

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

**Камчатна - Степанова Катерина Валеріївна**



УДК 621.914.6

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ  
ЗАГАРТОВАНИХ ВЕЛИКОМОДУЛЬНИХ ШЕВРОННИХ КОЛІС ПРИ  
ШВИДКІСНОМУ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННІ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Краматорськ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник**

доктор технічних наук, професор  
**Клочко Олександр Олександрович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри технології  
машинобудування та металорізальних верстатів.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, доцент  
**Воронцов Борис Сергійович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського», професор кафедри  
технології машинобудування;

кандидат технічних наук, доцент  
**Кобельник Володимир Романович**,  
Тернопільський національний технічний  
університет імені Івана Пулюя, завідувач кафедри  
конструювання верстатів, інструментів та машин.

Захист відбудеться «28» вересня 2021 р. о 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02 у Донбаській державній машинобудівній академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, корп. 3, ауд. 3308.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна 72, корп. 1 або web-адресою: <http://www.dgma.donetsk.ua/spetsializovana-vchena-rada-d12.105.02.html>.

Автореферат розісланий «25» серпня 2021р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



С. Л. Міранцов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Важливе місце в сучасній техніці займають зубчасті передачі, які є відповідальними вузлами більшості машин, механізмів і агрегатів. Вони безпосередньо впливають на якість роботи машин, їх надійність і довговічність.

Важке машинобудування виробляє унікальні за розмірами і корисними потужностями машини, що використовуються в гірничодобувній, металургійній, будівельній та інших галузях промисловості. Прикладами можуть бути екскаватори, роторні комплекси, драглайни, вугільно- та рудорозмельні млини, стани і т.п. У редукторах, механізмах приводів та повороту цих машин знайшли застосування великомодульні  $m = 12-36$  мм циліндричні та шевронні зубчасті колеса, шевронні колеса з діаметром вершин зубів від 400 мм до 2000 мм й шириною зубчастого вінця від 100 мм до 800 мм. Ступінь точності цих коліс, з точки зору службового призначення, повинна дорівнювати 7В – 9В ГОСТ1643-81. Часто ступінь точності таких зубчастих коліс знижується тільки через відсутність відповідного обладнання та інструменту.

Підвищення продуктивності та якості нарізання великомодульних шевронних коліс має надзвичайно важливе економічне значення. Воно дає можливість раціонально використовувати лімітоване спеціальне зуборізальне обладнання та інструмент високої вартості. Підвищення якості різання зубів, а, відповідно, надійності та довговічності зубчастих передач дозволяє істотно скоротити час простою та витрати на міжремонтне обслуговування унікальних машин, а також збільшити їх виробничі потужності.

Для великомодульного зуборізального інструменту, зокрема чистових черв'ячних фрез, першочергове значення має раціоналізація схеми різання разом із геометрією різальної частини інструменту, що дозволить поліпшити динаміку процесу зубофрезерування, підвищити стійкість і точність інструменту, а, відповідно, й підвищити продуктивність та якість обробки зубчастих коліс. Водночас важливе значення має спрощення конструкції інструменту, підвищення його економічності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано відповідно до плану держбюджетної НДР Міністерства освіти і науки України: «Розробка та дослідження екологічних безводних процесів алмазного шліфування важкооброблюваних матеріалів» (номер держреєстрації № 0121U109541) Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», де автор була безпосереднім виконавцем окремих розділів.

### ***Мета і задачі дослідження.***

**Метою роботи** є підвищення ефективності механічного оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс на основі вивчення закономірностей швидкісного зубофрезерування з роздільною схемою формоутворення.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Дослідити схему різання і завантаження зубів фрези в контактному полі різання; траєкторії руху зубів фрези та їх вплив на товщину зрізаних шарів, знос

інструменту і якість обробленої поверхні.

2. Розробити метод профілювання та проектування теоретично точних черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення.

3. Провести порівняльні дослідження динаміки чистового зубофрезерування великомодульних шевронних коліс зі стандартними черв'ячними фрезами і фрезами з роздільною схемою формоутворення в широкому діапазоні змін режимів різання. Дослідити вплив технологічних факторів обробки на крутний момент, колову силу та потужність різання.

