

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

АПАРАКІН АНТОН РУСЛАНОВИЧ



УДК 621.914.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЧИСТОВОГО ЧЕРВ'ЯЧНОГО
ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС
ЗА РАХУНОК ЗМІНИ СХЕМИ РІЗАННЯ**

Спеціальність 05.03.01 – Процеси механічної обробки,
верстати та інструменти

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Кропивницький – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Металорізальні верстати та системи» Центральноукраїнського національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Підгаєцький Михайло Матвійович,
Цentrальноукраїнський національний технічний університет,
доцент кафедри технології машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Охріменко Олександр Анатолійович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського»,
м. Київ,
професор кафедри конструювання машин

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Кривошея Анатолій Васильович,
Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
Національної академії наук України, м. Київ,
старший науковий співробітник відділу формування
прецизійних елементів складнопрофільних виробів

Захист відбудеться “09” квітня 2021 р. о 10⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради К23.073.02 у Центральноукраїнському національному технічному університеті за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Центральноукраїнського національного технічного університету за адресою: 25006, м. Кропивницький, пр. Університетський, 8.

Автореферат розісланий “02” березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.К. Дідик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Традиційне черв'ячне зубофрезерування має обмежені резерви підвищення ефективності, які визначаються межами швидкостей різання і подач, зносостійкістю інструмента та якістю обробки. Подальше підвищення ефективності обробки можливе за рахунок зміни кінематики різання та використання нових, раціональних схем різання з кінематичним перерозподілом зрізів.

Велика кількість відомих досліджень традиційного черв'ячного зубофрезерування стосується процесів зносу, в тому числі підвищенню стійкості фрези за рахунок надтвердих покриттів, та вивчення ефекту від використання порошкових інструментальних матеріалів. Останніми тенденціями у дослідженнях є використання комп'ютерного моделювання для вивчення вузькоспеціальних аспектів методу. Всі вищезгадані дослідження мають за мету вдосконалення або нейтралізацію недоліків вже існуючої схеми традиційного черв'ячного зубофрезерування. Відсутні спроби кардинально змінити схему різання – геометрію взаємодії різальної кромки (РК) інструменту та оброблюваної поверхні (ОП).

За останні 60 років технологія формоутворення евольвентних поверхонь, тобто сам процес різання, мало змінилася. Прогрес в цій галузі торкнувся здебільшого матеріалів різальної частини, конструктивного виконання фрез та верстатів, за рахунок системи ЧПУ та прямого приводу.

Відомі методи черв'ячного зубофрезерування є досить енергоємними і витратними, що обумовлено наявністю значних сил різання, і не відповідають вимогам, які пред'являються до енергозберігаючих технологій. У роботі зроблена спроба створення технології зубофрезерування для умов гнучкого виробництва на принципово інших положеннях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувались згідно держбюджетної науково-дослідної програми Центральноукраїнського національного технічного університету за темою "Теоретичне та експериментальне дослідження черв'ячно-контурного зубофрезерування зубців шестерень гідравлічних машин" (номер державної реєстрації №0116U001974).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем середніх модулів 5...14 мм та створення передумов для виникнення технології зубофрезерування для умов гнучкого виробництва.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Визначити схему взаємодії РК інструменту та ОП при формоутворенні евольвентного профілю, яка позбавлена недоліків схеми традиційного черв'ячного зубофрезерування, та дослідити вплив її на точність і якість ОП.

2. Синтезувати процес черв'ячно-контурного зубофрезерування на основі зміни взаємодії РК інструменту та ОП з подальшим дослідженням впливу зміни взаємодії на оціночні показники процесу.

3. Розробити методикау та провести порівняльний аналіз формоутворення та енергоємності процесів зубофрезерування в умовах комп'ютерного моделювання.

4. Провести експериментальні дослідження досяжної точності та якості обробленої поверхні, отриманої способом черв'ячно-контурного зубофрезерування.

5. Розробити концепцію технології зубообробки для умов гнучкого виробництва на базі синтезованого способу черв'ячно-контурного зубофрезерування та верстату типу обробний центр.

Об'єктом дослідження є черв'ячні фрези для чистового зубофрезерування.

Предметом дослідження є процес формоутворення та вплив його характеристик на енергоємність процесу зубофрезерування, в залежності від прийнятої схеми різання (взаємодії РК інструменту та ОП).

Методи дослідження. При проведенні досліджень використовувалися методи абстрагування, аналіз і синтез, властивості системи взаємодії РК та ОП досліджуються завдяки побудованим моделям, та в умовах комп'ютерного моделювання, експериментальні дослідження проведені з використанням виготовленого прототипу черв'ячно-контурної фрези, керуючись математичним плануванням експерименту. Всі дослідження ґрунтувались на положеннях теорії різання металів, теорії опору матеріалів, теорії проектування різального інструменту, верстатобудування, теорії автоматичного управління процесів.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше синтезовано принцип чистового черв'ячного зубофрезерування евольвентних поверхонь в якому, при постійному значенні кінематичної колової подачі, площі перерізів зрізів рівні між собою вздовж верстатної лінії зачеплення як по лівим, так і по правим профілям, а умови формоутворення подібні.

2. Вперше створено процес чистового черв'ячного зубофрезерування евольвентних поверхонь, при якому поверхня різання не співпадає з обумовленою евольвентною поверхнею, а розташована до неї під кутом, рівним, або близьким до 90° .

3. Вперше створено метод моделювання чистового черв'ячного зубофрезерування, при якому реалізовані можливості дослідження взаємодії РК з поверхнями різання (ПР), у тому числі і з ОП, при умовах як їх співпадіння так і неспівпадіння.

4. Взаємодія РК і ОП була досліджена як одномасова коливальна консервативна система, що дозволило підвищити її порядок рівню астатизму за рахунок зміни характеру (геометрії) взаємодії, що адекватно введенню в систему інтегруючої ланки.

Практична цінність одержаних результатів.

1. Розроблена методика графоаналітичного визначення налагоджувальних розмірів інструментального блоку для попереднього прорізання западин з метою забезпечення раціональної схеми припуску для чистового зубофрезерування.

2. Запропонована конструкція збірної черв'ячної фрези, яка розроблена з метою економії інструментального матеріалу та зниження собівартості інструменту.

3. Створено комп'ютерні моделі кінематики методів чистового черв'ячного зубофрезерування для визначення геометричних форм одиничних різів та закономірності їх розподілення під час обробки.

4. Запропонована технологія, яка має перспективи у виробництві шестерень гідравлічних машин, що працюють в режимі реверсивних гідромоторів і повинні мати однакоvu геометричну форму різнойменних профілів. Технологію передано для впровадження у виробництво та апробовано на АТ «Гідросила», м. Кропивницький.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні, практичні та експериментальні результати досліджень що містяться у дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто.

У роботах, опублікованих у співавторстві, автору дисертації належать ряд наукових результатів та положень, зокрема: [1] - проведено аналіз виникнення складного напруженого стану на оброблених евольвентних поверхнях, розробка програми та методики експерименту, проведення експерименту, обробка та аналіз результатів експерименту. [2] - проаналізовано схему впливу сили різання, що діє на привод верстата при обробці способом черв'ячно-контурного зубофрезерування, зроблено висновки про стан силового замикання черв'ячної пари привода шпінделя виробу верстата. [3] - розробка методики та проведення дослідження в умовах графічного комп'ютерного моделювання, обробка та аналіз результатів дослідження.

Апробація роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на III Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій" (м. Тернопіль, 19-20 листопада 2014 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем" (м. Чернігів, 24-27 квітня 2017 р.); XVII Міжнародній науково-практичній конференції "Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво" (м. Чернігів, 01-03 листопада 2017 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем" (м. Чернігів, 29-30 квітня 2020 р.); науково-технічних конференціях викладачів, аспірантів та співробітників Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький, 2014 – 2020 рр.).

Публікація за матеріалами дисертації. За темою дисертації опубліковано 11 праць, з них 3 друковані праці у фахових наукових виданнях України, матеріали 4-х доповідей на наукових конференціях та 4 патенти.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 140 найменувань на 14 сторінках та 15 додатків на 60 сторінках. Основний текст дисертації викладений на 150 сторінках (не включаючи 25 сторінок таблиць та рисунків, які повністю займають площу сторінки), повний обсяг дисертації становить 262 сторінки, включаючи 99 рисунків та 38 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформовано мету і задачі досліджень, визначено предмет та об'єкт досліджень, приведено наукову новизну та практичну цінність одержаних результатів. Наведено інформацію про апробацію результатів роботи, її структуру та обсяг.

У **першому розділі** наведено аналіз та класифікацію традиційних конструкцій черв'ячних фрез. Сучасні традиційні черв'ячні фрези мають відносно одноманітну конструкцію, яка відповідає їх функційному призначенню, а саме – обробці зубчастих коліс в умовах обкату на зубофрезерних верстатах.

З метою визначення шляхів покращення процесу зубофрезерування розглядається нинішній стан традиційної технології черв'ячного зубофрезерування.

Проведено огляд та аналіз джерел наукової літератури, серед яких роботи Овумяна Г.Г., Адама Я.І., Моїсеєнко О.І., Тайца Б.А., Сидоренка А.К., Цвіса Ю.В., Медведіцкова С.М., Павлова Л.Є., Родіна П.Р., Романова В.Ф., Гриця І.Є., Гуліди Е.Н., Бушуєва В.В., К. D. Bouzakis, а також періодичних публікацій і каталогів провідних фірм-виробників Fette (Німеччина), Gleason (США), Sandvik Coromant (Швеція), та інших. На основі аналізу визначено, що черв'ячна фреза це єдиний інструмент, що містить в собі елементи кінематичної пари які ув'язані з елементами різального інструменту. Відомі літературні джерела характеризують процес черв'ячного зубофрезерування як дуже енергоємний процес, зі складними умовами різання та стружкоутворення, що виконується дорогим інструментом зі складною геометрією. В свою чергу все це впливає на точність обробки та ресурс зубообробного обладнання.

