовки з частотою обертання фрези.

Дане відхилення зумовлене похибками ланцюга приводу інструментального шпинделя верстата і призводить до почергового відставання та випередження обертання дискової фрези протягом одного її оберту відносно номінального (рівномірного) руху різання. За своїм впливом на точність зубчастого колеса вона аналогічна до попередньої похибки – діє в тангенційному напрямку та викликає зміну миттєвого радіус-вектора синусоїди.

На рис.А.23 наведено графіки переміщення вершинного леза фрези по осях ОХ і ОУ за один оберт фрези при частоті її обертання 120 хв.^{-1} , що відповідає періоду 0,5 с, якщо похибка швидкості різання становить 5% від номінальної. Фактичний профіль зубця в порівнянні з номінальним буде таким, як показано на рис.А.24.

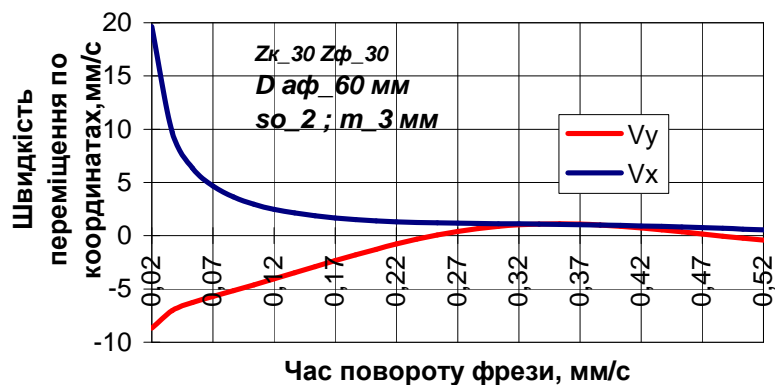


Рис.А.23. Відхилення траєкторії вершинного леза при похибці швидкості різання, рівній 5% від номінального значення

Розрахунок максимального значення даної похибки базується на наступному.

При частоті обертання фрези n , хв.^{-1} період одного оберту рівний $60/n$, с, а час між двома послідовними різаними буде становити:

$$T_z = \frac{60}{n \cdot z_{фр}}, \quad (\text{А.20})$$

де $z_{фр}$ – кількість зубців фрези.

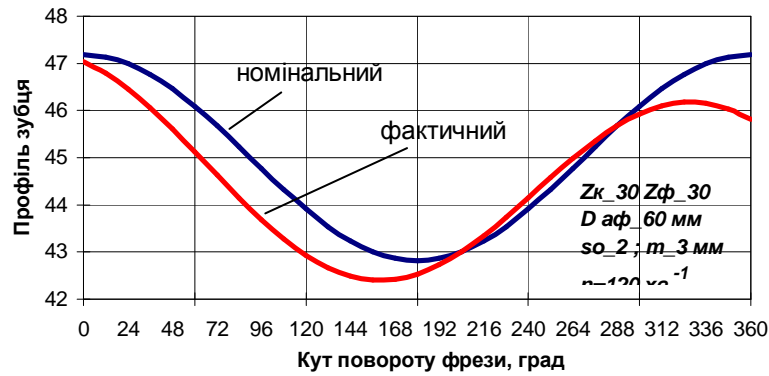


Рис.А.24. Номінальний та фактичний профіль зубця внаслідок нерівномірності швидкості різання в межах 5% від номінальної

Як і в попередньому випадку, найбільше значення похибка має на крайньому куті повороту інструменту $\varphi = 2\pi$. В процесі різання за час (А.20) колесо повертається на одиничний кут профілювання ψ , а координати профілю змінюються від початкових:

$$\begin{cases} x = (R_{\omega_{-к}} + e) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k}\right) \\ y = -(R_{\omega_{-к}} + e) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k}\right) - \delta \end{cases}$$

до найближчих:

$$\begin{cases} x' = (R_{\omega_{-к}} + e) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k} + \psi\right) \\ y' = -(R_{\omega_{-к}} + e) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k} + \psi\right) - \delta \end{cases}$$

$$\text{де } \psi = \frac{360}{Z_k \cdot z_{фр}}.$$

При узгодженому русі різниця положень по координатах X, Y мала б становити:

$$\begin{cases} \delta x = x - x' = (R_{\omega_{-k}} + e) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k}\right) - (R_{\omega_{-k}} + e) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k} + \psi\right) \\ \delta y = y - y' = (R_{\omega_{-k}} + e) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k} + \psi\right) - (R_{\omega_{-k}} + e) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k}\right) \end{cases} \quad (\text{A.21})$$

Після тотожних перетворень виразу (A.21) отримаємо наступні залежності для переміщень по осях X і Y :

$$\begin{cases} \delta x = 2 \cdot (R_{\omega_{-k}} + e) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{Z_k} + \frac{\psi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\psi}{2} \\ \delta y = 2 \cdot (R_{\omega_{-k}} + e) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{Z_k} + \frac{\psi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\psi}{2} \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

Оскільки зміна координат (A.22) відбувається за час T_z , то номінальна швидкість переміщення дискової фрези по осях X і Y буде становити, мм/с:

$$\begin{cases} V_x = \frac{\delta x \cdot n \cdot z_{\phi p}}{60} \\ V_y = \frac{\delta y \cdot n \cdot z_{\phi p}}{60} \end{cases} \quad (\text{A.23})$$