4. Провести порівняльні дослідження зносу та стійкості стандартних фрез і фрез з роздільною схемою формоутворення при обробленні шевронних коліс.

5. Дослідити вплив конструктивних параметрів інструментів і технологічних факторів на хвилястість, шорсткість і точність обробленої поверхні зубів великомодульних коліс.

**Об'єкт дослідження** – процес чистового зубофрезерування загартованих великомодульних зубчастих коліс черв'ячними модульними фрезами.

**Предмет дослідження** – закономірності підвищення продуктивності обробки, якості оброблених поверхонь і точності загартованих великомодульних шевронних коліс при чистовому зубофрезеруванні з роздільною схемою формоутворення.

**Методи дослідження.** Теоретичною базою виконаних досліджень є фундаментальні положення теорії процесів різання металів, моделювання та математичної статистики. Достовірність наукових припущень, положень, висновків і рекомендацій обумовлена коректним використанням фундаментальних законів опору матеріалів, теоретичних основ технології машинобудування та матеріалознавства при задовільному збігу результатів теоретичних і експериментальних досліджень, оброблених з використанням методів багатовимірного статистичного аналізу.

**Наукова новизна одержаних результатів.** На основі системного аналізу і узагальнення досвіду дослідження різальних властивостей черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення загартованих шевронних зубчастих коліс, вимог до забезпечення якості та точності обробленої поверхні зубів відповідальних передач, вперше сформульовані і реалізовані принципи формоутворення евольвентної поверхні загартованих шевронних зубчастих коліс за допомогою моделювання високоякісної обробки, що дозволяють інтенсифікувати процес при зустрічному фрезеруванні за допомогою спеціальної фрези з роздільною схемою різання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Уперше розроблено модель формоутворення евольвентної поверхні зубів загартованих великомодульних шевронних коліс при зустрічному зубофрезеруванні з роздільною схемою різання з розташуванням зрізувальних лез по лінії зачеплення, що дозволило підвищити подачі в 3-4 рази при зменшенні в 2-5 разів розрахункової висоти хвилястості поверхні зубів.

2. Уперше встановлено особливості формоутворення черв'ячною фрезою профілю зубів великомодульних шевронних коліс з урахуванням кута нахилу їх гвинтової лінії за рахунок визначення необхідної відстані розташування правого та лівого корпусів інструменту, що дозволило підвищити точність обробленого евольвентного профілю зубів в 2-3,5 рази з розширенням зони оброблення коліс за

8-м ступенем точності до модулю зубів 20 мм у діапазоні  $z = 18 - 350$ .

3. Удосконалено спосіб чистового швидкісного зубофрезерування зубів загартованих великомодульних шевронних коліс за рахунок вибору оптимального значення радіусу округлення різального леза в залежності від величини подачі, що дозволяє забезпечити мінімальне значення кутів ковзання леза фрези і, як наслідок, збільшити коефіцієнт ефективності формоутворення оброблюваного евольвентного профілю зубів.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

- розроблено рекомендації щодо оптимізації траєкторії руху різальних кромки зубів фрези в залежності від товщини зрізуваних шарів із урахуванням радіусу заокруглення різальної кромки та впливу умов різання на хвилястість та і шорсткість обробленої поверхні зубів колеса;

- розроблено алгоритми для обробки результатів експериментальних досліджень методами багатовимірного статистичного аналізу, що дозволяє підвищити точність та швидкість обчислень при проведенні аналізу процесів схем різання та загрузки зубів фрези в контактному полі різання; траєкторії руху зубів фрези та їх вплив на товщину зрізуваних шарів, знос інструмента та якість обробленої поверхні з урахуванням радіусу заокруглення різальної кромки;

- практично впроваджено чистове швидкісне лезове оброблення загартованих шевронних зубчастих коліс черв'ячною фрезою збірної конструкції.