На основі проведеного аналізу зроблено такі висновки:

- сучасні традиційні фрези представлені різноманітними конструкціями суцільних і збірних фрез, збірні конструкції черв'ячних фрез є не досконалими з огляду на низьку жорсткість та точність виготовлення;
- черв'ячні фрези мають складну геометрію різальної частини з низьким значенням задніх кутів по бічним кромкам та подвійним затилуванням, які є джерелом негативного впливу на експлуатаційні якості фрез;
- використання раціональних схем різання призводить до ускладнення і без того складної геометрії черв'ячних фрез з нерівноцінним отримуваним ефектом;
- внаслідок складної геометрії різальної частини та кінематики процесу різання, черв'ячному зубофрезеруванню властивий цілий ряд похибок, який безпосередньо переноситься на оброблену поверхню;
- форма зрізів при черв'ячному зубофрезеруванні різна для кожного окремого зубця фрези, та розподіляється по трьом РК, викликаючи при цьому зустрічні потоки стружок та утворення стружок складної коробчастої форми;
- внаслідок складних умов стружкоутворення, зубець черв'ячної фрези зазнає зносу складної форми, механізм та фактори виникнення якого відомі і досліджені;
- встановлено, що сила різання, яка виникає під час черв'ячного зубофрезерування, залежить від перетинів зрізів які знімаються, вплив швидкості різання і подачі незначний;
- виробники сучасного зубофрезерного обладнання прагнуть створювати уніфіковані модулі без механічних ділільних ланцюгів та з прямим приводом, наявні спроби покращення динамічних характеристик інструментального шпінделя.

На підставі описаних у розділі проблем черв'ячного зубофрезерування виникає протиріччя між значним прогресом у створенні верстатних систем (з розвитком сервоприводів та систем ЧПУ) та, незважаючи на численні дослідження у даній галузі, зовсім незначним прогресом в удосконаленні самого процесу зубофрезерування з точки зору зниження його енергоємності, підвищення ресурсу верстатів та інструментів та забезпечення точності обробки.

У другому розділі представлено програму та методику теоретичних та експериментальних досліджень. Програма теоретичних досліджень вміщує

дослідження взаємодії РК та ОП в умовах моделювання процесу для методів традиційного черв'ячного та черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Методика теоретичних досліджень вміщує ряд припущень, які дають можливість достовірно визначити вихідні параметри процесів на основі варіювання вхідними, зокрема:

- загальні припущення, які прийняті для аналізу енергоємності процесів;
- загальні припущення, які прийняті для аналізу процесу формоутворення на базі комп'ютерної моделі.

Загальна методика теоретичних досліджень вміщує ряд складових методик дослідження традиційного черв'ячного та черв'ячно-контурного зубофрезерування, зокрема методику визначення питомої енергоємності на базі осцилограмних епюр виникаючих сил різання та крутних моментів на приводах верстата (рис. 1).

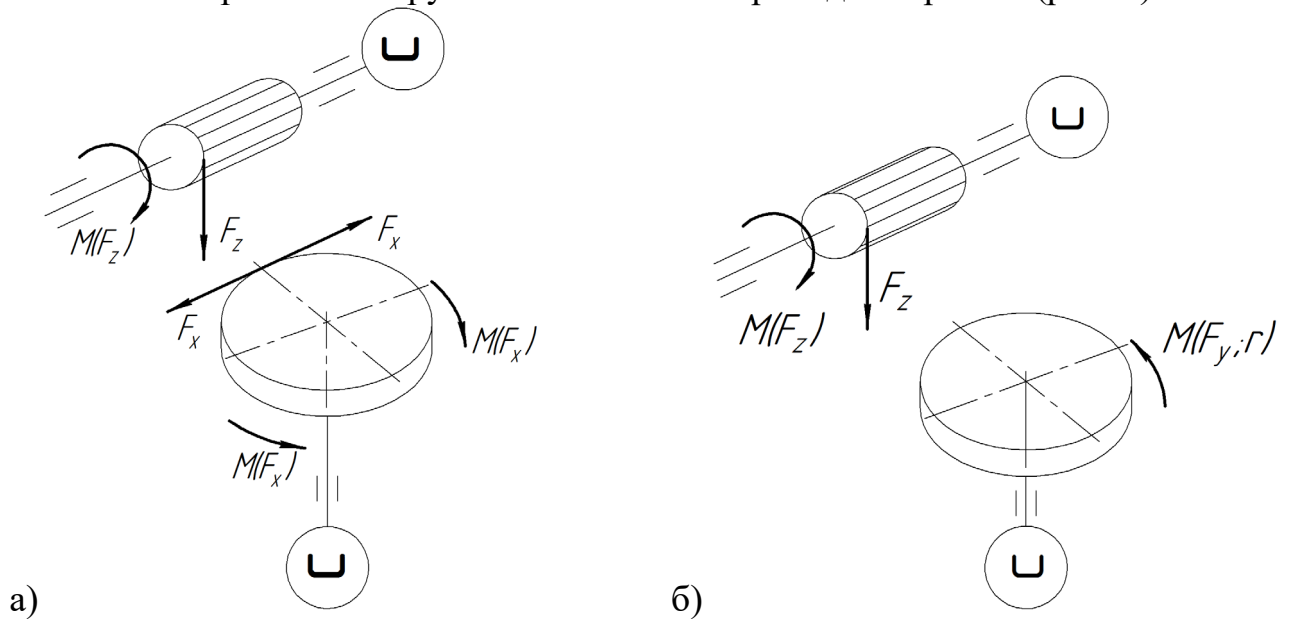


Рис. 1 Схема утворення моментів сил різання при традиційному чистовому черв'ячному (а) та черв'ячно-контурному зубофрезеруванні (б); $F_{x, y, z}$ – складові сили різання; $M(F_{x, y, z})$ – моменти сил різання.

Для порівняння енерговитрат в процесах традиційного черв'ячного та черв'ячно-контурного зубофрезерування, введено поняття відносного модуля енергозатрат $|E|$:

$$|E| = \int_{\varphi=0}^{\varphi=\max} \sum |F| d\varphi, \quad (1)$$

де: $|F|$ – відносний модуль сили різання; φ – кут повороту на один крок зубчастого колеса.

Також, наведена методика експериментальних досліджень в умовах моделювання процесів. Експериментальне моделювання повинно відтворити властивості процесів традиційного черв'ячного зубофрезерування (рис. 2, а) та черв'ячно-контурного зубофрезерування (рис. 2, б).

В третьому розділі наведені теоретичні дослідження процесів традиційного черв'ячного та черв'ячного-контурного зубофрезерування. Визначена принципова різниця між процесами.

Евольвентна поверхня може бути утворена принципово різними методами: методом дотичних або методом нормалей. Кожний з методів має свої переваги і недоліки, які необхідно дослідити. На рис. 3 наведені схеми утворення дотичних та нормалей.

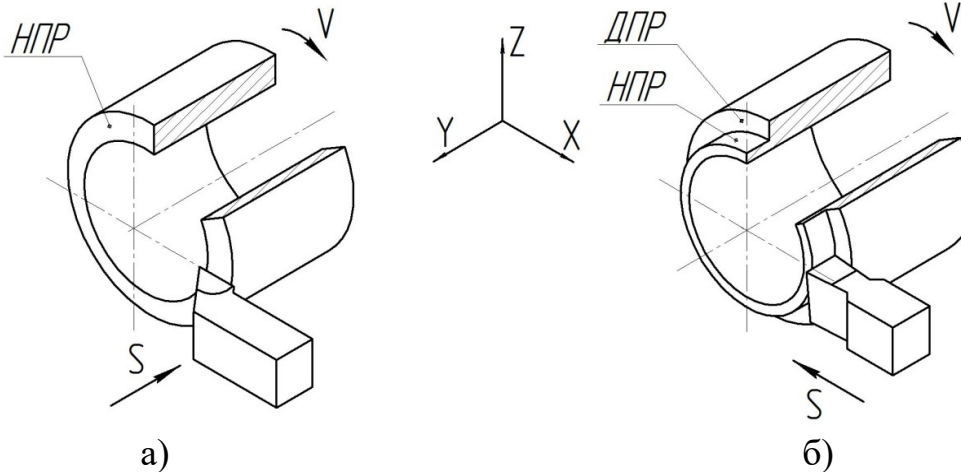


Рис. 2 Схеми обробки експериментального зразка при дотичній (а) та нормальній (б) ГРК різця до оброблюваної поверхні.

V – головний рух різання; S – подача; НПР – нормальна поверхня різання; ДПР – дотична поверхня різання.

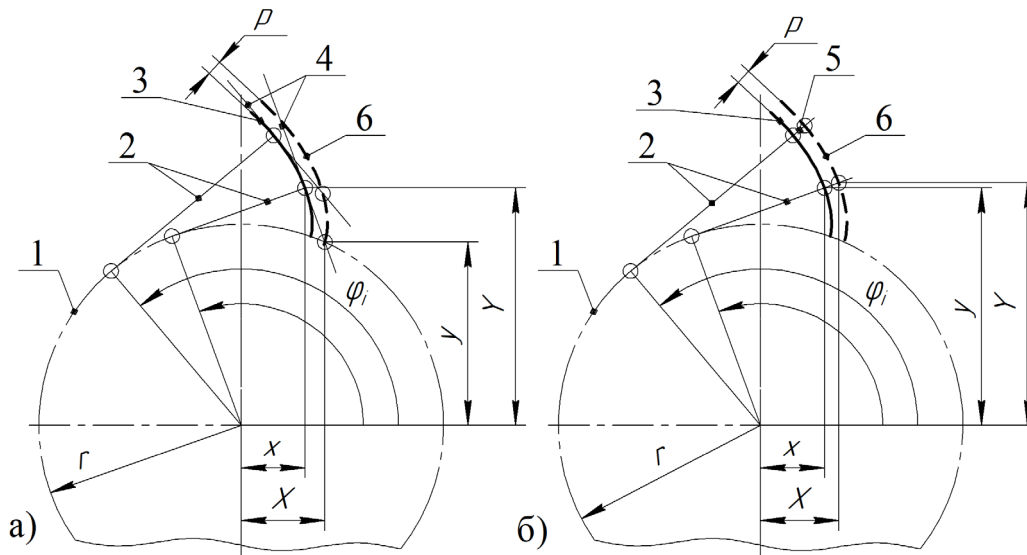


Рис. 3 Схема утворення евольвентного профілю методом дотичних (а) та нормалей (б); 1 – основне коло; 2 – нормалі до евольвентного контуру; 3 – теоретична евольвента; 4 – дотичні до теоретичного контуру, які формують ОП, що співпадає з ПР; 5 – нормалі до теоретичного контуру, які формують ПР; 6 – контур до обробки; X, Y – координати точок, які лежать на продовженнях дотичних до основного кола; x, y – координати точок евольвенти; r – радіус основного кола; ρ – припуск на обробку.

Визначення дотичних та нормалей здійснюється шляхом диференціювання рівняння евольвенти в параметричній формі. Після диференціювання отримуємо:

- рівняння дотичної до евольвенти:

$$\frac{y - (r \cdot \sin \varphi - r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi)}{r \cdot \cos \varphi + r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi} - \frac{x - (r \cdot \cos \varphi + r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi)}{-r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi} = 0, \quad (2)$$

- рівняння нормалі до евольвенти:

$$(-r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi) \cdot (X - r \cdot \cos \varphi - r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi) + (r \cdot \cos \varphi + r \cdot \varphi \cdot \sin \varphi) \cdot (Y - r \cdot \sin \varphi + r \cdot \varphi \cdot \cos \varphi) = 0, \quad (3)$$

де X, Y – поточні координати точки дотичних чи нормалей, які визначають розміри ПР.

