


Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Львівська політехніка»

**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

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів 2016

Дисертація на правах рукопису.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Грицай Ігор Євгенович**,  
Національний університет «Львівська  
політехніка»,  
завідувач кафедри технології машинобудування

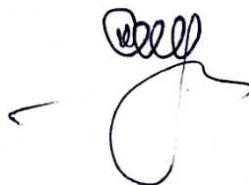
Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Внуков Юрій Миколайович**,  
Запорізький національний технічний  
університет,  
проректор з наукової роботи;

доктор технічних наук, доцент  
**Васильків Василь Васильович**,  
Тернопільський Національний технічний  
університет ім. І. Пулюя,  
професор кафедри технології  
машинобудування

Захист відбудеться 6 лютого 2017 року о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С.Бандери,12, навчальний корпус 14, ауд.61.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий 30 грудня 2016 р.  
Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06  
к.т.н., доцент



Ю.П Шоловій

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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 (РК-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-прикладним завданням сучасного машинобудування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконання дисертаційної роботи пов'язане з науковою тематикою кафедри технології машинобудування Національний університет «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» (Державний реєстраційний номер 0113U006296) та госпдоговірної теми ГД 0482 “Розроблення технологічного оснащення для модернізації зубофрезерного верстата моделі 5К32 і технології нарізання зубчастих коліс способом радіально-колового формоутворення» (Державний реєстраційний номер 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 завдання:**

- 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 та результуючого руху різання внаслідок обертання фрези, її осьової подачі і кругової подачі стола з зубчастим колесом; встановлені залежності для розрахунку товщини, ширини і площі поперечного перерізу зрізів на зубцях і лезах, параметричні функції яких періодично змінюються у часі одного оберту дискової фрези;

- 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 обточуванні;

- досліджено та узагальнено закономірності силового навантаження по куту повороту фрези, як функції змінних параметрів зрізів і початкових умов технологічного процесу: осьової подачі, діаметра і кількості зубців фрези, модуля та кількості зубців колеса, підтверджені експериментальними дослідженнями;

- встановлено вплив сили різання та пружних деформацій і коливань на точність і шорсткість профілів зубців, які фрезерують РК-способом; отримані залежності дають змогу розраховувати граничну величину осьової подачі та встановити конструктивно-технічні параметри інструментів і обладнання для забезпечення заданої якості зубчастих коліс і ефективності технологічного процесу;

- розроблено та обґрунтовано напрямки удосконалення зубофрезерних верстатів і оснащення, розширення їх технологічних можливостей шляхом впровадження програмного керування головними кінематичними 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 запропоновано методика обґрунтування і розрахунку раціональних робочих режимів з урахуванням технологічних чинників, які забезпечують задану точність профілів і висоту мікро нерівностей робочих поверхонь зубців;

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

- розроблено методика визначення нерівномірності силового навантаження в циклі обертання фрези, яка є базою для удосконалення схеми різання та вирівнювання сили різання в РК-способі;

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

- обґрунтовано засади технологічного спорядження та удосконалення зубофрезерного обладнання для нарізання на одному верстаті одним різальним інструментом зубчастих коліс з різними профілями зубців використанням програмного керування приводами головного руху і переміщення фрези.

Розроблені заходи дають змогу підвищити точність та якість зубчастих коліс, нарізаних за технологією радіально-колового способу, забезпечують вирівнювання сили різання, удосконалюють та істотно підвищують ефективність технологічного процесу радіально-колового зубофрезерування, обґрунтовують шляхи модернізації зубофрезерних верстатів.

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 «Проблеми 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 науковому періодичному видання іншої держави, 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 197 сторінок, що включають 112 сторінок

основної частини, 82 рисунки, 15 таблиць, 125 літературних джерел на 17 сторінках та двох додатків на 57 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, наведено дані, що визначають її наукову та практичну цінність і основні положення, які виносяться на захист. Подано інформацію про апробацію результатів досліджень, публікації за досліджуваною темою і особистий внесок здобувача, загальну характеристику дисертації та її анотацію.

У **першому** розділі «Стан в галузі технологій нарізання зубчастих коліс та наукових досліджень процесів зубофрезерування» проаналізовано відомі методи і технології нарізання циліндричних зубчастих коліс. Наведено переваги та недоліки способів зубофрезерування методом обкочування і методом копіювання, традиційні для машинобудування, охарактеризовано їх обмеження та галузі використання. Показано, що найбільш розповсюджений та універсальний з відомих способів - зубофрезерування модульними черв'ячними фрезами містить недолік, який не може бути усунений зміною схеми різання черв'ячної фрези – це нерівномірність зрізуваних шарів і коливання сили різання, які обмежують граничні значення робочих режимів. Окрім того, ці інструменти є дорогими, а сам процес зубофрезерування – витратний.

У наш час серед відомих технологічних процесів і способів зубонарізання існують такі, що характеризуються широкою універсальністю щодо об'єктів виготовлення, типів та видів зубчастих коліс, незначними енергетичними та матеріальними витратами на різальні інструменти, оснащення і верстати. До них належить, зокрема, радіально-коловий спосіб зубообробки, автором якого є інж. Е.М.Благут. Цей спосіб полягає в тому, що дискову фрезу встановлюють замість черв'ячної фрези ексцентрично, а величина зміщення еквівалентна модулю нарізаного колеса. Інструментом служить тонка стандартна дискова фреза, а процес зубонарізання здійснюється в умовах обкочування і неперервного поділу на універсальному зубофрезерному верстаті, який випускається промисловістю серійно. Одним інструментом, зміною величини його ексцентриситету можна нарізати колеса різних модулів, що характеризує універсальність даного способу, а можливість відмовитися від складних і дорогих зубонарізних інструментів значно спрощує процес зубонарізання і зменшує його собівартість.

Різні аспекти практичних і теоретичних основ процесу оброблення зубчастих коліс РК-способом, закономірності різання, профілювання та формоутворення зубчастих поверхонь, проектування різальних інструментів і кінематики верстатів розроблено в роботах Грицяя І.Є., Литвиняка Я.М.,

Благута Е.М., Юрчишина І.І., Махоркіна Є.М., а близького до нього способу контурного формоутворення зубчастих поверхонь дисковою фрезою на багатоперацийному верстаті з ЧПК – в працях Данильченка Ю.М., Пастернака С.І., Сторчака М.Г., Кривошеї А.В., Бабичева Д.Т., Голованева В.А., Тайсина Ю.А. Разом з тим, в технічній літературі недостатньо уваги приділено питанням, без вирішення яких неможливо забезпечити впровадження та ефективного використання цього способу у виробництві. Зокрема, відсутня методика розрахунку параметрів зрізів на лезах і зубцях дискової фрези, сучасні методи дослідження та залежності для розрахунку сили різання і нерівномірності силового навантаження, їх впливу на точність зубчастих коліс і якість робочих поверхонь, зв'язок цих чинників з конструктивними, технічними і технологічними параметрами процесу. На основі виконаних в цьому розділі досліджень та аналізу стану в вказаних питаннях і проблемах сформульовано висновки та задачі досліджень, які необхідно вирішити в дисертаційній роботі.