Результати роботи впроваджено:

- на ТОВ «КЗМО» (м. Костянтинівка) у процесі виготовлення шевронних зубчастих коліс, що забезпечило підвищення продуктивності із очікуваним економічним ефектом 145045 грн на рік;

- на АТ «Турбоатом» (м. Харків), де очікуваний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи забезпечується якісним виготовленням загартованих зубчастих передач зі збільшенням продуктивності обробки в 1,5 рази;

- у навчальному процесі НТУ «ХП» (м. Харків) на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів при викладанні дисциплін «Теоретичні основи технології виробництва деталей та технології ремонту» та «Обробка типових деталей» за спеціальністю 05.03.01- процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: теоретико - експериментальна залежність умов остаточного формоутворення евольвентної поверхні загартованих шевронних зубчастих коліс черв'ячною фрезою збірної конструкції; розроблені рекомендації щодо траєкторії руху різальних кромки зубів фрези на товщину зрізуваних шарів з урахуванням радіусу їх округлення на хвилястість та шорсткість обробленої поверхні зубів колеса зрізуваних шарів; аналіз органічних помилок профілювання та точності оброблення шевронних зубів архімедовими черв'ячними фрезами, точність оброблення профілю зубів шевронних коліс з роздільною схемою формоутворення: розроблені способи зубофрезерування великомодульних шевронних зубчастих коліс із забезпеченням якості поверхневого шару.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково -

технічних конференціях: ІХ Міжнародна науково - практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», (Чернігів, 2017); «Нові та нетрадиційні технології в ресурсо - та енергозбереженні», (Одеса: ОНПУ, 2019); XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (Краматорськ: ДДМА, 2020); XIX Міжнародна науково - практична конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (Краматорськ: ДДМА, 2021); XXIX Міжнародна конференція «Нові технології в машинобудуванні», (Коблево – Харків: НАКУ «ХАІ», 2019); Шоста міжнародна науково - технічна конференція «Інформатика, управління та штучний інтелект», (Харків: НТУ «ХПІ», 2019); ІХ Всеукраїнська науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні», (Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2020); Сьома міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, управління та штучний інтелект», (Харків-Краматорськ, 2020); XI Міжнародна науково - практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», (Чернігів, 2021).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано у 26 наукових працях, з яких 1 монографія, 7 статей у наукових фахових виданнях України, 4 – у зарубіжних виданнях, 14 – у матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотації трьома мовами, переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 182 сторінки, з яких основного тексту – 142 сторінки, серед них: 57 рисунків за текстом, 1 таблиця на окремій сторінці, 15 таблиць за текстом, список з 144 найменувань використаних джерел на 21 сторінці, 3 додатка на 18 сторінках.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** наведено обґрунтування вибору теми дослідження, сформульовано мету, завдання і методи дослідження. Описано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію матеріалів дисертації, публікації, що відображають її зміст, виділено особистий внесок здобувача та практичну цінність роботи для галузі машинобудування.

**У першому розділі** здійснено аналіз схем різання та на їх основі аналіз завантаження окремих зубів черв'ячних фрез різних конструкцій.

Найменш опрацьованими є питання кінематики чистового зубофрезерування, схем різання та конструкцій великомодульного інструменту, динаміки різання, а також пов'язаної з цим якості робочих поверхонь і точності нарізаних зубів.

Основні напрями в розробці конструкцій черв'ячних фрез і результати досліджень процесу зубофрезерування є наступними: дослідження різальних властивостей черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення загартованих шевронних зубчастих коліс; збільшення продуктивності зубофрезерування черв'ячними фрезами досягалося двома шляхами: збільшенням подачі інструменту та збільшенням швидкості різання.

Розробкою і дослідженням процесів підвищення ефективності механічного

оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс при швидкісному зубофрезеруванні займалися вітчизняні та зарубіжні вчені: Адам Я. І., Вулгаков Е. Б., Васильченко Я. В., Воронцов Б. С., Гавриленко В. А., Генкін М. Д., Гинзбург Е. Г., Гришко В. А., Кане М. М., Капелевич А. Л., Кіріченко І. А., Ковальов В. Д., Колчин М. І., Кривошея А. В., Клочко О. О., Мироненко Є. В., Овум'ян Г. Г., Охрименко О. А., Печений В. І., Равська Н. С., Родін П. Р., Розенберг О. А., Сидоренко О. К., Шаповалов В. Ф., Халєбський Н. Г та інші.