Внаслідок кінематичної похибки фактична швидкість різання буде відрізнятись від номінальної, на величини $\Delta V_{x-\phi}$ та $\Delta V_{y-\phi}$, мм/с, відповідно по осях X і Y , а прирощення профілю по координатах буде дорівнювати:

$$\begin{cases} \delta x' = \frac{60 \cdot V_{x-\phi}}{n \cdot z_{\phi p}} \\ \delta y' = \frac{60 \cdot V_{y-\phi}}{n \cdot z_{\phi p}} \end{cases}, \quad (\text{A.24})$$

Координати профілю, який утворюється з урахуванням відхилення швидкості різання :

$$\begin{cases} x' = 2 \cdot (R_{\omega_{-k}} + e) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k} + \frac{\psi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\psi}{2} + \frac{60 \cdot V_{x-\phi}}{n \cdot z_{\phi p}} \\ y' = - \left[2 \cdot (R_{\omega_{-k}} + e) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k} + \frac{\psi}{2}\right) \cdot \cos\frac{\psi}{2} + \frac{60 \cdot V_{y-\phi}}{n \cdot z_{\phi p}} \right], \end{cases} \quad (\text{A.25})$$

а максимальна похибка профілю по осях буде рівна:

$$\begin{cases} \Delta x_2 = x' - \delta x \\ \Delta y_2 = y' - \delta y \end{cases} .$$

На рис.А.25 показано залежність похибки (А.25) синусоїдального профілю внаслідок коливання швидкості різання 0,25% від її номінального значення при зміні кількості зубців колеса та модуля.

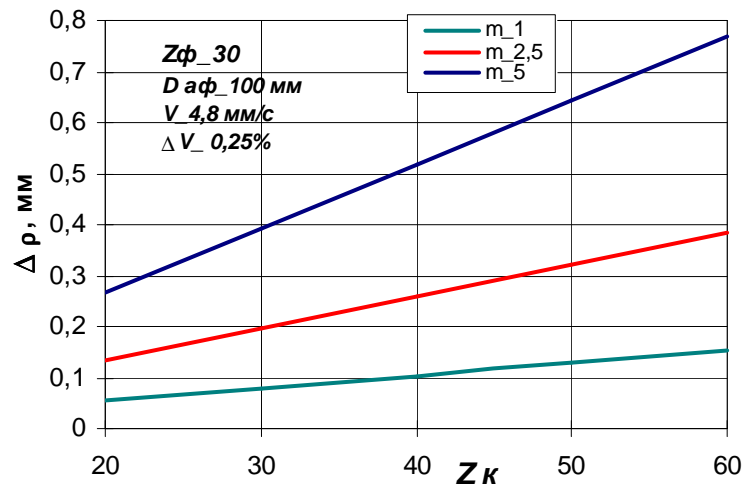


Рис.А.25.Максимальна похибка профілю внаслідок коливання швидкості різання в межах 0,25% від номінального значення

Нерівномірність швидкості різання та порушення узгодженого руху інструменту і заготовки з частотою обертання колеса зі столом верстата.

Ця похибка є циклічною низькочастотною; її частота менша від частоти попередньої похибки в кількість разів, яка дорівнює кількості зубців колеса. Виходячи з цього її частка, яка переноситься на один зубець буде більш, ніж на порядок меншою від похибки внаслідок нерівномірності швидкості різання. Приймаючи це до уваги, даною похибкою в розрахунках знехтуємо.

А.4. Сумарна похибка оброблення

Виходячи з теорії синусоїдального зачеплення активна висота зубця синусоїдального зубця лежить в межах $\pm 0,6 e$, тому похибки, які виникають на куті повороту фрези 180^0 не впливають на точність колеса, оскільки ця ділянка

не приймає участі в зачепленні. Так само похибки, які відповідають куту повороту фрези 360° і переносяться на колесо в ділянці вершини синусоїди можна не приймати до уваги, бо в реальному колесі ця частина профілю відсутня. Кут, який відповідає висоті зубця $1,2e$ дорівнює 325° .

Активна межа профілю висотою $1,2e$ з похибкою, викликаною деформуванням фрези силою різання відображена на рис.А.26.

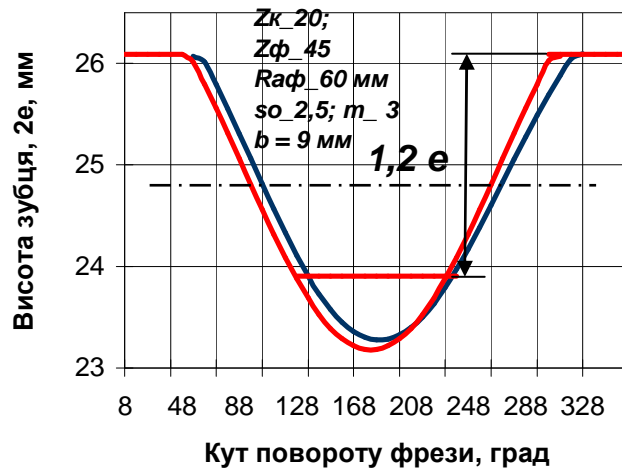


Рис.А.26. Похибка профілю в межах активної висоти зубця синусоїдального колеса

Залежності для визначення максимального відхилення за кожним чинником, отримані на основі досліджень, наведених вище, зведено в табл.А.1. Вирази, які характеризують вплив початкових чинників на елементарні похибки зубчастих коліс дозволяють розрахувати значення сумарної похибки оброблення і виявити її структуру.