У другому розділі «Дослідження параметрів зрізів дискової фрези в процесі зубонарізання за РК-способом» викладена загальна методологія описання процесу різання при усуненні припуску із впадини між зубцями та виведено основні залежності для розрахунку і дослідження параметрів зрізуваних шарів, які відображають інформацію, необхідну для моделювання силових чинників і точності зубооброблення РК-способі. Складність при математичному описанні зрізів дискової фрези полягає в урахуванні чотирьох робочих рухів - подачі, руху різання, обертання заготовки і зворотно-поступального радіального переміщення інструменту, під час яких в умовах неперервного поділу-обкочування і зміни миттєвого радіуса фрези у різанні задіяна велика кількість зубців і лез, а параметри зрізів на них неперервно змінюються.

У роботі процес різання розглядається дискретним в кутових положеннях, які визначаються кутовим кроком фрези і таким, що відбувається у певній перехідній поверхні між поверхнею, з якої вже знято припуск та необробленою частиною впадини (рис.1). У довільному положенні  $i$  – го зубця інструменту ця перехідна поверхня розглядається утвореною: даним,  $i$ -м зубцем, з миттєвим радіусом його виступів  $\rho_i$ ; 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 подачі в протилежному від вектора  $s_o$  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 кут профілювання.

Координати вершини даного зубця у певному миттєвому кутовому положенні, що визначається кутом  $\phi_i$  та миттєвий радіус фрези  $\rho_i$  в цьому куту її відносного повороту рівні, відповідно:



$$x_i = (R_{af} + e \cdot \cos \varphi_i) \cdot \cos \frac{\varphi_i}{Z_k}; \quad (1)$$

$$y_i = (R_{af} + e \cdot \cos \varphi_i) \cdot \sin \frac{\varphi_i}{Z_k}; \quad (2)$$

$$\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}. \quad (3)$$

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  $\Phi$  повороту фрези (рис.2), а на виході зубця з контакту з заготовкою знову зменшується до нуля.

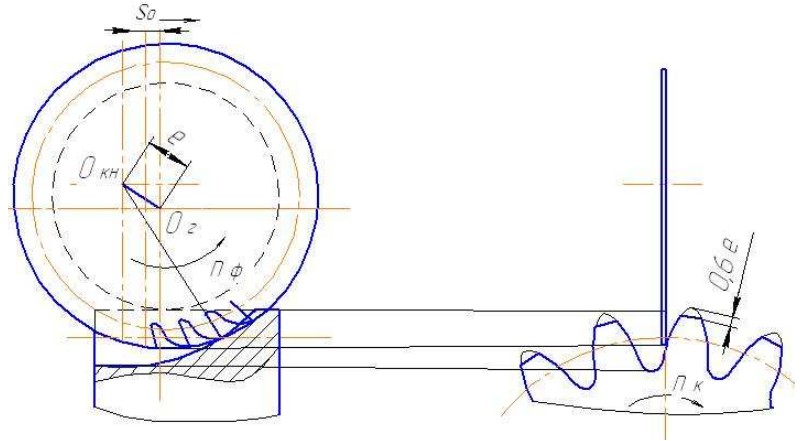


Рис.1. Схема різання і формоутворення в РК-способі

Кут  $\Phi = \Phi_{i \max}$ , величина якого для кожного зубця має інше значення внаслідок ексцентриситету становить:

$$\Phi_{i \max} = \arctg \frac{\Delta x_i}{\rho_{\min}} = \arctg \left( \frac{\sqrt{2 \cdot R_{af} \cdot e \cdot \cos \varphi_i - e^2 \cdot \cos^2 \varphi_i}}{R_{af} - e} \right). \quad (4)$$

Величину  $\Delta x_i$  визначено із умови перетину кіл, що мають миттєві радіуси вершин виступів зубців  $\rho_i$  та  $\rho_{i-1}$  з колом виступів зубців колеса в площині різання, що збігається з осью площинною фрези. Схема утворення зрізу за слідом по осьовій подачі наведена на рис.2, а.

Миттєва середня товщина зрізів на вершинному лезі  $a_{в_с}$ , що відповідає даному миттєвому радіусу і куту повороту фрези  $\varphi_i$ , приведена до площини передньої поверхні її зубця, описана залежністю (рис.3):

$$a_{в_с\_i} = \frac{\rho_i \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \text{ctg}^2 \Phi_i}} - \rho_{\min}}{\cos \Phi_i}, \quad (5)$$

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, б.

На рис.3 наведено схему для визначення миттєвої площі перерізу зрізів. Окремо визначаються лінійні і площинні параметри зрізів на лезах, а сумарна миттєва площа зрізів на зубцях розраховується за площами зрізів вершинних і



мм/об.) (а) та від осьової подачі і зовнішнього діаметра фрези ( $m = 2,0$  мм;  $Z_{фр} = 36$ ). На рис. 7 показано залежність середньої площі перерізу зрізів на вхідних лезах фрези від модуля і кількості зубців фрези.

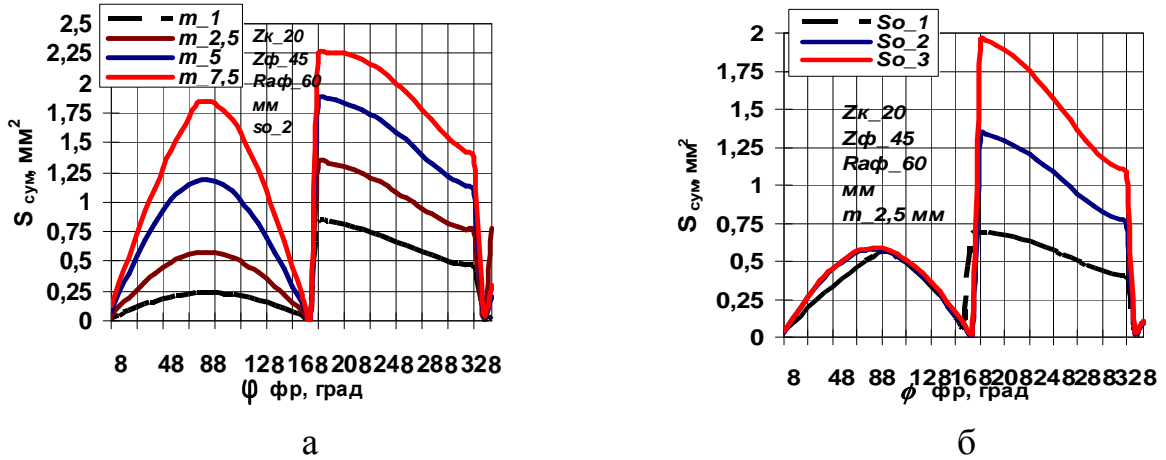


Рис.4. Залежність сумарної площі перерізу зрізів на зубцях по кут повороту фрези від модуля (а) та від кількості зубців фрези (б)