Традиційне черв'ячне зубофрезерування реалізується в умовах профільної взаємодії РК та ОП, коли РК дотична до ОП (рис. 4, а).

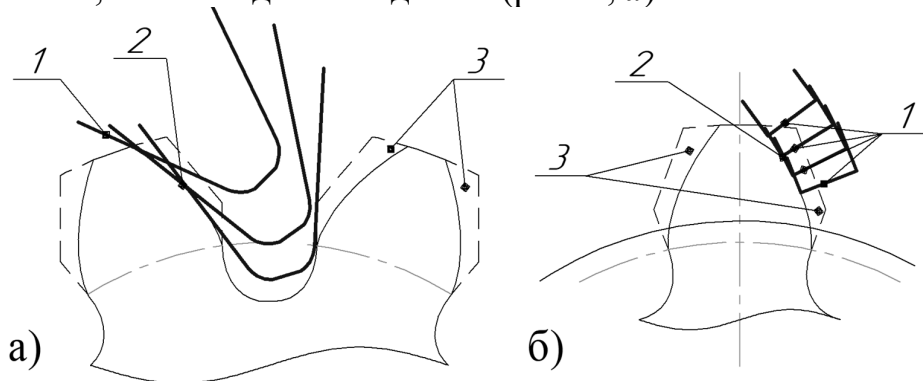


Рис. 4 Можлива взаємодія РК інструменту та ОП для випадків, коли РК інструмента дотична (а) до ОП та розташована по нормалі (б);

1 – різальна кромка інструменту; 2 – оброблюваний евольвентний профіль;
3 – припуск на обробку.

Схема розміщення векторів відносних переміщень при обробці різнойменних профілів (рис. 5), відображає різні умови взаємодії, тобто:

- правий профіль – зустрічна схема різання;
- лівий профіль – попутна схема різання.

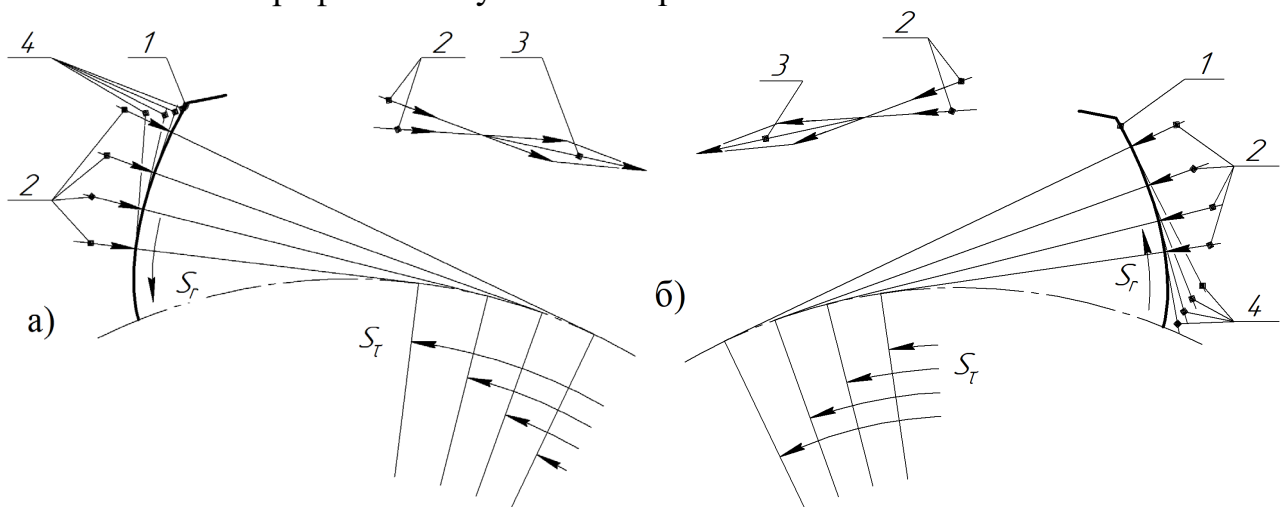


Рис. 5 Схема взаємодії дотичної РК та оброблюваного евольвентного профілю лівого (а) та правого (б)

1 – оброблюваний профіль; 2 – вектори переміщення РК; 3 – рівнодіюча векторів переміщення РК; 4 – послідовні положення РК; S_t – вектор тангенціального переміщення ОП; S_r – вектор радіального переміщення ОП.

Черв'ячно-контурне зубофрезерування передбачає розміщення РК по нормалі до ОП (рис. 4, б.). Схема розміщення векторів відносних переміщень (рис. 6), відображає адекватні умови взаємодії на різнійменних профілях. В обох випадках має місце зустрічна схема різання.

Відповідно до способів зубофрезерування визначені поверхні різання, тобто:

- ДПР – дотична поверхня різання, яка взаємодіє з дотичною РК;
- НПР – нормальна поверхня різання, яка взаємодіє з нормальною РК.

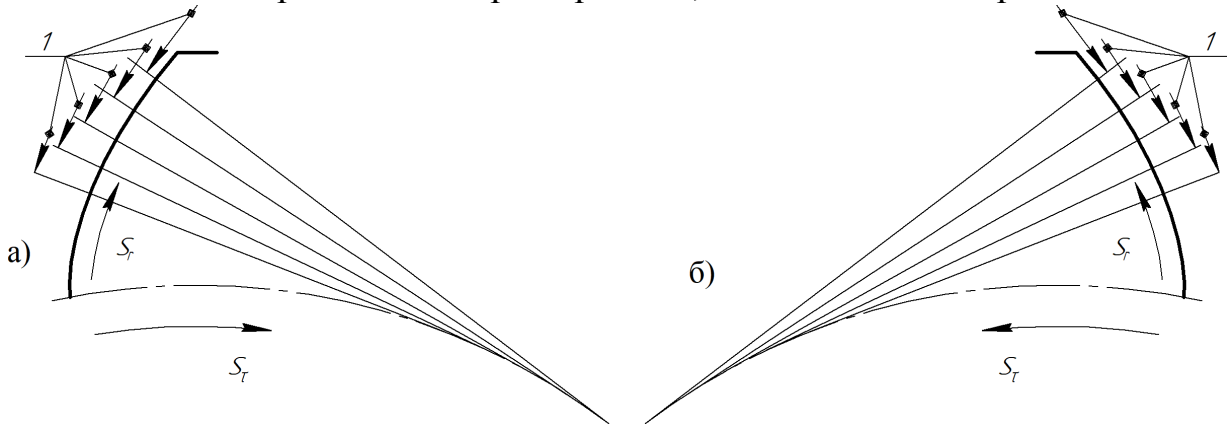


Рис. 6 Схема взаємодії нормально розміщеної РК та оброблюваного евольвентного профіля (а) лівого та (б) правого
1 – вектори переміщення різальної кромки.

Теоретично визначені значення напружень, які виникають в поверхневому шарі ОП та їх вплив на геометрію профілю при термічній обробці.

Наведені схеми обробки в умовах моделювання та аналіз їх впливу на виникнення геометричних похибок (рис. 7) та мікрорельєфу (рис. 8).

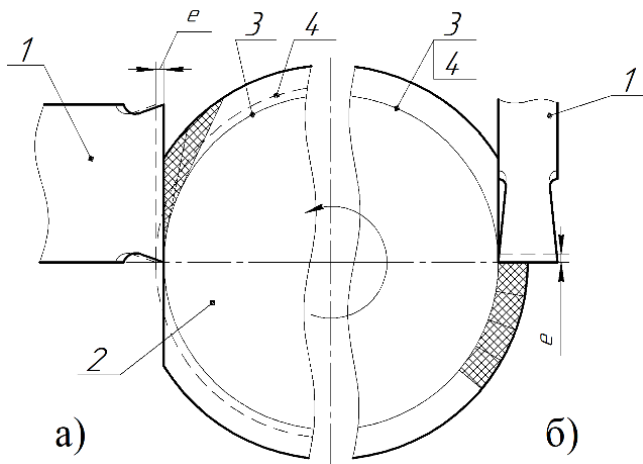


Рис. 7 Схема утворення похибки ОП при моделюванні традиційного черв'ячного (а) та черв'ячно-контурного зубофрезерування (б)

1 – різальний інструмент;

2 – заготовка; 3 – теоретичний профіль деталі;

4 – реальний профіль деталі;

e – зміщення інструменту, що імітує встановлену з ексцентриситетом фрезу.

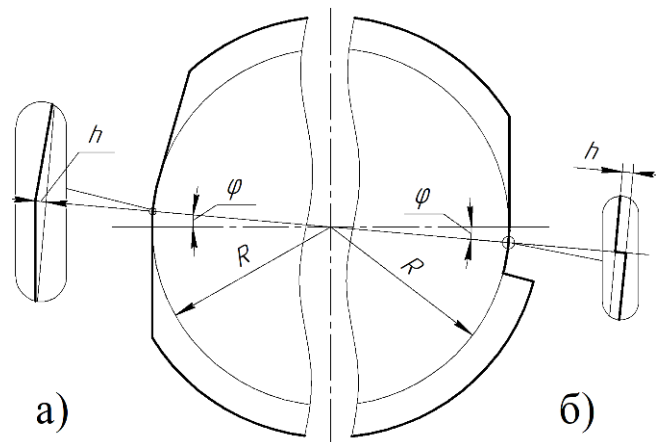


Рис. 8 Характер залишкових гребінців для моделі традиційного черв'ячного (а) та черв'ячно-контурного зубофрезерування (б)

R – радіус оброблюваної деталі;

h – висота залишкових гребінців;

φ – кут повороту столу верстату з оброблюваною заготовкою.