Оскільки похибки основного кроку зачеплення Δp_i приводяться до відхилення профілю як функція кута зачеплення α_{ω} : $p_i \cdot \cos \alpha_{\omega}$, то вираз для сумарної похибки профілю в зубообробленні за РК-способом буде мати такий вид:

$$\Delta \Sigma = \sqrt{(\Delta p_e^2 + \Delta p_{\alpha\omega}^2) \cdot \cos^2 \alpha_{\omega} + \Delta f_r^2 + \Delta f_y^2 + \Delta f_x^2 + \Delta f_{\lambda}^2 + \Delta f_x^2 + \Delta f_{xJ}^2 + \Delta f_{\phi G}^2 + \Delta f_{\phi V}^2} \quad (\text{A.26})$$

Приклади розрахунку сумарної похибки для різних початкових даних

1. Зубофрезерний верстат - підвищеної точності з максимальним діаметром колеса 300 мм; модуль колеса 2,5 мм; ексцентриситет 3,43 мм; кількість зубців колеса -20, фрези – 45; кут нахилу зубців колеса 15° ; осьова подача 2,5 мм/об.; швидкість різання 32 м/хв., нерівномірність швидкості різання $\pm 2,5\%$; частота обертання фрези 80 хв.^{-1} ; передній кут фрези 5° ; зовнішній діаметр фрези 120 мм; жорсткість верстата радіальна 8 кН/мм, крутильна стола - 14 кН/град; матеріал заготовки – сталь 40Х, межа міцності на зсув 760 МПа, $\xi = 2,2$; осьова похибка установки фрези 0,015 мм; похибка кута зачеплення $0,05^{\circ}$; радіальне биття: стола зубофрезерного верстата 0,025 мм, фрези - 0,02 мм.

Величини, отримані на основі моделювання та розрахунків: площа зрізів – макс $1,321 \text{ мм}^2$, середня – $0,156 \text{ мм}^2$; середня сила різання 271,8 Н; радіальні пружні деформації верстата Δu 0,144 мм; торцеве биття фрези Δx_{λ} 0,02 мм; крутильні деформації на осі стола $\Delta \varphi_G$ $0,031^{\circ}$; осьові пружні деформації фрези Δ_{xJ} 0,071 мкм; похибка обкочування внаслідок крутильних деформацій стола $0,626^{\circ}$.

Елементарні похибки обробки: $\Delta p_e = 3,2 \text{ мкм}$; $\Delta f_r = 0,13 \text{ мкм}$; $\Delta f_y = 17,5 \text{ мкм}$; $\Delta f_x = 14,5 \text{ мкм}$; $\Delta f_{\lambda} = 19,2 \text{ мкм}$; $\Delta p_{\omega} = 21,3 \text{ мкм}$; $\Delta f_{xJ} = 65,4 \text{ мкм}$; $\Delta f_{\varphi G} = 0,3 \text{ мкм}$; $\Delta f_{\varphi V} = 6,3 \text{ мкм}$.

Сумарна похибка зубооброблення, приведена до відхилення профілю синусоїдального колеса, яка визначається цими складовими дорівнює $\Delta \Sigma = 75,7 \text{ мкм}$, а її структура наведена на рис.А.27.

2. Зубофрезерний верстат - нормальної точності з максимальними розмірами колеса на столі 600 мм; модуль колеса 5 мм; ексцентриситет 6,87 мм; кількість зубців колеса - 20, фрези – 45; кут нахилу зубців колеса 22° ; осьова подача 2,0 мм/об.; швидкість різання 60 м/хв., нерівномірність швидкості різання $\pm 3,5\%$; частота обертання фрези 160 хв.^{-1} ; передній кут фрези 0° ; зовнішній діаметр фрези 80 мм; жорсткість верстата радіальна 11,5 кН/мм,

крутильна стола - 6,6 кН/град; матеріал заготовки – сталь 45, межа міцності на зсув 670 МПа, $\xi = 1,8$; осьова похибка установки фрези 0,15 мм; похибка кута зачеплення $0,15^0$; радіальне биття: стола зубофрезерного верстата (при максимальному діаметрі колеса 600 мм) 0,25 мм; фрези 0,15 мм.