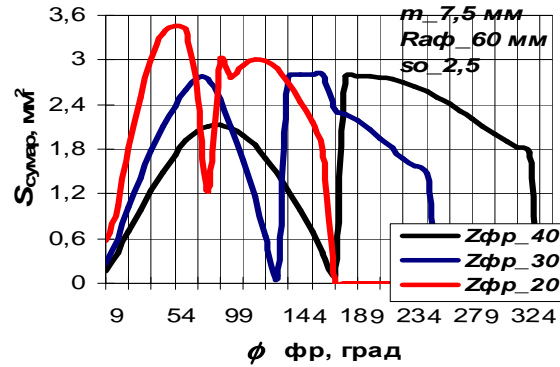


Рис.5. Залежність сумарної площі перерізу зрізів на вершинних і бокових лезах по кут повороту фрези від кількості зубців фрези

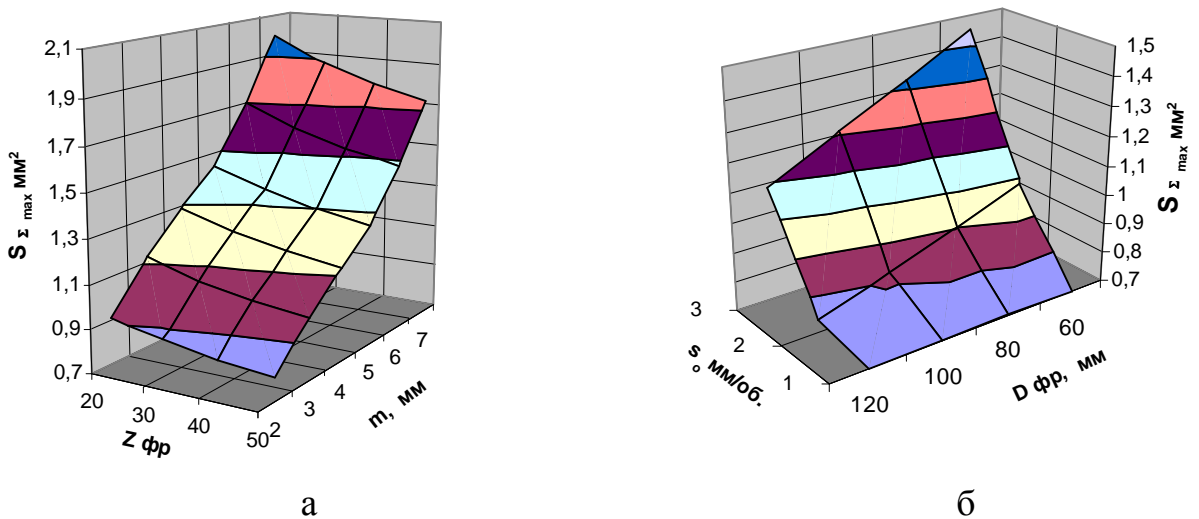


Рис.6. Залежність максимальної сумарної площі перерізу зрізів фрези: а – від модуля і кількості зубців фрези ( $D_{аф} = 100$  мм,  $s_o = 1,5$  мм/об.); б - від осьової подачі і зовнішнього діаметра фрези ( $m = 2,0$  мм;  $Z_{фр} = 36$ )

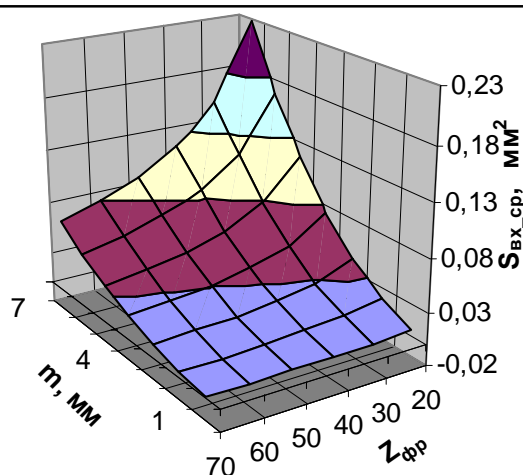


Рис.7. Залежність середньої площі перерізу зрізів дискової на входних бокових лезах фрези від модуля і кількості зубців фрези ( $D_{af} = 100$  мм,  $s_o = 1,5$  мм/об.)

Достовірність виведених залежностей була перевірена та підтверджена порівнянням теоретичного і фактичного розрахункового об'ємів матеріалу, який усувається із впадини на довжині, рівній ширині вінця колеса, що дає змогу використовувати отримані залежності для практичних цілей.

У третьому розділі «Моделювання сили різання та її складових В РК-способі» розглянуто питання теоретичних досліджень сили різання та впливу на неї основних параметрів. Ця сила є функцією параметрів зрізів, виникає на зубці фрези в момент врізання, змінюється за певним законом за зміною площі та товщини зрізів за оберт фрези; сумарна сила визначається сумою сил на усіх активних зубцях фрези. Головна складова сили різання на одному зубці, рівна тангенційній складовій сили різання визначається залежністю:

$$P_o = P_z = P_\tau \cdot \cos\Phi = \tau \cdot S \cdot \operatorname{ctg}\Phi, \quad (8)$$

де  $P_\tau$  – сила зсуву;  $\tau$  – границя міцності оброблюваного матеріалу на зсув, МПа;  $\Phi$  – кут зсуву;  $S$  – площа поперечного перерізу зрізу, мм<sup>2</sup>;  $a$ ,  $b$  – товщина і ширина зрізуваного шару, мм. Приймавши,  $\xi \cong \operatorname{ctg}\Phi$ , що можна прийняти при малих значеннях переднього кута відрізних фрез, отримуємо:  $P_o = P_z = \tau \cdot \xi \cdot S$ .

Сумарна сила  $P_o$  на одному  $i$ -му зубці дорівнює сумі елементарних сил на лезах цього зубця. Миттєві сили на лезах і зубцях наведено на рис.8, а; сумарна сила в ділянці найбільшої товщини зрізів – на рис.8, б.

Під час різання дискової фрези у контакті з заготовкою перебувають декілька зубців, а сила різання  $P_{o\Sigma}$  рівна сумі сил на всіх зубцях:  $P_{o\Sigma} = \sum P_{o_i}$ ; при цьому довжина дуги контакту фрези із заготовкою становить:

$$L_k = \varphi_k \cdot \frac{D_{af}}{2}, \text{ а кількість активних зубців на довжині } L_k \text{ рівна } z_{ак} = \frac{L_k}{\tau_{фр}} \text{ (} D_{af} -$$

зовнішній діаметр фрези;  $\tau_{фр}$  – кутовий крок фрези;  $\varphi_k$  – кут контакту). Як приклад, на рис.9 показані графіки зміни по куту обертання фрези головної

складової сили різання на вершинних лезах (а), сумарної сили на зубцях (б) та сумарної на довжині контакту фрези з колесом сили (в).