Підвищення продуктивності зубофрезерування тісно пов'язане з забезпеченням раціональних геометричних параметрів різальної частини черв'ячних фрез. Дослідження нарізання зубчастих коліс  $m = 10$  мм, сталь 45, HRC 38...42, черв'ячними затилованими фрезами з позитивним переднім кутом  $\varphi = 10^\circ$  при режимах різання:  $V = 14-20$  м/хв,  $S = 1,6-2,47$  мм/об. показали, що стійкість цих фрез збільшується в порівнянні зі стійкістю фрез, які мають  $\varphi = 0^\circ$ , в 1,5 рази. Зубооброблення загартованих шевронних зубчастих коліс на сучасних зубофрезувальних верстатах з ЧПК дозволяє нарізати зуби без обмеження швидкості різання в залежності від стійкості твердосплавної фрези та обробляти зі швидкістю до 5 м/с.

Точність фрезерування черв'ячними фрезами збільшується зі зменшення глибини різання на чистову обробку. Результати аналізу свідчать, що похибки профілю зубів колеса, що виникають під впливом сил різання, менші, ніж похибки, які є наслідком недостатньо точного виготовлення самої черв'ячної фрези. Тільки в умовах недостатньої жорсткості ці похибки стають порівнянними.

**У другому розділі** виконані дослідження кінематики процесу різання черв'ячними фрезами з роздільною схемою формоутворення.

Для визначення ширини зрізаного шару додатково розглянемо побудовані на рис. 1. Ширина шару дорівнює сумі змінних по довжині робочих ділянок  $a_i$  і  $b_i$  кромки (рис. 1, б) та сталих по довжині робочих ділянок  $c$  і  $d$  (рис. 1, а). Таким чином, ширина стружок, зрізаних зубами правозахідної фрези, визначається за формулами:

для лівого корпусу:

$$b_{i\pi} = a_i + d = \left[ r_b (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \left( \frac{\psi}{2} \right) - \frac{P_b}{z_\phi} (i - 1) \right] \operatorname{tg} (\psi - \mu) + d, \quad (1)$$

для правого корпусу:

$$b_{i\pi} = b_i + c = \left[ r_b (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \left( \frac{\psi}{2} \right) - \frac{P_b}{z_\phi} (i - 1) \right] \operatorname{tg} (\mu) + c, \quad (2)$$

Для лівозахідної фрези формули (1) і (2) міняються місцями.

На рис. 2, б, г показані недеформовані шари, які зрізуються зубами обох корпусів правозахідної фрези з роздільною схемою формоутворення. Обробка правої бічної поверхні зуба колеса (рис. 1, і рис. 2, а) з правим корпусом фрези

здійснюється в напрямку стрілки А від головки зуба до ніжки. Зуби корпусу, внаслідок відносно невеликої довжини ділянок кромки С (рис.1, а) і відсутності перекриття прорізів на виході з припуску, утворюють виступи.