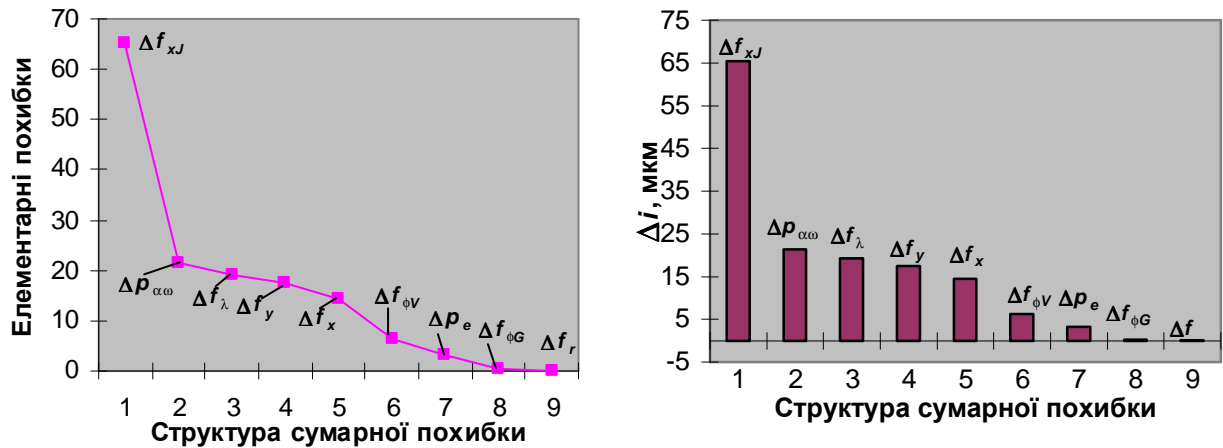


Рис.А.27. Структура сумарної похибки зубообробки

а – у процентному співвідношенні; б - у величинах відхилень

Величини, отримані на основі моделювання та розрахунків: площа зрізів – максимальна $1,601 \text{ мм}^2$, середня $0,740 \text{ мм}^2$; площа зрізів на вхідних лезах – максимальна $0,550 \text{ мм}^2$, середня – $0,014 \text{ мм}^2$; максимальна сила різання 354 Н ; середня сила різання $199,8 \text{ Н}$; максимальна сила різання на вхідних лезах 40 Н ; радіальні пружні деформації верстата Δy $0,098 \text{ мм}$; торцеве биття фрези Δx_λ $0,15 \text{ мм}$; крутильні деформації на осі стола Δf_G $0,34^0$; похибка основного кроку зачеплення внаслідок осьових деформацій фрези Δx_J $0,200 \text{ мм}$.

Елементарні похибки обробки: $\Delta p_e = 3,7 \text{ мкм}$; $\Delta f_r = 121 \text{ мкм}$; $\Delta f_y = 3,5 \text{ мкм}$; $\Delta f_x = 28,1 \text{ мкм}$; $\Delta f_\lambda = 147,2 \text{ мкм}$; $\Delta p_{\alpha\omega} = 127,9 \text{ мкм}$; $\Delta f_{xJ} = 193 \text{ мкм}$; $\Delta f_{\phi G} = 26,3 \text{ мкм}$; $\Delta f_{\phi V} = 15,5 \text{ мкм}$.

Сумарна похибка зубооброблення, приведена до відхилення профілю синусоїдального колеса, яка визначається цими складовими дорівнює $\Delta \Sigma = 662,7 \text{ мкм}$, а її структура наведена на рис.А.28.