Відхилення профілю від номінального для моделі традиційного черв'ячного зубофрезерування розраховується за формулою:

$$h_{\text{тч}} = \frac{R}{\cos \frac{\varphi}{2}} - R, \text{ мм} \quad (4)$$

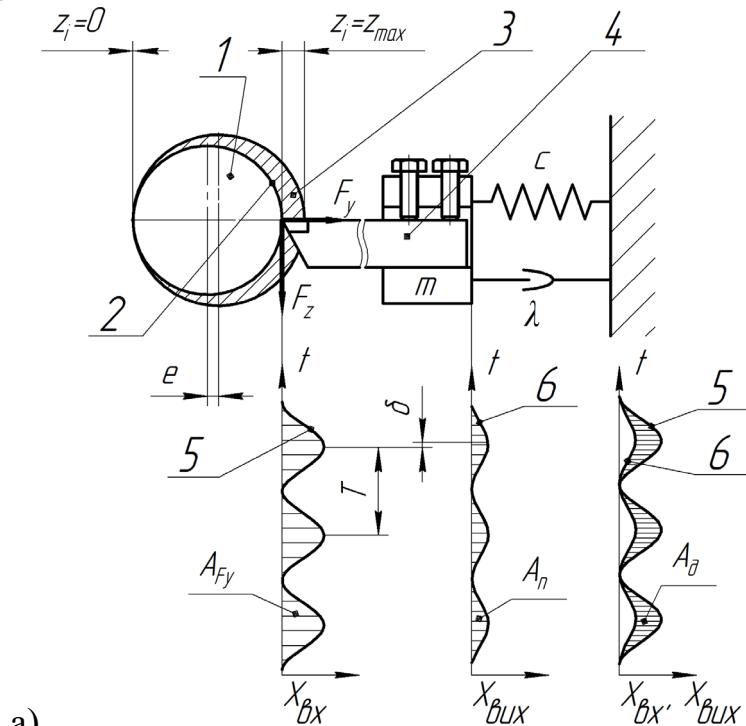
Відхилення профілю від номінального для моделі черв'ячно-контурного зубофрезерування розраховується за формулою:

$$h_{\text{нр}} = \frac{R}{\cos \varphi} - R, \text{ мм} \quad (5)$$

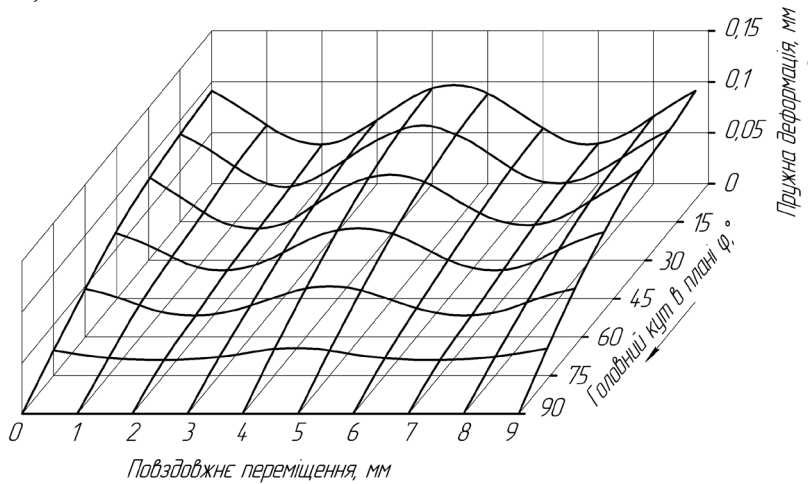
Як видно з формул (4) та (5), при черв'ячному зубофрезеруванні вплив на точність профілю величини кругової подачі (кута повороту столу верстату з оброблюваною заготовкою) зменшується в два рази.

Це створює передумови для прогнозування однакової величини залишкових гребінців, для обох методів, за умови зменшення колової подачі вдвічі для черв'ячно-контурного зубофрезерування.

Теоретичне визначення рівня сталості процесів різання в умовах ДПР та НПР проводилось на основі комп'ютерної моделі процесів (рис 9) згідно з методикою проф. Петракова Ю. В.



а)



б)

Рис. 9 Динамічна модель процесу (а) та результати (б) комп'ютерного моделювання

1 – заготовка з ексцентриситетом; 2 – ОП; 3 – ПР; 4 – система ВПД; 5 – графік коливань, викликаних перемінним припуском z_i ; 6 – графік пружних деформацій системи ВПД.

c – коефіцієнт пружності системи; λ – коефіцієнт демпфування; F_z, F_y – сили різання; z_i – припуск на обробку; T – частота коливань; δ – величина запізнення коливань; A_{Fy} – робота сили різання; A_n – робота пружних переміщень системи ВПД; A_δ – робота системи, направлена на демпфування коливань; X_{vx}, X_{vux} – величина вхідних та вихідних коливань; t – час.

Здійснено кінематичний синтез та реалізацію схеми черв'ячно-контурного зубофрезерування на базі контурної взаємодії РК та ОП. Хоча черв'ячно-контурне зубофрезерування подібне традиційному черв'ячному зубофрезеруванню, воно вміщує в своїй суті значні відмінності.

Черв'ячно-контурне зубофрезерування – спосіб чистового зубофрезерування при якому РК зубця інструмента розміщена по нормалі до оброблюваної евольвентної поверхні та є продовженням радіусів кривизни останньої так, що її початкова точка описує при русі формоутворення обумовлений номінальний евольвентний профіль зубця, а поверхня різання не співпадає з оброблюваною поверхнею (рис. 10). При цьому інструмент працює єдиною РК, яка розміщена на

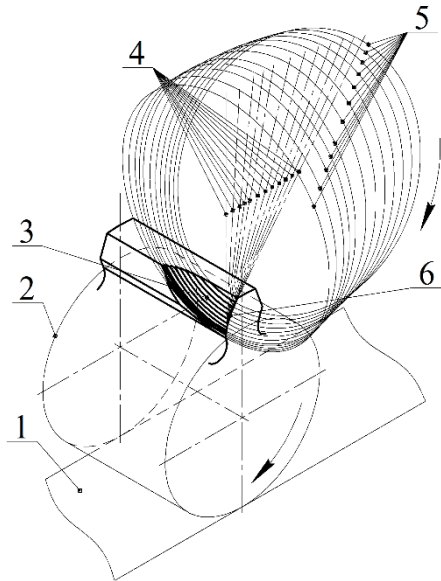


Рис. 10 Утворення евольвентного профілю при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні, схема руху точки РК, яка описує оброблювану евольвентну поверхню
1 – дотична до основного циліндра площина; 2 – основний циліндр оброблюваного зубчастого колеса;
3 – ОП; 4 – множина осей, які утворюють площину діаметрального перерізу;
5 – множина окружностей, які повторюють траєкторію руху початкової точки формоутворюючої РК інструменту;
6 – номінальний евольвентний профіль зубця.

інструментального шпінделя верстата розташовується під кутом θ до повздовжньої осі оброблюваного зуба, що визначається виразом:

$$\theta = 90^\circ - \omega \quad (8)$$

де ω - кут нахилу гвинтової лінії фрези, град.

Черв'ячно-контурне зубофрезерування застосовується лише як метод чистової обробки евольвентних профілів зубців зі сформованою впадиною.

гвинтовій лінії з кроком, який дорівнює кроку оброблюваного колеса, по дузі основного кола, та визначається по формулі:

$$P = \pi \cdot m \cdot \cos \alpha \quad (6)$$

де m – модуль оброблюваного колеса;

α – кут зачеплення.

Кінематично, процес нарізання зубців при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні слід розглядати як зачеплення черв'яка і черв'ячного колеса. Обертальний рух черв'ячно-контурної фрези та оброблюваного колеса пов'язані між собою та визначаються відношенням числа заходів фрези до числа зубців оброблюваного колеса. За один оберт однозаходної черв'ячної фрези оброблюване колесо повинне повернутись на один зубець:

$$i = \frac{k}{z} \quad (7)$$

де k – число заходів черв'ячно-контурної фрези;

z – число зубців оброблюваного колеса.

При обробці черв'ячно-контурними фрезами, вісь

Обробка зубчатих коліс ведеться комплектом черв'ячно-контурних фрез, що складається з двох штук (при цьому передні грані обумовлених фрез розташовані опозитно одна до одної). Обробка ведеться за два проходи.

На першому проході з повздовжнім переміщенням, наприклад, вниз, працює одна з комплекту черв'ячно-контурних фрез, при цьому обробляються праві чи ліві профілі на всіх зубцях, як показано на рис. 11.

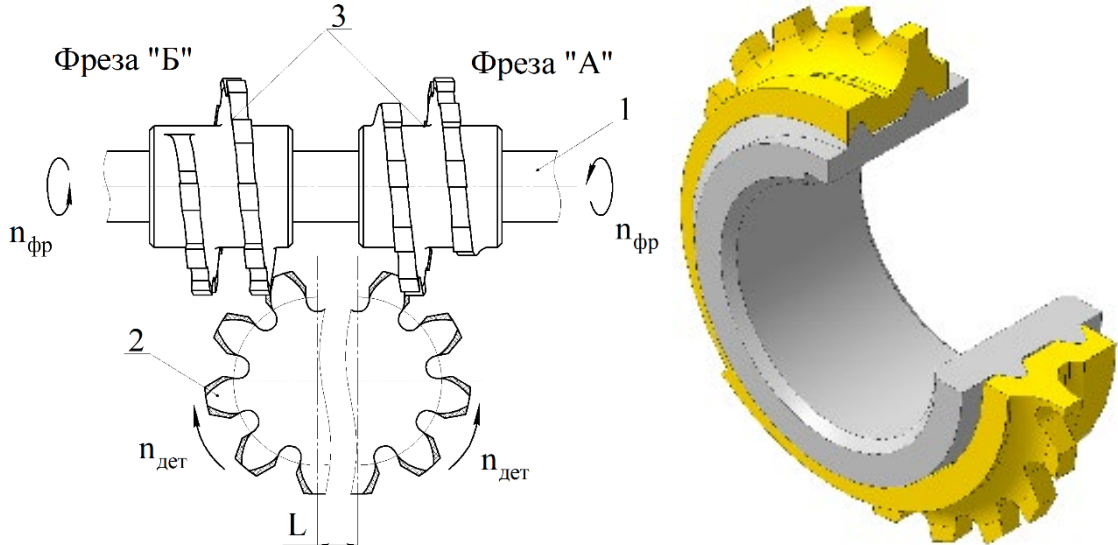


Рис. 11 Робочі рухи та переміщення при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні

1 – оправка; 2 – заготовка; 3 – комплект черв'ячно-контурних фрез; $n_{фр}$ – обертання фрези; $n_{дет}$ – обертання деталі; L – переміщення заготовки на другу позицію.

Після закінчення проходу «зверху вниз» відбувається переміщення інструментального шпінделя на другу позицію, на довжину L , і в роботу вступає друга фреза, яка здійснює обробку опозитного профілю, при ході фрезерного супорта «знизу вгору». Напрямок обертання деталі при обробці опозитних профілів протилежний напрямку обертання при першому переході, аналогічно для фрези.

Здійснення запропонованого методу обробки можливе на існуючих зубофрезерних верстатах з ЧПУ.

Теоретичне дослідження енергоємності процесів традиційного черв'ячного (рис. 12, а) та черв'ячно-контурного (рис. 12, б) зубофрезерування виконано на основі визначення геометричної форми одиничних зрізів по методиці G. Sulzer з Аахенського технічного університету (Німеччина).