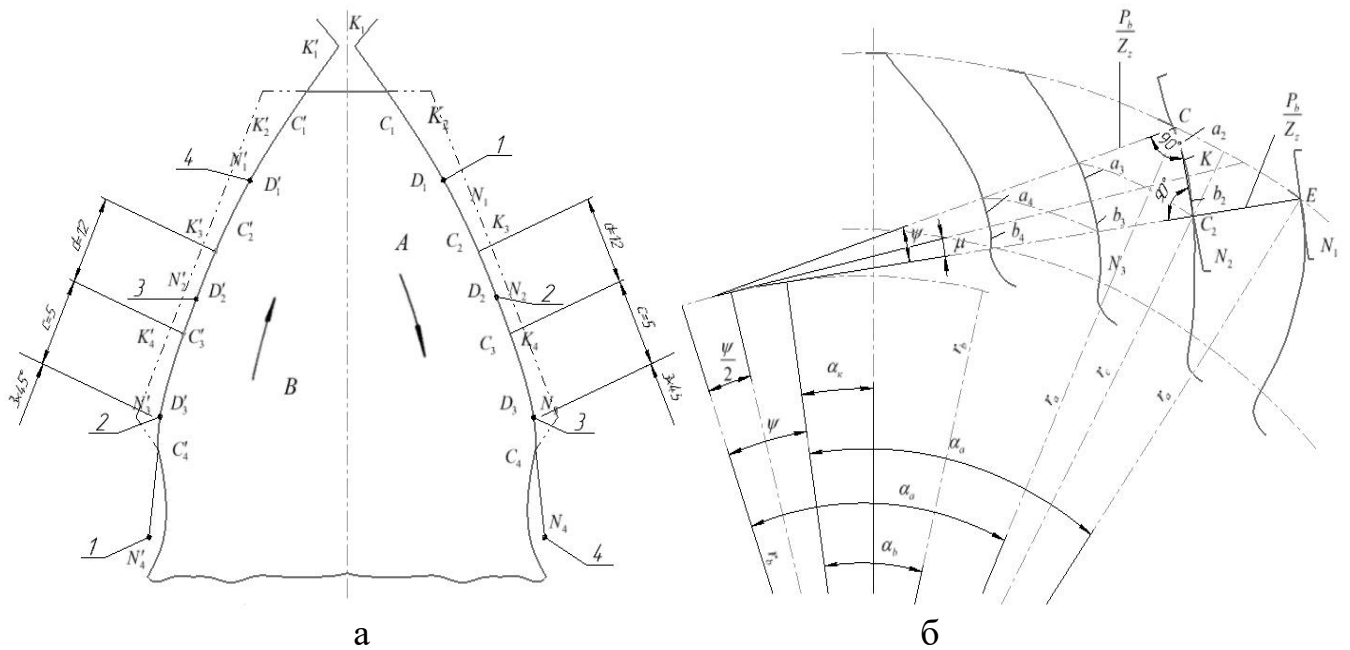


Рис. 1 – Визначення ширини зрізаних шарів:

а - схема послідовного накладення кромки фрези на профіль зубів колеса;  
б - робочі ділянки кромки, розташовані вище ( $b_i$ ) та нижче ( $a_i$ ) точок профілювання.

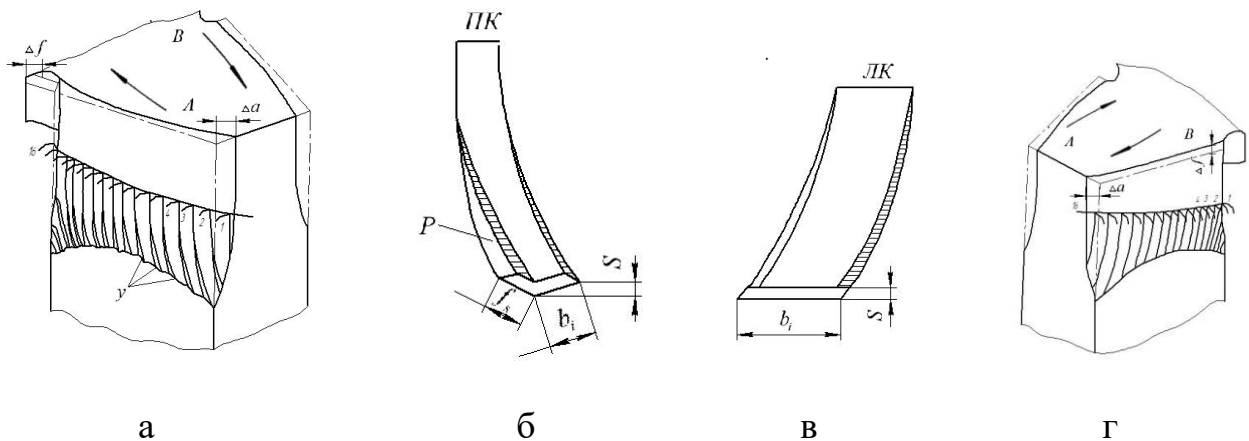


Рис. 2 – Форма шарів, зрізаних зубами правозахідної фрези з роздільною схемою формоутворення: а - утворення уступів (У) при роботі правого корпусу; б - форма шару, зрізаного зубами правого корпусу; в - форма шару, зрізаного зубами лівого корпусу; г - схема обробки поверхні зуба лівим корпусом

Схематично проекції траєкторій на різні координатні площини показані на рис. 3. Табл. 1 містить значення координати Х-проекцій траєкторій 3-х точок зубів фрези  $m = 28$  мм,  $z = 53$ .