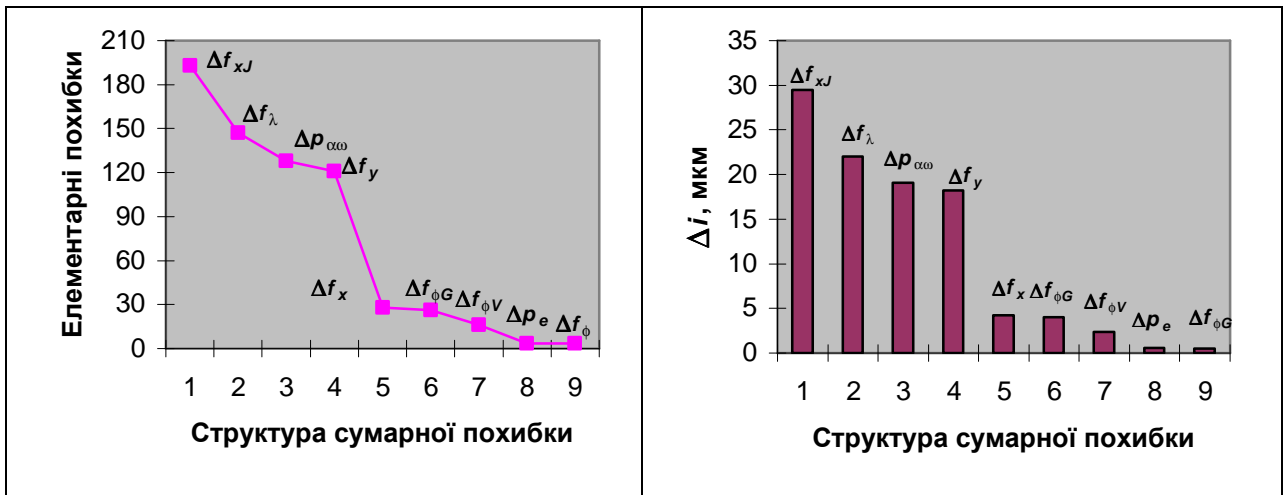


Рис.А.28. Структура сумарної похибки зубообробки

а – у величинах відхилень; б - у процентному співвідношенні

Табл.А.1

№	Початкове відхилення	Елементарна похибка	Залежність	Максимальне значення, або проміжна похибка
1	Радіальне биття фрези Δe_ϕ	Похибка основного кроку зачеплення Δp_e	$\Delta p_e = 2\pi \cdot \left(\sqrt{e^2 + \Delta e_\phi^2} - e \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_\omega$	$\Delta p_{e \max} = 2\pi \cdot \left(\sqrt{e^2 + \Delta e_\phi^2} - e \right) \cdot \operatorname{tg} \alpha_\omega \Big _{\phi=\pi}$
2	Радіальне биття колеса Δr	Похибка профілю Δf_r	$\begin{cases} x_1 = \left(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi + \frac{\Delta r}{2} \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \\ y_1 = - \left(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi + \frac{\Delta r}{2} \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \right) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases}$	$\Delta f_r = \sqrt{(x_{1i} - x_i)^2 + (y_{1i} - y_i)^2} \Big _{\phi - \phi p = 2\pi}$
3	Радіальні пружні деформації верстата Δy	Те ж, Δf_y	$\begin{cases} x = \left(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \\ y = - \left(R_{\omega_{-k}} + \Delta y_{\max} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases}$	$\Delta y_{\max} = \frac{4,666 \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{0,49} \cdot s_o^{0,954} \cdot Z_\phi^{-0,157} \cdot D_\phi^{-0,415}}{J} \cdot \sin \phi$
4	Похибка Δx установки фрези по осі X	Те ж, Δf_x	$\begin{cases} x_1 = \left(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} + \Delta x \cdot \sin \frac{\varphi}{Z} \\ y = - \left(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases}$	$\Delta x \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k}$
5	Кутове відхилення площини фрези λ перекошування	Те ж, Δf_λ	$\begin{cases} x_1 = \left(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} + \Delta x_{\lambda \max} \\ y = - \left(R_{\omega_{-k}} + e \cdot \cos \varphi \right) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases}$	$\begin{aligned} & \text{Торцеве биття фрези } \Delta x_\lambda \\ & \Delta x_{\lambda \max} = \frac{D_{a-\phi p}}{2 \cdot \operatorname{tg} \lambda} \end{aligned}$
6	Відхилення кута зачеплення $\Delta \alpha_\omega$	Похибка основного кроку зачеплення $\Delta p_{\alpha\omega}$	$\Delta p_{\alpha\omega} = 2\pi \cdot e \cdot \left[\operatorname{tg} \alpha_\omega - \operatorname{tg} (\alpha_\omega + \Delta \alpha_\omega) \right]$	

Продовження табл.А.1

7	Осьові (бокові) пружні деформації фрези Δx_J	Похибка профілю Δf_{xJ}	$\begin{cases} x = (R_{\omega_{-к}} + \Delta x_{xJ} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \frac{\varphi}{Z_k} \\ y = -(R_{\omega_{-к}} + e \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \frac{\varphi}{Z_k} \end{cases}$	<p>Похибка основного кроку зачеплення Δp_{xJ}</p> $\Delta x_{\omega} = 2,43 \cdot 10^{-4} \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{2,02} \cdot Z_{\phi}^{-0,955} \cdot b_{\phi}^{-1}$
8	Крутильні деформації на вісі стола верстата (косозубчасте колесо)	Похибка профілю $\Delta f_{\varphi G}$	$\begin{cases} x = [R_{\omega_{-к}} + e \cdot \cos(\varphi + \Delta \varphi_G)] \cdot \cos \left(\frac{\varphi + \Delta \varphi}{Z_k} \right) \\ y = -[R_{\omega_{-к}} + e \cdot \cos(\varphi + \Delta \varphi_G)] \cdot \sin \left(\frac{\varphi + \Delta \varphi}{Z_k} \right) \end{cases}$	<p>Похибка обкочування $\Delta \varphi_G$</p> $\Delta \varphi_G = 10^{-3} \cdot \frac{P_o \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot m \cdot z_k}{2 \cdot G}$
9	Нерівномірність швидкості різання	Те ж, $\Delta f_{\varphi V}$	$\begin{cases} x' = 2 \cdot (R_{\omega_{-к}} + e) \cdot \cos \left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k} + \frac{\psi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\psi}{2} + \frac{60 \cdot V_{x-\phi}}{n \cdot z_{\phi p}} \\ y' = - \left[2 \cdot (R_{\omega_{-к}} + e) \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi}{Z_k} + \frac{\psi}{2} \right) \cdot \cos \frac{\psi}{2} + \frac{60 \cdot V_{y-\phi}}{n \cdot z_{\phi p}} \right] \end{cases}$	<p>Похибка обкочування $\Delta \varphi_V$</p> $\begin{cases} \Delta x_2 = x' - \delta x \\ \Delta y_2 = y' - \delta y \end{cases} ; \Delta \rho = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$
10	Мікронерівності поверхні внаслідок: - осьової подачі	За один цикл осьового переміщення інструменту	$h_s = \rho_i - \sqrt{\rho_i^2 - \frac{s_o^2}{4}} \square \frac{s_o^2}{8 \cdot \rho_i}$	
	- руху обкочування	За один цикл колового переміщення заготовки	$h_{\varphi} = a_{\text{вер}} \cdot \sin \psi$	

Додаток Б

Експериментальне дослідження головної складової сили різання на основі методів планування експерименту

Б.1. Методика проведення експерименту. Силу різання в радіально-коловому способі визначено на основі непрямого методу - за ефективною потужністю різання, як безпосередньої функції головної складової сили різання. Для вимірювання потужності використано вимірний переносний комплект приладів мод. К50, який включає амперметр (максимальний струм 50А), вольтметр (максимальна напруга 600 В) та трьохфазний ватметр (максимальна вимірювальна потужність 30 кВт; ціна поділки -10 Вт/1 поділку) (рис.Б.1).