Відносні значення енергоємності процесів, по модулю енергоємності:

- для традиційного черв'ячного зубофрезерування:
 - інструментальний шпіндель: $|E(M_z)| = 17,25$;
 - шпіндель виробу: $|E(M_x)| = 1,12$;
- для черв'ячно-контурного зубофрезерування:
 - інструментальний шпіндель: $|E(M_z)| = 6,92$;
 - шпіндель виробу: $|E(M_y)| = 0,251$.

Як видно, використання черв'ячно-контурного зубофрезерування характеризується зниженням відносного модуля енергозатрат по інструментальному шпінделю в 2,5 рази, а по шпінделю виробу - у 4,5 рази, у порівнянні з традиційним черв'ячним зубофрезеруванням.

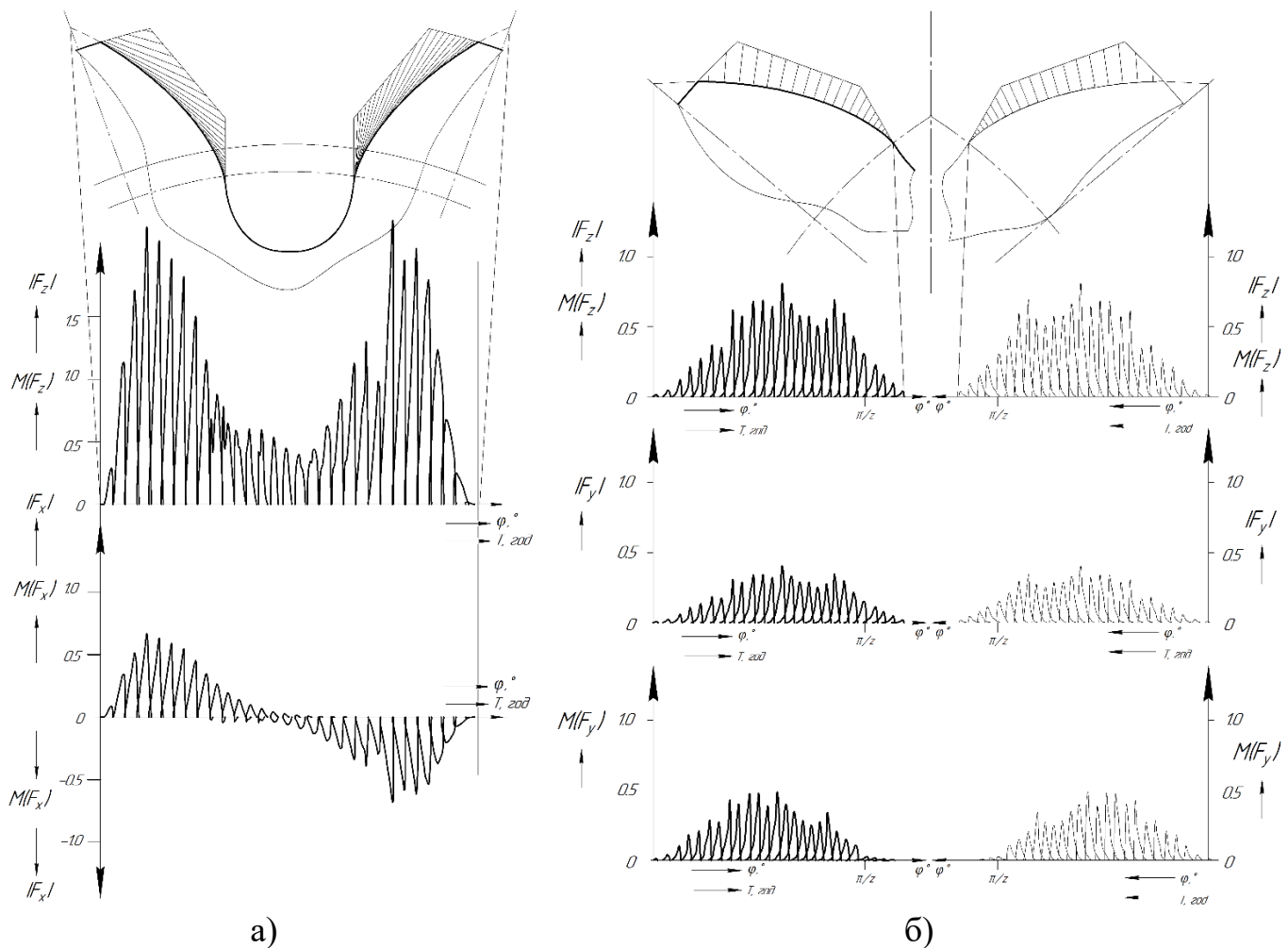


Рис. 12 Комп'ютерні осцилограмні епюри складових сили різання та крутних моментів при обробці западини зубчастого колеса методом чистового черв'ячного (а) та черв'ячно-контурного (б) зубофрезерування.

У четвертому розділі наведені результати експериментальних досліджень.

Експерименти першої серії проводилися для перевірки теорії, що описується в р. 3. Оброблені за схемами різання, що описані в р. 2, поверхні представлені на рис. 13.

При дослідженні отриманих поверхонь на мікроскопі було виявлено, що поверхня, оброблена дотичною РК (рис. 13, а) інструменту має значні макронерівності, хвилястість, шорсткість $R_a = 3,6$ мкм. Поверхня, оброблена РК інструменту розташованою по нормалі (рис. 13, б) має організовану та стабільну структуру нерівностей, шорсткість $R_a = 1,25$ мкм, не має значних перепадів.

За допомогою координатно-вимірювальної машини Carl-Zeiss Contura G2 була виміряна непрямолінійність оброблених різними методами поверхонь, результати у вигляді кривих також представлено на рис. 13.

Непрямолінійність поверхні, обробленої дотичною РК інструменту становить $0,0622$ мм, в той час як непрямолінійність поверхні, обробленої РК інструменту розташованою по нормалі рівна $0,0306$ мм.

Експерименти другої серії проводились для підтвердження теоретичного дослідження, наведеного у р. 3. Методика проведення експерименту описана у р. 2.

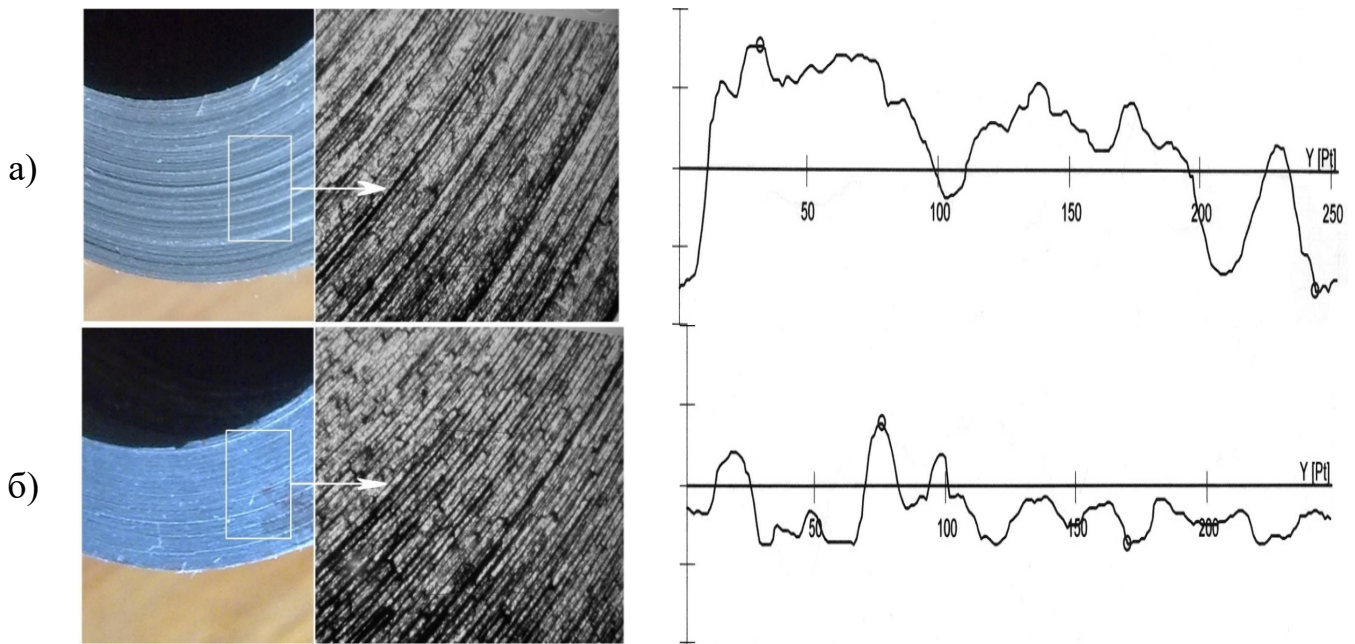


Рис. 13 Поверхні обробленого експериментального зразка дотичною РК інструменту (а) та РК інструменту розташованою по нормалі (б) та відповідні їм результати виміру непрямої лінійності поверхні.

Обробка заготовки виконувалась на довальному верстаті моделі 7А420. На рис. 14 показані оброблені поверхні. Деталі були обміряні на вимірювальній машині, результати експерименту зведено до табл. 1.

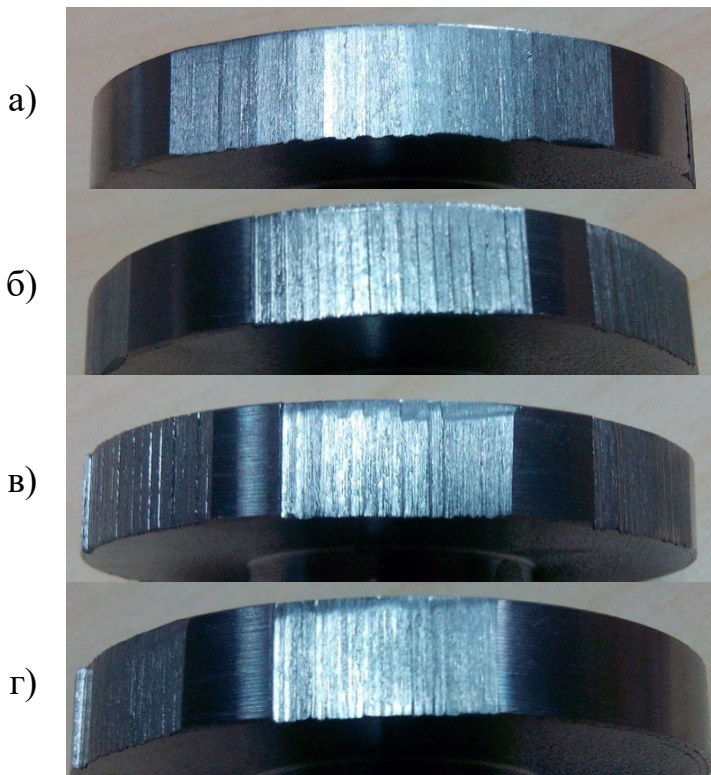


Рис. 14 Оброблені деталі

- а) $S_k = 5,5$ град/об, при дотичній ГРК різця;
 б) $S_k = 2,5$ град/об, при нормальній ГРК;
 в) $S_k = 1,5$ град/об, при нормальній ГРК;
 г) $S_k = 1$ град/об, при нормальній ГРК різця.