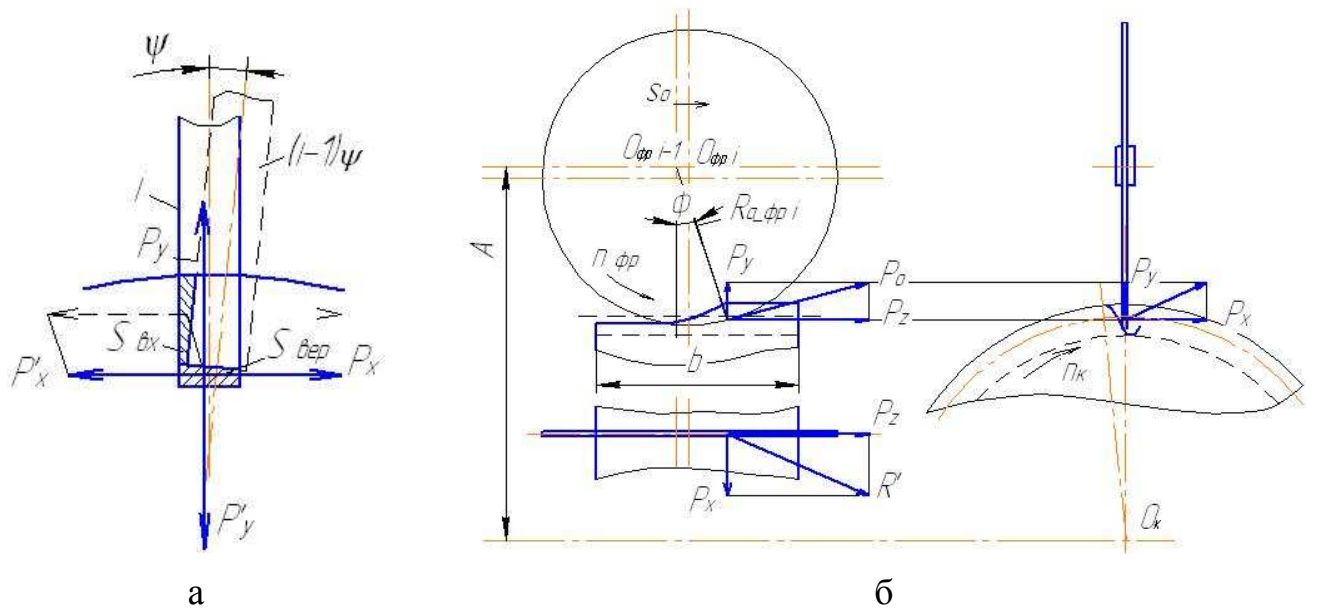


Рис.8. Складові сили різання на вершинному і вхідному лезах (а) і сили, які діють на зубець в ділянці з максимальною товщиною зрізу (б)

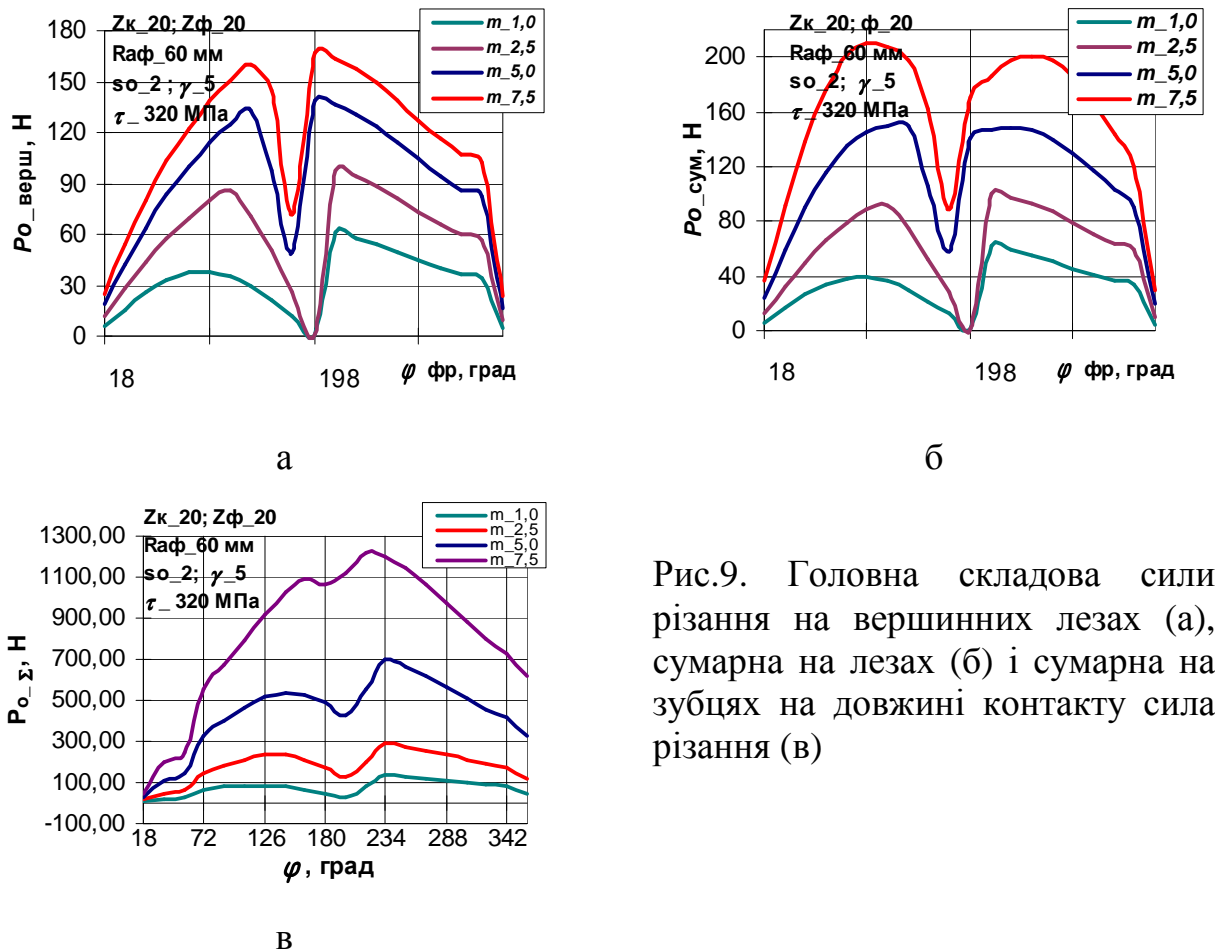


Рис.9. Головна складова сили різання на вершинних лезах (а), сумарна на лезах (б) і сумарна на зубцях на довжині контакту сила різання (в)

**Розділ 4** «Пружні деформації дискової фрези та їх вплив на точність процесу. Мікронерівності робочих поверхонь зубців коліс, нарізаних РК-способом» присвячений дослідженню похибок зубчастих коліс і відхиленням профілів, зумовлених пружними деформуваннями в технологічній системі зубофрезерного верстата. Встановлено, що в структурі сумарної похибки найбільший вплив на зниження точності обробки мають відхилення, викликані періодичними пружними коливаннями. Складова сили різання  $P_x$ , яка виникає внаслідок зрізання частини припуску боковими вхідними лезами, скерована в напрямку осі фрези, а її дія призводить до періодичних осьових пружних деформацій  $\Delta_{xJ}$  фрези, як показано на рис.10 (діаметр фрези 120 мм; товщина 3 мм; межа міцності матеріалу зубчастого колеса на зсув 350 МПа; коефіцієнт осадження стружки 2,6). Залежність бокової складової сили фрези як функції середньої площі перерізу зрізу вхідними лезами має вид:

$$P_x = 0,078 \cdot \tau \cdot \xi \cdot m^{2,02} \cdot Z_\phi^{-0,955} \quad (9).$$

Максимальна осьова деформація фрези з швидкорізальної сталі від дії цієї сили описана залежністю (10), а величина пружного деформування в радіальному напрямку, що визначається радіальною жорсткістю  $J_y$  - залежністю (11):

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

$$\Delta y = \frac{P_y}{J_y}, \text{мм}; P_y = P_o \cdot \sin \Phi, \quad (11)$$

де  $P_y$  – радіальна складова сили різання зубофрезерування;  $\Phi$  – кут передньої поверхні  $i$ -го зубця фрези, що відповідає максимальній товщині зрізу.