Таблиця 1 - Значення координати X-проекцій траєкторій 3-х точок зубів фрези  $m = 28 \text{ мм}$ ,  $z = 53$

$r_{ki}$ , мм	$r_{ui}$ , мм	При куті повороту зуба $\alpha_i$ , град.						
		5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
$r_a - 10 \text{ мм} = 760$	113,5	0,309	0,629	0,971	1,345	1,763	2,321	2,769
$r_w = 742$	122,63	0,215	0,441	0,670	0,999	1,317	1,751	2,197
$r_b = 715,6$	140	0,048	0,108	0,197	0,325	0,536	0,754	1,119

На рис. 4 показані відхилення проєкцій траєкторій точок різальних кромek від площини профілювання в залежності від кута повороту фрези.

На ділянках (Рис. 5)  $KD$  і  $K'D'$  лінії зачеплення  $BE$  і  $B'E'$  в різанні беруть участь по одному зубу від кожного корпусу фрези, а на ділянках  $BK$ ,  $DE$ ,  $B'K$  і  $D'E'$  - по два зуби (рис. 5.а, позначено 1 і 2).

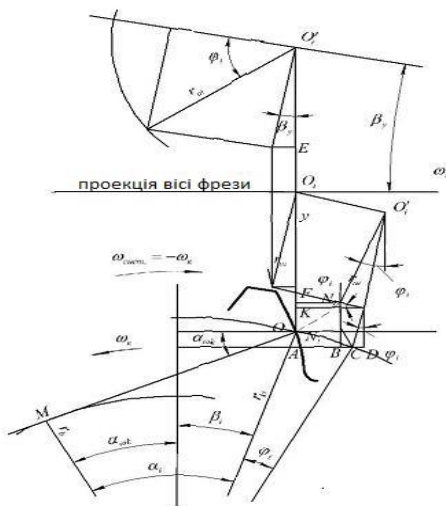


Рис. 3 – До виведення рівняння просторової кривої-траєкторії точки різальної кромки у відносному русі

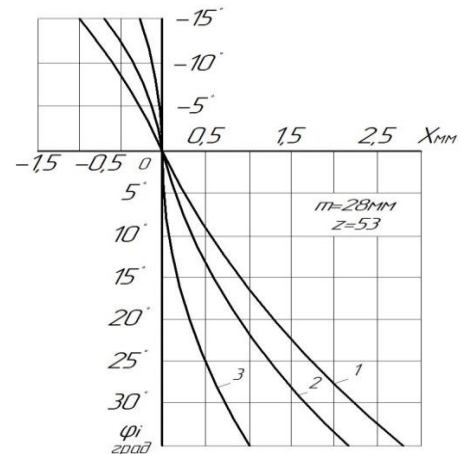


Рис. 4 – Відхилення проєкцій траєкторій точок різальних кромek від площини профілювання у залежності від кута повороту фрези. Зони обробки: 1 - вершина зубного колеса; 2 - дільний діаметр; 3 - основа зуба

Довжину ділянок  $KD$  і  $K'D$  можна визначити за формулою:

$$l_0 = \pi \cdot m \cdot \cos 20^\circ (2 - \pi b), \quad (3)$$

де  $\pi b$  – кількість витків фрези, що бере участь у різанні.

$$\pi b = \frac{r_b (tg \alpha_a - tg \alpha_b)}{P_b}. \quad (4)$$

Довжина ділянок  $KD$  і  $K'D$ , в залежності від кількості нарізаних зубів, зазвичай складає  $(0,25 - 0,5) \cdot P_b$ , де  $P_b$  – шаг зачеплення. Розрахуємо величину сумарних периметрів одночасно ріжучих кромek зубів для кожної з фрез при кількості зубів оброблюваного колеса  $Z_1 = 90$  і  $Z_2 = 270$  і модулі зубів  $m = 20 - 60 \text{ мм}$ .