Таблиця 1

Оброблена деталь, згідно рис. 14	Чисельне значення шорсткості Ra , мкм	Примітки
а)	2,742	Повздож твірної
	0,834	Повздож напрямної
б)	5,055	Повздож твірної
	1,654	Повздож напрямної
в)	4,08	Повздож твірної
	1,851	Повздож напрямної
г)	3,538	Повздож твірної
	1,058	Повздож напрямної

Результати експериментального дослідження впливу елементів режимів різання на величину шорсткості поверхні виконано відповідно до програми та методики експериментального дослідження, яка наведена у р. 2.

Параметри моделі першого порядку отримані методом найменших квадратів. На підставі результатів першого і другого блоків експериментів були отримані рівняння, що описують моделі для першого блоку виду:

$$\hat{y} = 4,902271 + (-0,100295)x_1 + (0,495556)x_2 + (0,064986)x_3, \quad (9)$$

та для другого блоку виду:

$$\hat{y} = 4,964631 + (-0,089649)x_1 + (0,523399)x_2 + (0,071965)x_3, \quad (10)$$

а також довірчі інтервали в 99%, що дають уявлення про точність і надійність оцінок шорсткості поверхні. Шляхом комбінації результатів, отриманих для двох блоків експериментів, і в результаті застосування методу найменших квадратів була отримана наступна модель першого порядку для шорсткості поверхні:

$$\hat{y} = 4,93 - 0,094x_1 + 0,509x_2 + 0,059x_3. \quad (11)$$

Рівняння (11) можна, користуючись формулами перетворення, привести до наступного виду:

$$R_a = 842,467 \cdot V^{-0,366} \cdot S^{1,258} \cdot t^{0,185}, \quad (12)$$

де R_a – шорсткість поверхні, мкм; V – швидкість різання, м/хв; S – подача, мм/об; t – глибина різання, мм.

Рівняння (12) показує, що зменшення шорсткості поверхні може бути досягнуто підвищенням швидкості різання, що збігається з даними інших досліджень. Зворотний результат досягається при збільшенні подачі або глибини різання, причому ефект впливу подачі є домінуючим.

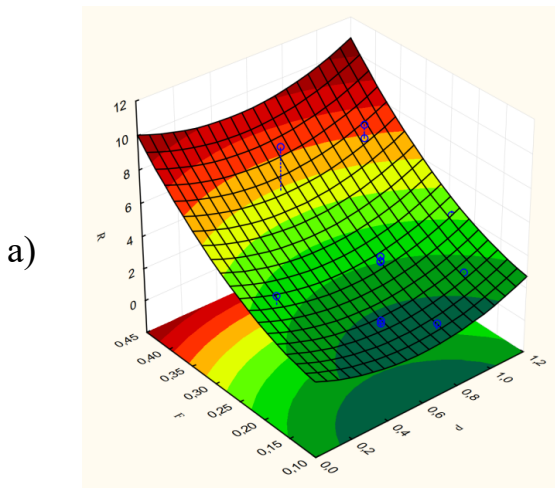
Аналіз дисперсій показав, що модель першого порядку адекватна для експериментів, як першого, так і другого блоків. Однак ретельне вивчення залишків $(y_i - \hat{y}_j)$ показало, що великі залишки мають місце для вершинних точок, а малі залишки - для центральних точок схеми (плану) експериментів. Тому виявилось необхідним розширити експерименти з метою отримання математичної моделі другого порядку, яка може більш точно описати залежність між шорсткістю поверхні і факторами (змінними) процесу різання.

При використанні описаного у р. 2 центрального композиційного плану експериментів була отримана модель другого порядку для шорсткості поверхні, що описується рівнянням:

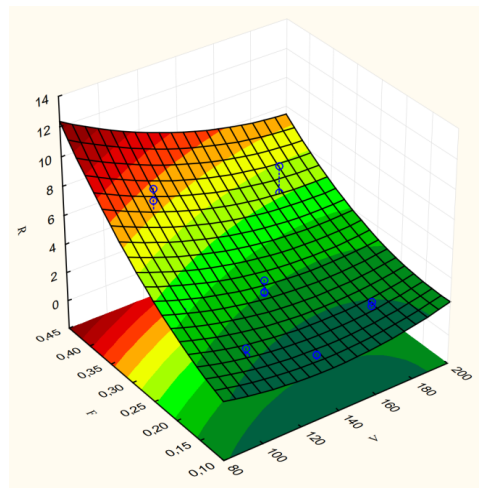
$$y = (4,877269) + (-0,096004)x_1 + (0,533605)x_2 + (0,142880)x_3 + (-0,021547)x_1^2 + (0,054269)x_2^2 + (0,096922)x_3^2 + (0,003489)x_1x_2 + (0,013921)x_1x_3 + (0,005323)x_2x_3. \quad (13)$$

Проведений знову аналіз дисперсій показав, що ефекти першого порядку і квадратичні ефекти другого порядку є значущими. Ефекти взаємодії другого порядку не є значущими.

Значення шорсткості поверхні були отримані за допомогою моделі другого порядку та показані на рис. 15. Модель другого порядку для шорсткості поверхні, що складається з трьох змінних, була зведена до моделі з двома змінними шляхом фіксації на нульовому рівні третьої змінної.



б)



в)

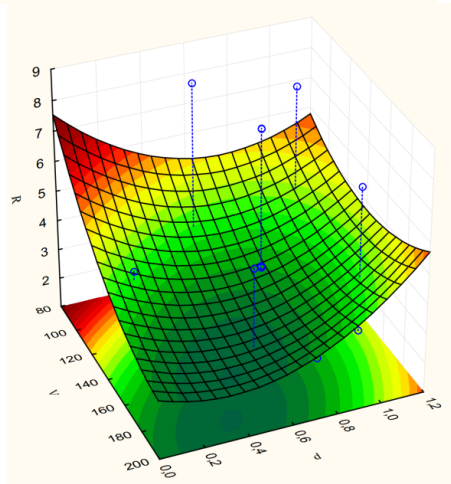


Рис.15 Поверхні відгуку
 а) шорсткість в залежності від подачі та глибини різання (при фіксованій на нульовому рівні швидкості різання);
 б) шорсткість в залежності від подачі та швидкості різання (при фіксованій на нульовому рівні глибини різання);
 в) шорсткість в залежності від швидкості різання і глибини різання (при фіксованій на нульовому рівні подачі).

Під час експериментальних досліджень процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування, виконаних згідно методики, яка описана у р. 2, було оброблено партію заготовок. На рис. 16 показано заготовку під час обробки. На рис. 17 показані оброблені деталі.



Рис. 16 Робоча зона верстата під час обробки.



а)



б)

Рис. 17 Оброблені деталі
 а) деталь після першого проходу;
 б) готова деталь.

Деталі були обміряні на координатно-вимірювальній машині, отримані профілограми показано на рис. 18. Результати експерименту зведено до табл. 2.

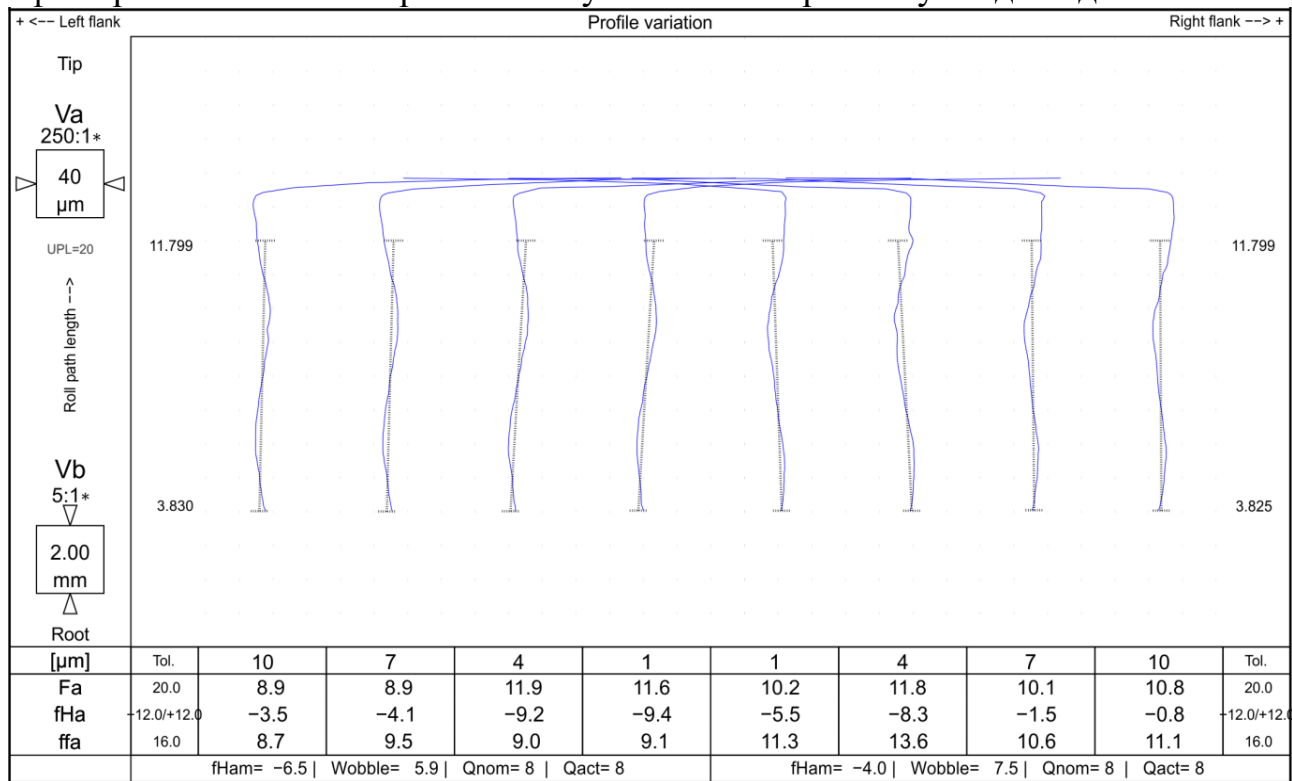


Рис. 18 Профілограма обміряної деталі.