Крутильні пружні деформації на осі стола верстата діють періодично з частотою, рівною зубцевій, їх зміна в межах однієї впадини між зубцями колеса здійснюється за законом зміни сили  $P_o$ , а величина крутильного деформування стола, яка визначає похибку обкочування, буде дорівнювати:

$$\Delta \varphi = \frac{M}{G} = 10^{-3} \cdot \frac{P_o \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot m \cdot Z_k}{2 \cdot G}, \text{рад}, \quad (12)$$

де:  $G$ , Нм/рад - крутильна жорсткість стола верстата.

Елементарні похибки, викликані пружними деформаціями приведені в роботі до лінії зачеплення, тому сумарна похибка профіля зубців колеса, викликана цими чинниками рівна їх арифметичній сумі. На рис.11 показано

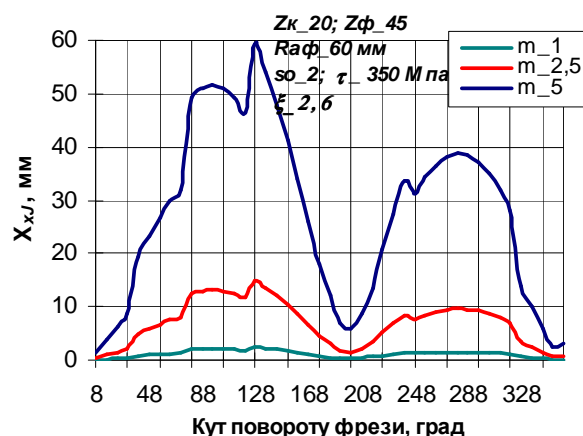


Рис.10. Пружні деформації дискової фрези в осьовому напрямку по куту повороту фрези

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



відхилення профілів внаслідок сумарних пружних деформацій технологічної системи верстата залежно від осьової подачі по куту повороту фрези для лівих і правих профілів.

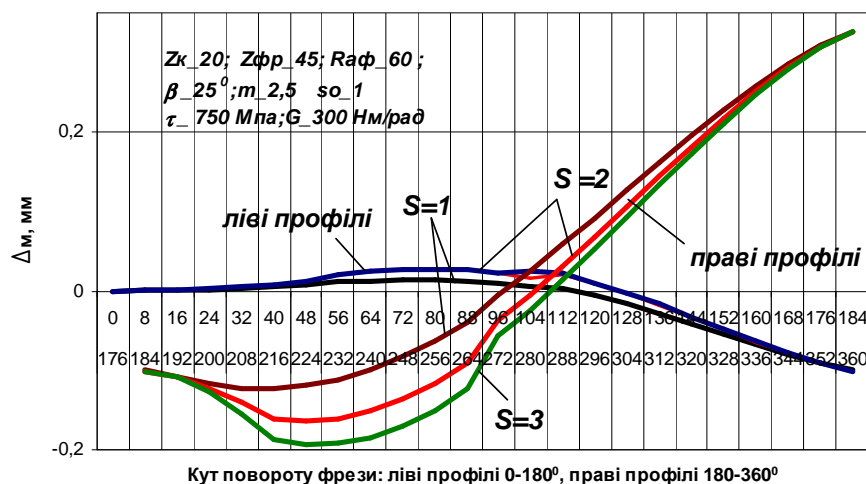


Рис.11. Відхилення профілів зубців внаслідок пружних деформацій по куту повороту фрези для лівих і правих профілів

Фактичні та номінальні профілі зубців, які утворюються в результаті деформації дискової фрези в напрямку її осі (а) і в радіальному напрямку (б) наведено на рис.12.

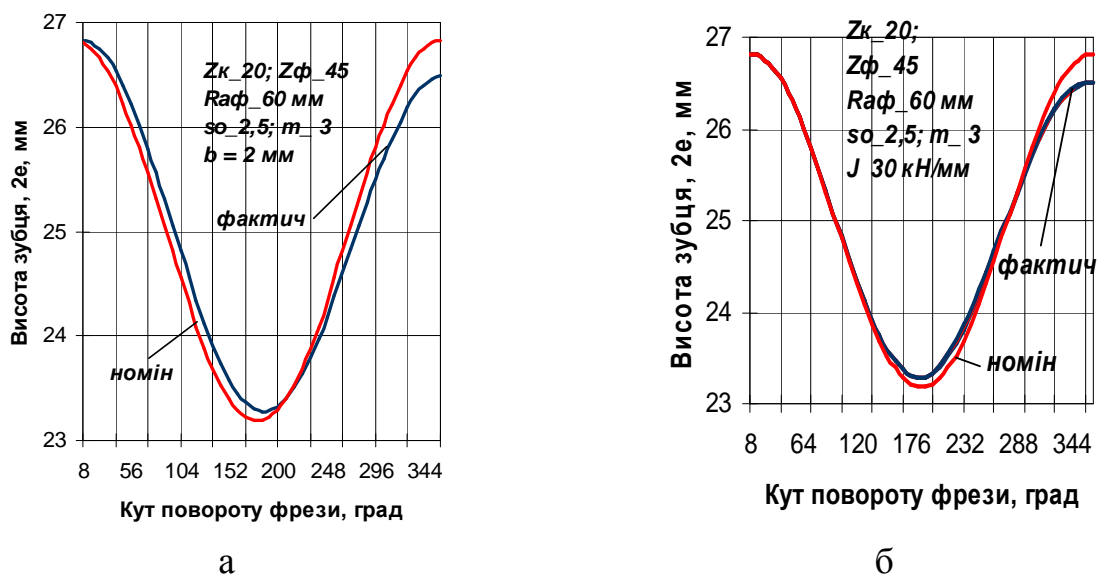


Рис.12. Відхилення профілів зубців в результаті деформації дискової фрези в напрямку її осі (а) і в радіальному напрямку (б)

У цьому розділі також описано формування мікронерівностей профілів зубців внаслідок переміщення інструменту ( $h_s$ ) за осьовою подачею, та дискретності різів при неперервному обточуванні ( $h_\phi$ ). Перша складова зумовлена зміною положення центра обертання фрези і миттєвого радіуса різання  $\rho_i$ ; друга - представлена функцією товщини зрізів вершинних лез та кута профілювання  $\psi$ . Сумарне відхилення профілів зубчастих коліс дорівнює:

$$h_\Sigma = h_s + h_\phi = \frac{s_o^2}{8 \cdot \rho_i} + a_{вер} \cdot \sin \psi. \quad (13)$$

На рис.13 наведено графіки сумарної висоти мікровідхилення профілів коліс модулів 1, 2 і 3 мм по куту пороту фрези (а) та фрагменти профілів зубців на зрізах під мікроскопом (кількість зубців колеса  $z_k = 30$ , фрези -  $z_{фр} = 45$ ; діаметр фрези  $R_{а фр} = 120$  мм; осьова подача  $s_o = 2$  мм/об.; ширина фрези  $b = 2$  мм).