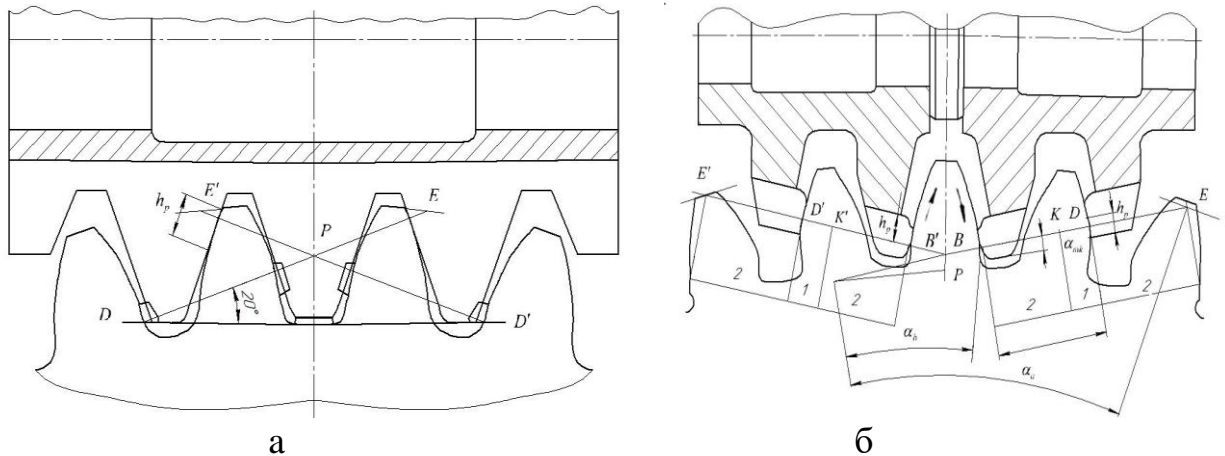


Рис. 5 – Визначення сумарного периметра одночасно ріжучих кромок: а - для черв'ячної фрези з роздільною схемою формоутворення; б - для стандартної фрези

Встановлено, що більш рівномірне завантаження зубів фрези по довжині зрізуваних шарів має місце при розподілі припуску еквідистантно евольвентної поверхні. Різниця в довжині зрізуваних шарів або шляху різання між першим і останнім зубами фрези незначна. Знос зубів фрези в цьому випадку буде більш рівномірним.

У третьому розділі розроблено математичну модель точності оброблення евольвентної поверхні шевронних зубів черв'ячними фрезами та впливу конструктивних параметрів і подачі фрези на величину хвилястості обробленої поверхні шевронних зубів.

Хвилястість (рис. 6, а) утворюється в результаті поздовжньої подачі  $S$  черв'ячної фрези на кожний оберт заготовки.