Таблиця 2

Найменування		Позначення	Одиниця виміру	Чисельне значення
Шорсткість поверхонь	Повздовж твірної	R_a	мкм	4,08
	Повздовж напрямної	R_a		1,65
По DIN 3962	Похибка профілю	f_{fa}	мкм	13
	Похибка напрямку профілю	f_{Ha}		-9,5
	Похибка напрямку зубця	F_β		6,2
	Накоплена похибка кроків	F_p		17,7
	Радіальне биття зубчатого вінця	F_r		16,5

У п'ятому розділі розглянуто основні тенденції сучасної металообробки (такі як: зниження енергоємності процесів різання; концентрація операцій на одному верстаті типу обробний центр) якими продиктована необхідність у реалізації проекту зубофрезерування в умовах диференційованої технології. І, як наслідок, виникає необхідність у створенні зубообробного центру з магазином змінних інструментів, з можливістю максимально забезпечити точність, та зосередити на одному обробному центрі повний цикл обробки зубчастих коліс по диференційованій технології. Диференційована технологія вміщує в собі:

- попереднє прорізання міжзубових впадин, комплектом дискових фрез (в умовах одиничного ділення);
- фрезерування лівих і правих профілів послідовно, в умовах обкату;
- шевінгування профілів в умовах вільного обкату.

Найбільш ефективна реалізація проекту черв'ячно-контурного зубофрезерування – в умовах диференційованої технології, з огляду на те, що спрощення процесу формоутворення (схеми різання) при обробці методом черв'ячно-контурного зубофрезерування, приводить до значного спрощення різального інструменту та одночасно до можливості реалізації процесу в умовах диференціації обробки.

Також, до передумов створення диференційованої технології можна віднести:

- запобігання перемінності сил різання по модулю за рахунок вирівнювання товщини зрізу;
- розділення припуску на комплект інструменту для попереднього прорізання западин;
- розділення обробки по лівим та правим профілям, що виключає знакоперемінність сил різання;
- розвантаження кінематичного ланцюга шпінделя виробу при попередньому прорізанні впадин.

Практика верстатобудування постійно вказує на те, що правильний вибір і раціональна побудова компоновки роблять великий вплив на ефективність експлуатації верстата. Вплив проявляється за двома напрямками.

По-перше, через структуру, правильний вибір якої забезпечує необхідну універсальність або спеціалізацію верстата і його відповідність ряду технологічних та інших вимог.

По-друге, через вибір раціональних конструктивних виконань, розмірних пропорцій і розташування вузлів у просторі верстата, чим забезпечуються високі експлуатаційні показники.

На рис. 19 приведено розроблену компоновку верстата для здійснення зубообробки в умовах диференційованої технології. Гнучкий зубообробний центр здатен виконувати попереднє прорізання западин та обробку методами

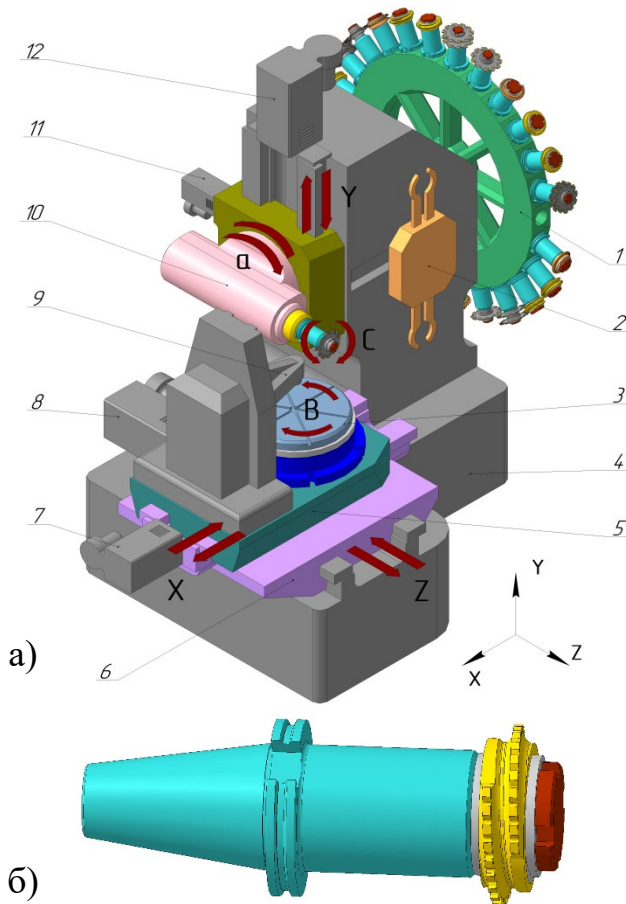


Рис. 19 Компоновка верстата (а), та різальний інструмент (б)

диференційованої технології

- 1 – інструментальний магазин;
- 2 – автооператор системи АЗІ;
- 3 – шпіндель виробу; 4 – станина;
- 5 – радіальний супорт шпінделя виробу;
- 6 – поперечний супорт шпінделя виробу;
- 7 – сервопривод радіального супорта шпінделя виробу;
- 8 – сервопривод поперечного супорта шпінделя виробу;
- 9 – верхній центр контрпідтримки;
- 10 – шпіндель інструменту;
- 11 – сервопривод кутового положення інструментального шпінделя;
- 12 – сервопривод повздовжнього переміщення інструментального шпінделя.

центр здатен виконувати попереднє прорізання западин та обробку методами

черв'ячно-контурного зубофрезерування і шевінгування черв'ячним шевером за один установ.

Структурна формула синтезованої компоновки верстату:

$$B_V x z O^M Y a D_{v/h}$$

Приведена компоновка верстату є найбільш доцільною для здійснення зубообробки в умовах диференційованих технологій. Верстат не обмежений у використанні комплекту інструментів, тому його використання являється бажаним для максимальної диференціації операцій.

Компоновка має найвищу ступінь гнучкості по розподілу умов різання при формоутворенні (ступінь максимального спрощення інструменту за рахунок ускладнення верстату).

Традиційну технологію попередньої обробки зубчастих коліс методом черв'ячного зубофрезерування можна умовно назвати методом інтегрованої прорізки западин з огляду на комплексне формування припуску під послідуочу

обробку евольвентних поверхонь шляхом зняття $\sim 90\%$ матеріалу міжзубової западини. Метод містить в собі всі недоліки, притаманні черв'ячному зубофрезеруванню.

Тому було прийнято рішення синтезувати процес диференційованого попереднього прорізання западин комплектом дискових фрез для послідуочної реалізації процесу черв'ячно-контурного зубофрезерування. Принцип диференційованого попереднього прорізання западин представлено на рис. 20.

Суть методу полягає в тому, що зубець деталі попередньо обмежується припуском з прямолінійними твірними, які забезпечують його мінімум на вершині та в западині зубця та максимум – в зоні початкового (ділильного) кола. Форма такого припуску може бути раціонально утворена при попередній обробці і найбільш прийнятна для умов черв'ячно-контурного зубофрезерування, а також з урахуванням використання диференційованої технології.

Обробка реалізується на верстатах типу обробний центр комплектом дискових фрез за дві позиції. На першій позиції (рис. 20, а), в умовах одиничного ділення, обробляються в чистову западини та утворюється припуск на

головці зубця під чистову обробку для всіх однойменних профілів, наприклад лівих. На другій позиції (рис. 20, б) – аналогічна обробка опозитних профілів другим комплектом інструменту.

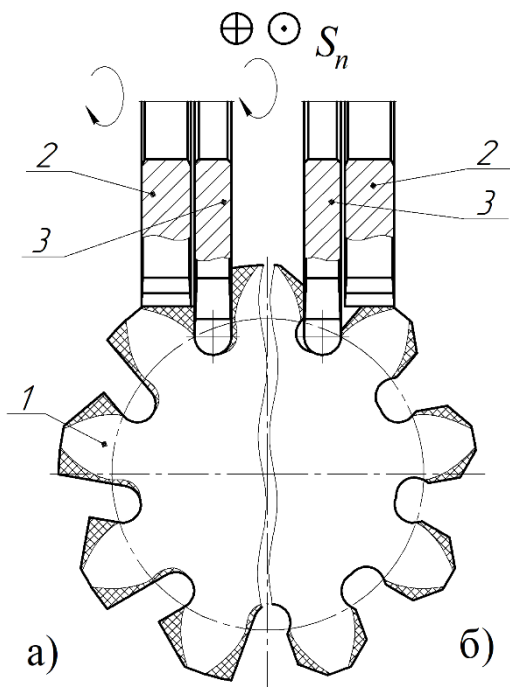


Рис. 20 Схема диференційованого попереднього прорізання западин комплектом дискових фрез
а) обробка на першій позиції;
б) обробка на другій позиції;
1 – заготовка; 2 – фреза профілююча головку зубця;
3 – фреза чистова по дну западини; S_n – повздовжнє переміщення фрези.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано вирішення актуальної науково-технічної задачі по підвищенню ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс середніх модулів шляхом зміни схеми різання, тобто взаємодії різальної кромки інструменту та оброблюваної поверхні, яке дозволить підвищити точність та якість обробки. Також створено передумови для реалізації технології зубофрезерування в умовах гнучкого виробництва.

Представлені у роботі результати досліджень дають змогу зробити такі загальні висновки:

1. Встановлено, що існує альтернатива схемі різання при формоутворенні евольвентного профілю способом традиційного черв'ячного зубофрезерування, а саме – контурна взаємодія, при якій евольвента утворюється як множина геометричних точок, які є проєкціями нормалей до теоретичного евольвентного профіля. На основі викладених методик проведено теоретичні та експериментальні дослідження та порівняльний аналіз взаємодії РК та ОП та виявлено, що зміна схеми різання дозволить зменшити похибки геометричної форми обробленої поверхні, підвищити якість та сталість процесу обробки та знизити виникаючі напруження у поверхневому шарі обробленої поверхні.

2. На основі контурної взаємодії РК інструменту та оброблюваної поверхні було синтезовано метод черв'ячно-контурного зубофрезерування.

3. Керуючись розробленою методикою дослідження процесу формоутворення в умовах тривимірного комп'ютерного моделювання визначено, що при використанні запропонованої контурної схеми взаємодії РК та ОП при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні утворюються раціональні форми та розміри відокремлюваних кожним зубцем фрези елементів матеріалу, визначено геометричні форми цих одиничних різів та закономірності їх розподілення під час обробки.