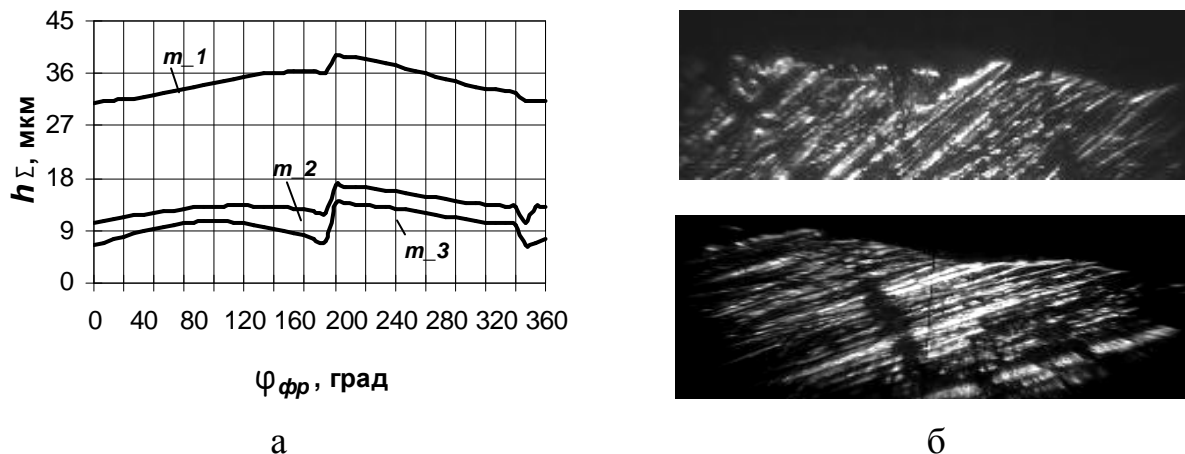


Рис.13. Сумарне відхилення максимальної висоти мікронерівностей профілів по куту повороту фрези для  $m = 1$  мм, 3 мм і 5 мм

У п'ятому розділі «Експериментальні дослідження процесу зубофрезерування РК-способом» наведено результати встановлення залежності осьової складової сили різання від чинників РК-способу зубонарізання та перевірки достовірності теоретичної моделі сили різання. На першому етапі тарувалися дискові фрези для встановлення залежності між осьовим пружним деформуванням фрези і сили, яка діє на фрезу в осьовому напрямку.

Експериментальні дослідження базувалися на методах повного факторного експерименту типу  $2^2$ , змінними чинниками вибрано модуль ( $m = 1$  мм - 3 мм) та кількість зубців фрези ( $Z_{фр} = 45 - 72$ ). На рис.14, а показано дискові фрези, які використовувалися в експерименті, а на рис.14, б – робочий простір верстата з двачем для вимірювання переміщення.

Формула бокової сили різання, отримана на основі експерименту:

$$P_x = 40,9 \cdot m^{2,04} \cdot Z_{фр}^{-1,07} \quad (14)$$



а

б

Рис.14. Комплект дискових фрез (а) та робочий простір верстата (б)

На рис. 15 наведені типові графіки осьових деформацій фрези, які підтверджують співпадіння теоретичних і експериментальних результатів.

Опрацювання результатів експериментальних досліджень за методикою ПФЕ показало відтворюваність дослідів за дисперсією



відтворюваності і значенням критерією Кохрена. Перевірку значимості знайдених коефіцієнтів функції відгуку виконано з допомогою критерія Студента, а адекватність моделі підтверджено за значенням дисперсії адекватності та критерієм Фішера.

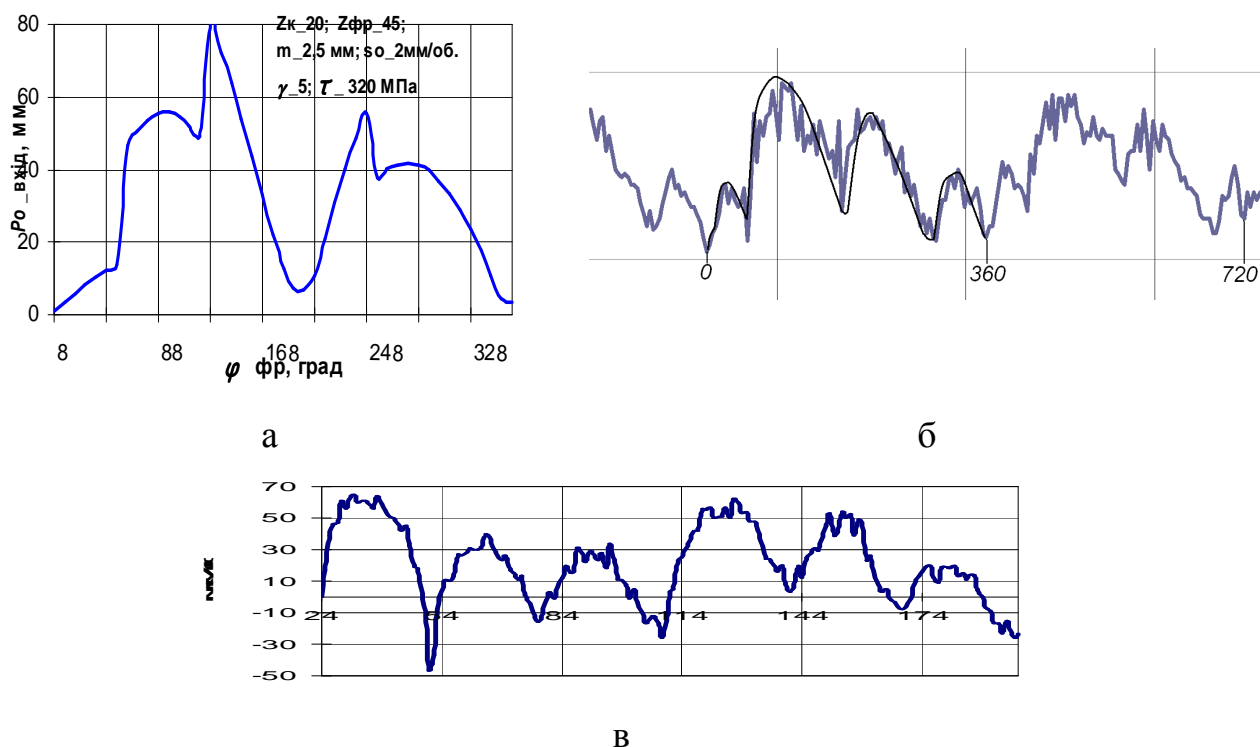


Рис. 15. Теоретичний графік зміни осьової складової сили різання та експериментальні графіки коливання і осьової сили (б, в)