Рис.Б.1. Вимірювальний комплект К50 для вимірювання загальної потужності, яка споживається трьохфазним двигуном приводу зубофрезерного верстату

Дослідження проводилися на зубофрезерному верстаті мод.516.

На кожному етапі експерименту, при певних режимах різання встановлювали потужність, яка витрачається приводом для роботи верстата під час різання (N_{piz}) і на холостому ході (N_{xx}). Ефективну потужність розраховували з залежності:

$$N_e = \frac{N_{piz} - N_{xx}}{i}, \text{ кВт,}$$

де i – передавальне співвідношення між двигуном і інструментальним шпинделем, $i = 28,4$. Встановлено, що для трьохфазного електродвигуна головного приводу верстата потужність, яка споживається на холостому ході є сталою на всіх робочих режимах, рівною 0,23 кВт.

Головна складова сили різання в експерименті визначалася із співвідношення: $P_o = P_z = 60 \cdot 1020 \cdot \frac{N_e}{V}$, Вт, де V - швидкість різання в м/хв.

Б.2. Теоретичні засади експериментальних досліджень. Залежність максимальної сили різання в РК-способі від основних чинників процесу базується на моделі параметрів зрізів дискової фрези і має вид (Роз.3):

$$P_o = P_z = 4,67 \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{0,49} \cdot s_o^{0,954} \cdot Z_{\phi}^{-0,157} \cdot D_{\phi}^{-0,415}, \text{ Н} \quad (\text{Б.1})$$

де τ – межа міцності матеріалу колеса на зсув, МПа; ξ – середній коефіцієнт осадження стружки; m – модуль, мм; s_o - осьова подача, мм/об.; Z_{ϕ} і D_{ϕ} – кількість зубців і зовнішній діаметр фрези, мм.

Встановлення функції відгуку і перевірка ступені її відповідності рівнянню (Б.1) виконана за методом повного факторного експерименту, план відповідав трьохфакторному експерименту типу 2^3 . Змінні чинники: модуль, осьова подача та зовнішній діаметр фрези; межі варіювання: модуль: $m = 1$ мм - 3 мм; подача $s_o = 0,502$ мм/об. - 2,04 мм/об.; діаметр $D_{a\phi}$: 80 – 110 мм.

Б.2.1. Початкові дані. Інструмент: матеріал фрез – швидкорізальна сталь Р6М5 і твердий сплав ВК; кількість зубців - 40, була прийнята постійною для усіх дослідів; ширина вершинного леза 1 - 1,4 мм; колесо – прямозубе, кількість зубців 14 - 36, матеріал – сталь 45, межа міцності $\sigma_B = 600$ МПа; обладнання – зубофрезерний верстат мод.516 з мультиплікатором на осі фрези, $i = 1/3$; швидкість різання 52,8 м/хв. - 72,6 м/хв.

Для вказаних початкових даних залежність максимальної сили різання від вибраних чинників мала наступний вид:

$$P_z = 1295 \cdot m^{0,49} \cdot s_o^{0,954} \cdot D_{\phi}^{-0,415}. \quad (\text{Б.1})$$

Після логарифмування та лінеаризації залежність (1) представлена поліномом, у виді якого будемо шукати функцію відгуку:

$$\hat{y} = b_0 + p \cdot x_1 + k \cdot x_2 + q \cdot x_3, \quad (\text{Б.2})$$

де: C_p – коефіцієнт рівняння; p, k, q – показники ступенів;
 $\ln P_o = y; \ln C_p = b_0; \ln m = x_1; \ln s_o = x_2; \ln D_\phi = x_3$.

Для знаходження коефіцієнтів рівняння (Б.2) використано повний факторний експеримент типу 2^3 . Результати кодування наведені в табл.Б.1.

Табл.Б.1

Рівень факторів	m , мм		s_o , мм/об.		$D_{\phi p}$, мм	
	x_1	$\ln x_1$	x_2	$\ln x_2$	x_3	$\ln x_3$
Верхній, +1	3,0	1,1	2,04	0,713	110	4,7
Основний, 0	2,0	-	1,271	-	95	-
Нижній, -1	1,0	0	0,502	-0,689	80	4,38

Б.2.2. Експериментальні дані та їх опрацювання. В табл.Б.2 наведено результати вимірювання потужності та розрахунку головної складової сили різання у восьми дослідах, виконаних за матрицею ПФЕ.

Табл. Б.2

Ефективна потужність N_e , Вт / Сила різання P_z , Н		Середнє значення сили різання \bar{P}_z , Н	$\ln \bar{P}_z$
Дослід 1	Дослід 2		
51,8 / 60,1	54,6 / 63,3	61,7	4,12
32,7 / 37,9	24,5 / 34,2	36,1	3,59
13,9 / 16,1	14,5 / 16,8	16,4	2,80
9,7 / 11,2	7,4 / 8,6	9,9	2,30
62,0 / 71,9	60,5 / 70,2	71,1	4,26
36,4 / 42,2	35,1 / 40,7	41,5	3,73
16,6 / 19,3	14,7 / 17,1	18,2	2,90
9,7 / 11,2	10,3 / 11,9	11,6	2,45

Перевірка відтворюваності дослідів проводилася основі критерія Кохрена G . В табл.Б.3 наведено результати розрахунку дисперсії відтворюваності.