4. На основі результатів проведеного дослідження процесу формоутворення були отримані комп'ютерні осцилограми відносних модулів сили різання та відносні крутні моменти різання, які відтворюють навантаження від сили різання на кожному зубці фрези. При аналізі осцилограм було встановлено, що черв'ячно-контурне зубофрезерування характеризується зниженням відносного модуля енергозатрат по інструментальному шпінделю в 2,5 рази, а по шпінделю виробу – у 4,5 рази у порівнянні з традиційним черв'ячним зубофрезеруванням, має кращі показники по рівномірності роботи та відсутності перемінності сили різання за напрямком.

5. Експериментальні дослідження процесів черв'ячно-контурного зубофрезерування показали, що правий і лівий профілі обробленої деталі мають схожі по характеру спотворення профілограми, що досягнуто за рахунок адекватних умов різання по правому і лівому профілю деталі під час обробки. Ресурс по зменшенню колової подачі дозволяє досягти аналогічної, або навіть кращої величин шорсткості поверхні у порівнянні з традиційним черв'ячним зубофрезеруванням. Досяжна точність евольвентного профілю на рівні 9,5...13 мкм, що відповідає 6...7 квалітету по DIN 3962 та задовольняє вимогам напівчистової обробки.

6. Запропоновано концепцію технології зубообробки для умов гнучкого виробництва на базі методу черв'ячно-контурного зубофрезерування, методу

диференційованого попереднього прорізання западин та верстата типу обробний центр.

7. Окремі результати дисертаційної роботи, а саме проект технології черв'ячно-контурного зубофрезерування, передано для впровадження у виробництво та апробовано на АТ «Гідросила», м. Кропивницький, так як технологія має перспективи у виробництві шестерень гідравлічних машин середніх та крупних модулів, особливо тих, що працюють в режимі реверсивних гідромоторів і повинні мати однакоvu геометричну форму різнойменних профілів.

СПИСОК РОБІТ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові роботи, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Підгаєцький М. М. Підвищення точності зубообробки шляхом розділення поверхонь, що взаємодіють з інструментом в процесі різання / М. М. Підгаєцький, А. М. Кириченко, А. Р. Апаракін // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр. – Кіровоград: КНТУ, 2014. – Вип. 27. – с. 13-19.

2. Підгаєцький М. М. Порівняльний аналіз кінематики процесу при традиційному та черв'ячно-контурному чистовому зубофрезеруванні шестерень, що використовуються у сільськогосподарській техніці / М. М. Підгаєцький, А. М. Кириченко, А. Р. Апаракін // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин". – Кіровоград: КНТУ, 2014. – Вип. 44. – с. 149-153.

3. Підгаєцький М.М. Динамічний та кінематичний синтез системи черв'ячно-контурного зубофрезерування / М. М. Підгаєцький, А. Р. Апаракін // Журнал "Науковий вісник НГУ". Серія: Геотехнічна і гірнична механіка, машинобудування. – Дніпро: НГУ, 2017. – №3 с. 54-62. (*SciVerse Scopus, Index Copernicus, Ulrich's Web, Research Bib, EBSCO, категорія «А» Переліку наукових фахових видань України, квартал Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank*).

Опубліковані праці апробаційного характеру:

4. Підгаєцький М.М. Підвищення точності зубообробки, шляхом розділення поверхонь, що взаємодіють з інструментом в процесі різання / М.М. Підгаєцький, А.М. Кириченко, А.Р. Апаракін // Матеріали III міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів "Актуальні задачі сучасних технологій". – 2014. – с. 129-130.

5. Апаракін А.Р. Передумови створення методу диференційованого попереднього прорізання западин зубчастих коліс / Апаракін А.Р., Підгаєцький М.М. // Матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем". – Том 1. – 2017. – с. 104-105.

6. Підгаєцький М.М. Синтез концептуальної схеми зубообробного центру для обробки шестерень в умовах гнучкої технології на базі черв'ячно-контурного зубофрезерування / М.М. Підгаєцький, А.Р. Апаракін // Матеріали XVII міжнародної науково-практичної конференції "Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво". – 2017. м с.144-146.

7. Апаракін А.Р. Порівняння процесів стружкоутворення черв'ячного та черв'ячно-контурного зубофрезерування за допомогою комп'ютерної моделі кінематики / Апаракін А.Р., Підгаєцький М.М. // Матеріали X міжнародної науково-практичної конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем". – Том 1. – 2020. – с. 123-125.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

8. Пат. 84471 Україна, МПК В23F 19/00. Спосіб лезової обробки евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс після попереднього прорізання впадин. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № у 2013 04277; заявл. 05.04.2013; опубл. 25.10.2013. Бюл. №20.

9. Пат. 102901 Україна, МПК В23F 21/16, В24В 5/36. Збірна чистова черв'ячна фреза. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № у 2015 04926; заявл. 20.05.2015; опубл. 25.11.2015. Бюл. №22.

10. Пат. 110741 Україна, МПК В23F 21/14, В23F 21/16, В23F 5/22. Спосіб фрезерування зубців циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р., Скібінський О.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № у 2014 07893; заявл. 14.07.2014; опубл. 10.02.2016. Бюл. №3.

11. Пат. 140800 Україна, МПК В23F 21/00, В24F 21/16. Черв'ячно-контурна фреза зі змінними ріжучими пластинами. / Підгаєцький М.М., Апаракін А.Р.; заявник і патентотримач Центральноукраїнський національний технічний університет. Заявка № у 2019 08898; заявл. 23.07.2019; опубл. 10.03.2020. Бюл. №5.

АНОТАЦІЯ

Апаракін А. Р. Підвищення ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування циліндричних зубчастих коліс за рахунок зміни схеми різання. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2021.

Робота присвячена підвищенню ефективності чистового черв'ячного зубофрезерування евольвентних зубчастих коліс середніх модулів 5...14 мм за рахунок зміни схеми взаємодії різальної кромки інструменту та оброблюваної поверхні та створення передумов для реалізації технології зубофрезерування в умовах гнучкого виробництва. В свою чергу, підвищення точності зубчастих коліс сприяє зниженню вібрацій, рівня шуму, підвищенню довговічності роботи гідравлічних машин.

Здійснено аналіз сучасного стану способу черв'ячного зубофрезерування та виявлено протиріччя між значним прогресом у створенні верстатних систем та,

незважаючи на численні дослідження, зовсім незначним прогресом в удосконаленні самого процесу зубофрезерування.

Проведені дослідження за напрямками визначення енергоємності процесів зубофрезерування, шляхів зменшення спотворень геометричної форми обробленої поверхні, впливу зазорів на кінематичну точність ділильних ланцюгів столів зубофрезерних верстатів згідно розроблених програм та методик.

Отримані результати теоретичних досліджень, виконаних в умовах моделювання, вказали на те, що для забезпечення вимог до точності і якості обробленої поверхні при зубофрезеруванні рекомендована система взаємодії різальної кромки і оброблюваної поверхні відмінна від традиційного черв'ячного зубофрезерування. З цією метою здійснено кінематичний синтез способу черв'ячно-контурного зубофрезерування на основі принципово відмінної взаємодії різальної кромки та оброблюваної поверхні. Результати теоретичних досліджень процесу формоутворення та енергоємності обробки вказують на зниження енергетичних витрат приблизно в 2,5 рази завдяки зниженню сили різання при використанні нового методу зубофрезерування.

Виконано експериментальні дослідження процесів різання, які підтверджують висновки та дані теоретичних досліджень про гіршу якість поверхні, обробленої по моделі традиційного черв'ячного зубофрезерування, ніж поверхні, яка оброблена згідно моделі черв'ячно-контурного зубофрезерування. Виконане експериментальне дослідження формоутворення при черв'ячно-контурному зубофрезеруванні показало, що правий і лівий профілі обробленої деталі мають схожі по характеру спотворення евольвентограми, за рахунок адекватних умов різання.

Представлено концептуальну схему продукційного зубообробного центру для обробки шестерень в умовах гнучкого виробництва на базі черв'ячно-контурного зубофрезерування. Запропоновано і обґрунтовано використання методу диференційованого попереднього прорізання міжзубових западин з метою створення раціонального припуску для наступної обробки.

Ключові слова: черв'ячне зубофрезерування, формоутворення, моделювання процесу, енергоємність, гнучке виробництво.

ABSTRACT

Aparakin A. R. Improving the efficiency of finishing gear hobbing of cylindrical gears by changing the cutting scheme. – Manuscript.

The dissertation for obtaining a scientific degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in a specialty 05.03.01 "Processes of mechanical treatment, machines and tools". – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2021.

The work is devoted to increasing the efficiency of finishing gear hobbing of involute gears of medium modules of 5...14 mm by changing the scheme of interaction of the cutting edge of the tool and the machined surface, and creating preconditions for the implementation of gear hobbing technology in flexible production. In turn, increasing the accuracy of gears helps to reduce vibration, noise levels and increase the durability of hydraulic machines.

An analysis of current state of the method of gear hobbing and the contradictions between significant progress in the creation of machine systems and, despite numerous studies, not significant progress in improving the process of gear hobbing is presented.

Research on directions of definition of energy consumption of processes of gear hobbing, the ways of reduction of distortions of geometrical form of the processed surface, influence of backlashes on kinematic accuracy of dividing circuits of rotary tables of gear hobbing machines according to the developed programmes and techniques are carried out.

The obtained results of theoretical studies performed under modelling conditions indicated that to ensure the requirements for accuracy and quality of the treated surface during gear hobbing, the recommended system of interaction of the cutting edge and the treated surface is different from conventional gear hobbing. For this purpose, kinematic synthesis of the method of contour gear hobbing was performed on the basis of a fundamentally different interaction of the cutting edge and the treated surface. The results of theoretical studies of the process of form generation and energy consumption of processing indicate reduction in energy consumption by approximately 2,5 times due to reduction in cutting force while using a new method of gear hobbing.

Experimental studies of cutting processes have been performed, which confirm the conclusions and data of theoretical studies on the poorer quality of the surface treated according to the model of conventional gear hobbing than the surface treated according to the model of contour gear hobbing. Experimental study of the formation of contour gear hobbing showed that the right and left profiles of the machined part are similar in the nature of the distortion of the involutegram, due to adequate cutting conditions.

The conceptual design of the production gear centre for processing gears in the conditions of flexible production on the basis of contour gear hobbing is presented. The use of the method of differentiated preliminary cutting of intertooth cavities in order to create rational allowance for further processing is proposed and substantiated.

Key words: gear hobbing, shaping, process modelling, energy consumption, flexible production.

Підписано до друку 22.02.2021 р. Формат 60x90¹/16.

Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9

Наклад 100 прим. Замовлення № 610.

Віддруковано на ризографі в видавничому центрі «Принт-центр»

04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А

Тел./факс: 486-50-88, (050)712-40-80, (097)182-07-07, 277-40-16

<http://www.printc.kiev.ua>; E-mail: printcentr@ukr.net