**Шостий** розділ «Методика вибору параметрів процесу зубофрезерування з урахуванням пружних деформацій. Напрямки удосконалення радіально-колового способу» присвячено методиці практичного використання теоретичних положень для вибору і обґрунтування параметрів процесу зубофрезерування та удосконалення РК-способу. На підставі отриманих в роботі залежностей створено засади вирішення зворотної задачі технологічного проектування – розрахунку та обґрунтування значення конструктивних, технічних і технологічних параметрів технологічного процесу для забезпечення заданих технічних умов. Параметрами, якими можна регулювати є зовнішній діаметр фрези  $D_f$ ; кількість зубців фрези  $Z_f$ ; товщина фрези  $b$ ; радіальна жорсткість технологічної системи  $J_y$ ; крутильна жорсткість стола верстата  $G$ ; величина осьової подачі  $s_o$ .

Наприклад, за даними фірми СПР «Енерго» технологічний процес зубофрезерування характеризується такими параметрами: модуль прямозубого колеса 3 мм; кількість зубців колеса 36; матеріал заготовки – сталь 40Х, межа міцності на зсув 350 МПа, середній коефіцієнт осадження стружки  $\xi = 2,6$ ; кут зачеплення  $\alpha_\omega = 20^0$ ; різання на повну глибину профілю. Для забезпечення допуску відхилення профілю, що становить 15 мкм і величини параметра

шорсткості  $R_z = 12,5$  мкм необхідно встановити такі граничні значення параметрів системи: жорсткість верстата радіальна 30 кН/мм, крутильна стола 300 кН/град; зовнішній діаметр фрези  $D_\phi = 100$  мм, кількість зубців фрези 48; максимально допустима величина осьової подачі з умови точності: по лівих профілях  $s_o \leq 7,06$  мм/об.; по правих профілях  $s_o \leq 3,65$  мм/об.; з умов шорсткості  $s_o \leq 2,17$  мм/об./ раціональна величина подачі  $s_o = 2,15$  мм/об. будуть забезпечені задані технічні умови.

Для більш точних розрахунків при підвищенні вимог до якості обробки зубчастих коліс розроблено методику врахування більшої кількості чинників процесу з допомогою системи динамічного моделювання Simulink Matlab. Імітація на вході моделі пружної системи процесу різання (ПС ПР) сигналу, що описує товщину зрізів на бокових вхідних лезах на виході ПС ПР моделює осьову складову сили різання, яка у ПС верстата збуджує коливання фрези. Аналіз віброколивань, викликаних періодичною силою дає змогу визначити похибки, при цьому амплітуда коливань фрези з частотою, кратною кількості її зубців відповідає висоті мікронерівностей, а амплітуда, кратна оберту фрези визначає похибку профілю зубців нарізаного колеса. За отриманими відхиленнями можна зробити висновок про відповідність умов оброблення заданим значенням допусків на висоту мікронерівностей і похибку профілю, або про необхідність корегувати значення регульованих параметрів процесу.

У цьому розділі також окреслено напрямки удосконалення кінематики зубофрезерних верстатів для повного використання технологічних можливостей РК-способу. З цією метою розроблено варіанти компоувальних схем зубофрезерних верстатів, модернізація яких базується на зміні конструкції супорта і використанні керованих програмно приводів. Керування системою ЧПК швидкостями різання та осьового переміщення каретки з фрезой забезпечує нарізання зубчастих поверхонь будь-яких профілів, у т.ч. евольвентних та зачеплення Новикова, при цьому обертання стола з заготовкою може здійснюватися від окремого двигуна з однією постійною швидкістю.

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання 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 ( $100^{\circ}$ - $130^{\circ}$ ) та виходу фрези ( $240^{\circ}$ - $280^{\circ}$ ); 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **У виданні, яке включене до міжнародних наукометричних баз:**

1. Громнюк С.І. Розширення технологічних можливостей універсальних зубофрезерних універсальних верстатів введенням керованого приводу головного руху [Текст] / С.І. Громнюк // «Технологічний аудит та резерви виробництва». – Харків. - 2014. – №5/3(19). - С.23-27.

### **У науковому періодичному виданні іншої держави:**

2. Hrytsay I. Sine-type gearing transmission as the alternative to the conventional ones and the new method of their production / I.Hrytsay, Y.Lytvyniak, L.Bordyuk, S.Hromnyuk // Zeszyty Naukowe PWZS. - Sanok. - 2014. - P.53-63.

### **У наукових фахових виданнях України:**

3. Hromniuk S. The study of the cutting force and its components in radial-circular cutting of the gears [Текст] / S.Hromniuk, I.Hrytsaj // Оптимізація виробничих процесів і техн. контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. - Львів. Вид-во НУ «ЛП». - 2014. - № 786. - С.61-67.

4. Громнюк С.І. Моделювання складових сумарної похибки і точності зубчастих коліс в радіально-коловому способі зубонарізання / С.І. Громнюк, І.Є. Грицай // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Серія «Проблеми механічного приводу». – Харків, НТУ «ХПІ». - 2014. - № 31 (1074): – С.24-28.

5. Громнюк С.І. Дослідження мікронерівностей зубчастих поверхонь в радіально-коловому способі зубонарізання. [Текст] / С.І.Громнюк // Підйомно-транспортна техніка. – Одеса, ОНПУ. – 2014. - № 2 (42). – С.82-88.

6. 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 «ХПІ». - 2014. Вип. №9 – С.142-152.

7. Грицай І.Є. Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-обертового методу в умовах обкочування / І.Є. Грицай, С.І. Громнюк // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць Донбаської державної машинобудівної академії. - Краматорськ. - 2013. - Вип. 32. - С.226-229.

8. Грицай І.Є. Параметри поперечного перерізу зрізів в радіально-обкочувальному способі нарізання зубчастих коліс з осьовою подачею / І.Є.Грицай, С.І.Громнюк, А.М.Кук // Вісник НУ "Львівська політехніка" «Оптимізація виробничих процесів і техн. контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – Львів. Вид-во НУ «ЛПІ». - 2014. - № 772. - С.8-14.

9. Грицай І.Є. Технологічне забезпечення точності та безвідмовності процесу нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом з урахуванням дії динамічних чинників / І.Є. Грицай, С.І. Громнюк // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів. - 2015. - Вип. 49. - С. 91-97.

10. Громнюк С.І. Зміна кінематики зубофрезерного верстата для нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом / С.І. Громнюк, І.Є. Грицай // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Серія «Проблеми механічного приводу». – Харків, НТУ «ХПІ». - 2015. - № 34 (1143). – С.30-34.

#### **Праця у іншому науковому виданні:**

11 . 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.