Табл.Б.3

№ досліду	$y_{j_k} - \overline{y_k}$	$(y_{j_k} - \overline{y_k})^2$
1-1	4,12 - 4,10	$4,0 \cdot 10^{-4}$
1-2	4,12 - 4,15	$9,0 \cdot 10^{-4}$
2-1	3,59 - 3,63	$1,60 \cdot 10^{-3}$
2-2	3,59 - 3,53	$3,6 \cdot 10^{-3}$
3-1	2,8 - 2,78	$4,0 \cdot 10^{-4}$
3-2	2,8 - 2,82	$4,0 \cdot 10^{-4}$
4-1	2,3 - 2,41	$1,21 \cdot 10^{-2}$
4-2	2,3 - 2,15	$2,25 \cdot 10^{-2}$
5-1	4,26 - 4,28	$4,0 \cdot 10^{-4}$
5-2	4,26 - 4,25	$1,0 \cdot 10^{-4}$
6-1	3,73 - 3,74	$1,0 \cdot 10^{-4}$
6-2	3,73 - 3,71	$4,0 \cdot 10^{-4}$
7-1	2,9 - 2,96	$3,6 \cdot 10^{-3}$
7-2	2,9 - 2,84	$3,6 \cdot 10^{-3}$
8-1	2,45 - 2,42	$9,0 \cdot 10^{-4}$
8-2	2,45 - 2,48	$9,0 \cdot 10^{-4}$
		$\Sigma 0,0519$

При достовірній ймовірності відтворюваності $P = 0,95$, для восьми дослідів ($N = 8$) і їх двохкратній повторюваності ($k = 2$) дисперсія і середнє квадратичне відхилення становлять, відповідно:

$$S^2 = \frac{(y_{j_k} - \overline{y_k})^2}{N \cdot (k - 1)} = 0,0065; S = 0,075,$$

а величина критерію Кохрена рівна: $G = \frac{S_{v \max}^2}{S^2} = \frac{0,0065}{0,0225} = 0,29$.

Для наших початкових даних табличне значення $G_{маб} = 0,68$. Оскільки $G < G_{маб}$, то результати дослідів можна вважати відтворюваними.

На основі отриманих результатів коефіцієнти функції відгуку мають такі значення:

$$b_0 = 5,57; b_1 = 0,25; b_2 = 0,66; b_3 = -0,07; b_{12} = 0,02; b_{13} = 0,006; b_{23} = -0,004; b_{123} = -0,006,$$

а рівняння регресії в кодованих змінних набуває такого виду:

$$Y = 5,57 + 0,25 x_1 + 0,66 x_2 - 0,07 x_3 + 0,02 x_1 x_2.$$

Перевірку значимості знайдених коефіцієнтів визначено з допомогою критерія Стюдента t_k .

$$S_{b_i}^2 = \frac{S^2}{N \cdot k} = \frac{0,183}{8 \cdot 2} = 0,0114; S = 0,107.$$

Таблична величина критерія Стюдента t_k для $P = 0,95$ та кількості ступенів вільності $f = N \cdot (r - 1) = 8$ рівна 2,306, а половина довжини достовірного інтервалу $\Delta b_i = t_k \cdot S_{b_i} = 0,247$. Умові $|b_i| \geq \Delta b_i$ задовольняють коефіцієнти $|b_0| = 5,57; |b_1| = 0,25; |b_2| = 0,66$.

Б.2.3. Перевірка адекватності моделі.

Величину дисперсії адекватності визначено на підставі залежності:

$$S_{ад}^2 = \frac{k}{N - n} \sum_k (\bar{y}_k - \hat{y}_k)^2.$$

Розрахункове значення дисперсії адекватності для п'яти членів n апроксимуючого полінома становить 0,023, а критерій Фішера рівний 0,13. Оскільки розрахункове значення цього критерія менше його критичного значення, рівного 4,07, то можна зробити висновок про адекватність моделі.

Після перетворення незалежних змінних x_i в безрозмірні змінні X_i отримано наступні вирази для цих параметрів:

$$X_1 = \frac{2 (\ln \bar{x}_1 - 1,1)}{1,1} + 1 = 1,82 \ln \bar{x}_1 - 1;$$

$$X_2 = \frac{2 (\ln \bar{x}_2 - 0,713)}{0,713 + 0,689} + 1 = 1,43 \ln \bar{x}_2 - 0,2;$$

$$X_3 = \frac{2 (\ln \bar{x}_3 - 4,7)}{4,7 - 4,38} + 1 = 6,25 \ln \bar{x}_3 - 28,38.$$

Модель в натуральних змінних:

$$Y = 5,57 + 0,25 (1,82 \ln \bar{x}_1 - 1) + 0,66 (1,43 \ln \bar{x}_2 - 0,2) -$$

$$- 0,07 (6,25 \ln \bar{x}_3 - 28,38) + 0,02 (1,82 \ln \bar{x}_1 - 1)(1,43 \ln \bar{x}_2 - 0,2) =$$

$$5,57 + 0,46 \ln m + 0,94 \ln s_o - 0,44 \ln D_{\phi p} + 0,05 \ln m \ln s_o$$

$$- 0,007 \ln m - 0,03 \ln s_o + 0,004 =$$

$$7,18 + 0,45 \ln m + 0,91 \ln s_o - 0,44 \ln D_{\phi p} + 0,05 \ln m \ln s_o,$$

тобто:

$$\ln P_z = e^{7,18} + \ln m^{0,45} + \ln s_o^{0,91 + 0,05 \ln m} - \ln D_{\phi p}^{-0,44}. \quad (\text{Б.3})$$