#### **Патент України на корисну модель:**

12. Пат. 97520 Україна, МПК (2015/01) B23F 5/00. Спосіб нарізання зубчастих коліс / С.І. Громнюк, І.Є. Грицай. Заявл.23.06.2014. Опубл.25.03.2015, бюл.№6, 2015.

#### **Публікації в тезах науково-технічних конференцій та симпозіумів:**

13. Грицай І.Є. Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-обертового методу в умовах обкочування / І.Є. Грицай, С.І. Громнюк // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи

розвитку. Матеріали Х1 Міжнародної науково-технічної конференції. - Краматорськ, 04 - 06 червня 2013 р. – С. 44.

14. Грицай І.Є. Параметри поперечного перерізу зрізів в радіально-обкочувальному способі нарізання зубчастих коліс з осьовою подачею / І.Є.Грицай, А.М.Кук, С.І.Громнюк // Прогресивні технології в машинобудуванні. Збірник наукових праць III Всеукраїнської науково-технічної конференції. - Львів-Карпати, 10 – 15 лютого 2014 р. – С.22.

15. Громнюк С.І. Пружні деформації в радіально-коловому способі зубонарізання та їх вплив на точність зубчастих коліс / С.І.Громнюк, І.Є.Грицай // Прогресивні технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць IV Всеукраїнської науково-технічної конференції. - Львів-Карпати, 02 -06 лютого 2015 р. – С.38.

16. Громнюк С.І. Вплив динамічних чинників на якість зубчастих коліс в радіально-коловому способі зубонарізання / С.І.Громнюк, І.Є.Грицай // Тези доповідей Х11 Міжнародного симпозіуму інженерів-механіків у Львові. – Львів, 28 – 29 травня 2015 р. – С.82-83.

17. Громнюк С.І. Експериментальне дослідження силових параметрів в радіально-коловому способі зубонарізання / С.І.Громнюк // Тези доповідей V Всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні». – Львів- Карпати, 08 - 12 лютого 2016 р. – С.31-34.

## АНОТАЦІЯ

**Громнюк С.І. Технологічне забезпечення якості нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2016.

У дисертаційній роботі виконано теоретичні та експериментальні дослідження технологічного процесу нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом. Розроблено аналітичні залежності для комплексного математичного описання, моделювання та дослідження взаємозв'язаних параметрів, які характеризують зрізи дискової фрези, силу різання, пружні деформації технологічної системи, їх вплив на похибку зубчастих коліс, які нарізають та шорсткість поверхонь зубців.

Розроблено методика вибору та призначення раціональних конструктивних, технічних та технологічних параметрів, які забезпечують задану якість оброблення. Подано результати експериментальних досліджень для перевірки і підтвердження основних положень роботи. Сформульовано рекомендації для практичного використання теоретичних положень і модернізації зубофрезерних верстатів для досягнення максимальної ефективності радіально-колового способу зубонарізання.

**Ключові слова:** зубофрезерування, радіально-коловий спосіб, параметри зрізів, сила різання, пружні деформації, похибки обробки, якість зубців, модернізація верстата.

## АННОТАЦІЯ

**Громнюк С.И. Технологическое обеспечение качества нарезания зубчатых колес радиально-круговым способом.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 - технология машиностроения. – Национальный Университет «Львівська політехніка», Львов, 2016.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи – исследованию процесса нарезания цилиндрических зубчатых колес радиально-круговым способом для обоснования выбора и назначения рациональных условий его реализации. Получены аналитические зависимости для комплексного математического описания, моделирования и исследования взаимосвязанных параметров, характеризующих параметры поперечного сечения срезов дисковой фрезы, работающей в условиях непрерывного обкатывания, силу резания, упругие деформации технологической системы, их влияние на погрешность нарезаемых зубчатых колес и шероховатость поверхностей зубьев.

В работе получил развитие метод определения параметров срезов, в основу которого положена методика таких расчетов для червячной фрезы, адаптированная к кинематике РС-способа, позволяющая рассчитывать значения толщины, ширины и площади срезов на лезвиях и зубьях в любой точке поверхности резания, а также моделировать условия контакта в станочном зацеплении «инструмент-заготовка». На основе модели срезаемых слоев разработаны зависимости для описания и расчета силы резания и ее составляющих в функции от основных параметров зубофрезерования, изменяющихся по углу поворота инструмента в пределах одного оборота фрезы. Полная информация о параметрах срезаемых слоев позволила смоделировать силу резания и ее составляющие, рассчитываемые в любой точке рабочего пространства фрезы в функции от технологических и конструктивных параметров процесса зубофрезерования, а также определить влияние силовых параметров на упругие деформации, снижение точности и качества обработки зубчатых колес. Разработаны зависимости для расчета погрешности зубофрезерования и шероховатости нарезаемых зубьев, а также решена обратная задача технологического проектирования – обоснованного выбора и назначения основных параметров технологического процесса, обеспечивающих выполнение заданных технических условий, регламентирующих качество

нарезания зубьев. С использованием методов планирования эксперимента проведены исследования силы резания и получена эмпирическая зависимость осевой составляющей силы, оказывающей наибольшее влияние на деформацию фрезы и ее упругие колебания. Для измерения силы резания предложен и использован косвенный бесконтактный электроиндуктивный способ. Сформулированы рекомендации для практического использования теоретических положений и направления модернизации зубофрезерных станков для достижения максимальной эффективности радиально-кругового способа зубонарезания на основе применения средств мехатроники - управляемых системой ЧПУ приводов перемещения каретки с фрезой и главного движения резания.

**Ключевые слова:** зубофрезерование, радиально-круговой способ, параметры срезов, сила резания, упругие деформации, погрешности обработки, качество зубьев, модернизация станка.

## SUMMARY

**S.I. Hromniuk. Influence of technological parameters on the effectiveness of cutting out gearwheels by means of a radial ring method. – On the rights of manuscript.**

Thesis for granting of Degree of Candidate of Technical Science on a specialty 05.02.08 - Mechanical Engineering. - Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2016. The thesis includes theoretical and experimental studies of the technological process of cutting out gearwheels by means of the radial ring method. Analytical dependencies were developed for the complex mathematical description, modelling, and study of the interrelated parameters that characterize the cut of the side mill, strength of the cut, elastic deformation of the technological system and their influence on the bias of the cut gearwheels and the roughness of the gear surface.

The methodology for selection and assignment of efficient constructive as well as technical and technological parameters that ensure the determined processing quality were developed. The results of experimental studies that check and confirm the principal working provisions were provided. Recommendations were formulated for the practical application of the theoretical provisions and modernization of gear hobbing machines in order to achieve the maximum efficiency in the radial ring method of gear hobbing

**Keywords:** gear hobbing, radial ring method, cut parameters, cut strength, elastic deformation, processing bias, gear quality, machine modernization.



Підписано до друку 29.12.2016 р.  
Формат 60x84/16.  
Ум. друк. арк. 0,9  
Наклад 100. Зам. № 34

Друк ПП «Ощипок М.М.»  
Адреса: м. Львів, вул. С.Бандери, 45  
№ свід.: 670155  
тел./факс (032) 238-74-60  
e-mail: ommzmik@ukr.net