Після потенціювання рівняння (3) отримаємо такий вираз для експериментальної математичної моделі сили різання:

$$P_z = 1312 \cdot m^{0,45} \cdot s_o^{0,91} \cdot D_{\phi p}^{-0,44} \cdot s_o^{0,05 \ln m}. \quad (\text{Б.4})$$

Відхилення теоретичних параметрів рівняння (1) від експериментальних за рівнянням (3) становить: $\Delta C_p = 1,3\%$; $\Delta p = 1\%$; $\Delta k = 4,4\%$; $\Delta q = 2,5\%$, що підтверджує адекватність теоретичної залежності для розрахунку сили різання та можливість її використання для вибору режимів різання, а також параметрів фрези в радіально-коловому способі нарізання зубчастих коліс.

Табл.Б.4

№ дослід	Коди чинників							Ефективна потужність N_e , Вт / Сила різання P_z , Н		Середнє значення сили різання \bar{P}_z , Н	$\ln \bar{P}_z$
	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	Дослід 1	Дослід 2		
								N_1 / P_{z1}	N_2 / P_{z1}		
	+	+	+	+	+	+	+	518 / 601	546 / 633	617	6,43
	-	+	+	-	-	+	-	327 / 379	245 / 342	361	5,89
	+	-	+	-	+	-	-	139 / 161	145 / 168	164	5,10
	-	-	+	+	-	-	+	97 / 112	74 / 86	99	4,60
	+	+	-	+	-	-	-	620 / 719	605 / 702	711	6,57
	-	+	-	-	+	-	+	364 / 422	351 / 407	415	6,03
	+	-	-	-	-	+	+	166 / 193	147 / 171	182	5,20
	-	-	-	+	+	+	-	97 / 112	103 / 119	116	4,75

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Проректор з науково-педагогічної
роботи Національного Університету
«Львівська політехніка»

О.Р.Давидчак

_____ грудня 2016 р.



про використання в навчальному процесі у національному університеті
«Львівська політехніка» результатів дисертаційної роботи
Громнюка Сергія Івановича
«Технологічне забезпечення якості нарізання зубчастих коліс радіально-
коловим способом»

Комісія у складі:

Голова комісії: директор ПМТ, д.т.н., доц. Ланець О.С.
Члени комісії: зав. каф. ТМБ д.т.н., проф. Грицай І.Є.
доц. каф. ТМБ д.т.н., доц. Ступницький В.В.
доц. каф. ТМБ к.т.н., доц. Сліпчук А.М.

цим актом підтверджує те, що у навчальному процесі кафедри технології
машинобудування використовуються результати дисертаційної роботи
Громнюка С.І. «Технологічне забезпечення якості нарізання зубчастих коліс
радіально-коловим способом».

Комісія встановила, що:

результати роботи впроваджено у навчальний процес кафедри технології
машинобудування, зокрема, використано для підготовки фахівців освітньо-
кваліфікаційного рівня «бакалавр» напрямку 6.050502 «Інженерна механіка»
та «спеціаліст» за спеціальністю 7.05050201 «Технологія машинобудування»,
а саме: у лекційних курсах з навчальних дисциплін «Технологічні основи
машинобудування» обсягом 180 год., «Технологія машинобудування», ч.2
обсягом 179 год. і «Теорія різання» обсягом 88 год.

Голова комісії: Ланець д.т.н., доц. Ланець О.С.

Члени комісії: Грицай д.т.н., проф.. Грицай І.Є.

Ступницький д.т.н., доц. Ступницький В.В.

Сліпчук к.т.н., доц.. Сліпчук А.М.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. Голови правління
ПРАТ «Львівський
локомотиворемонтний завод»
ЯРЕМА Р.Я.

« » грудня 2016 р.

АКТ

**про впровадження наукових та прикладних результатів дисертаційної роботи
ГРОМНЮКА СЕРГІЯ ІВАНОВИЧА
на тему: «Технологічне забезпечення якості нарізання зубчастих коліс
радіально-коловим способом»**

Комісія у складі: в.о. Голови правління ПРАТ «Львівський локомотиворемонтний завод» Яреми Р.Я., Головного технолога ПРАТ «ЛЛРЗ» Баса В.Р. та в.о. Головного інженера Стадницького Олександра Михайловича засвідчує використання наукових та прикладних результатів дисертаційної роботи Громнюка Сергія Івановича.

Об'єктом впровадження є:


1. Методика розрахунку та обґрунтування режимів нарізання зубчастих коліс великих модулів радіально-коловим способом і їх економічної ефективності.

2. Результати вибору раціональних режимів різання технологічного процесу нарізання зубчастих коліс приводу локомотива.

Використання результатів дисертаційних досліджень дає змогу скоротити основний час технологічної операції зубофрезерування, підвищити продуктивність процесу та зменшити витрати на модульні черв'ячні фрези великих модулів.

Голова комісії:

в.о. Голови правління ПРАТ «ЛЛРЗ»



Ярема Р.Я.

Члени комісії:

Головний технолог ПРАТ «ЛЛРЗ»


Баса В.Р.

в.о. Головного інженера


Стадницький О.М.