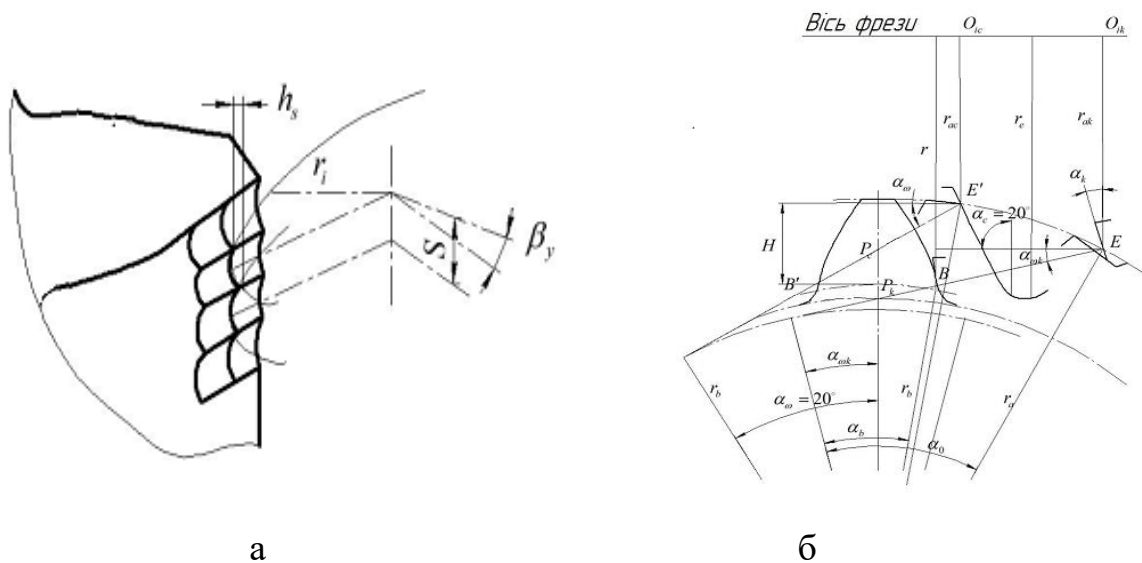


Рис. 6 – Визначення розрахункової (геометричної) величини хвилястості обробленої поверхні: а - схема утворення хвилі на бічній поверхні зуба колеса; б - визначення розміру радіусів обертання точок зубів фрези, що формують хвилю біля вершини зуба колеса

На рис. 7 показано залежність максимальної геометричної висоти хвилі від кількості зубів оброблюваного колеса. На рис. 8 показано графік для визначення максимальної розрахункової висоти хвилі при обробленні коліс із роздільною схемою різання.

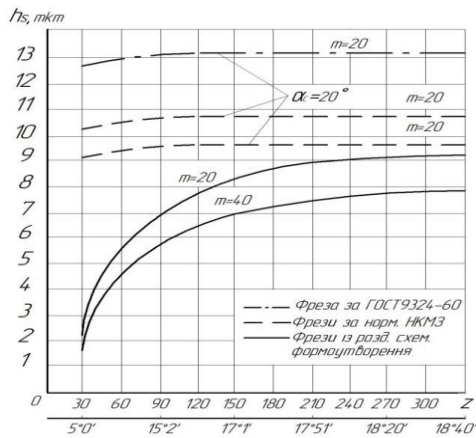


Рис. 7 – Залежність максимальної розрахункової висоти хвилі від кількості зубів нарізованого колеса для фрез різних виконань

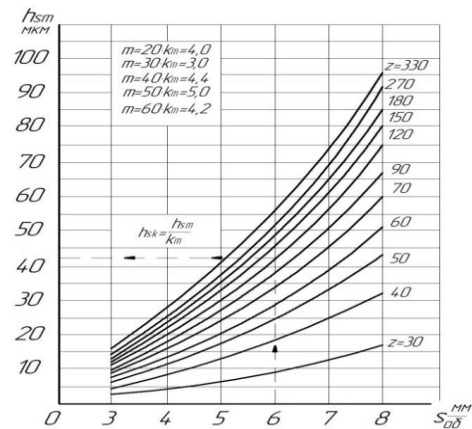


Рис. 8 – Графік для визначення максимальної розрахункової висоти хвилі при обробленні коліс із роздільною схемою формоутворення

Аналіз систематичних помилок профілювання та точності оброблення шевронних зубів архімедовими черв'ячними фрезами виконано методом профілювання фрез на основі архімедова черв'яка.

Профільний кут осьового перерізу архімедова черв'яка  $\alpha_4$  визначається за кутом нахилу дотичної до профілю осьового перерізу теоретичного евольвентного черв'яка на початковому циліндрі:

$$\operatorname{ctg} \alpha_4 = \operatorname{ctg} \alpha_0 \cdot \cos t_H; \quad (5)$$

де  $\alpha_0$  - профільний кут початкового контуру інструментальної рейки.

У затіланих черв'ячних фрезах, у зв'язку з наявністю гвинтових стружкових канавок, лівий і правий профільні кути зубів  $\alpha_u$  є неоднаковими та відрізняються від профільного кута основного архімедова черв'яка  $\alpha_4$ .

$$\operatorname{ctg} \alpha_{un} = \operatorname{ctg} \alpha_4 \pm \frac{K \cdot z_\phi}{T}, \quad (6)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha_{un} = \operatorname{ctg} \alpha_4 \mp \frac{K \cdot z_\phi}{T}, \quad (7)$$

де  $K$  – розмір затилування фрези;  $T$  - крок спіралі гвинтової стружкової канавки.

Фреза (рис. 9) складається з лівого і правого корпусів з конічною гвинтовою нарізкою одного напрямку в пазах якої монтуються твердосплавні непереточувані поворотні пластинки.

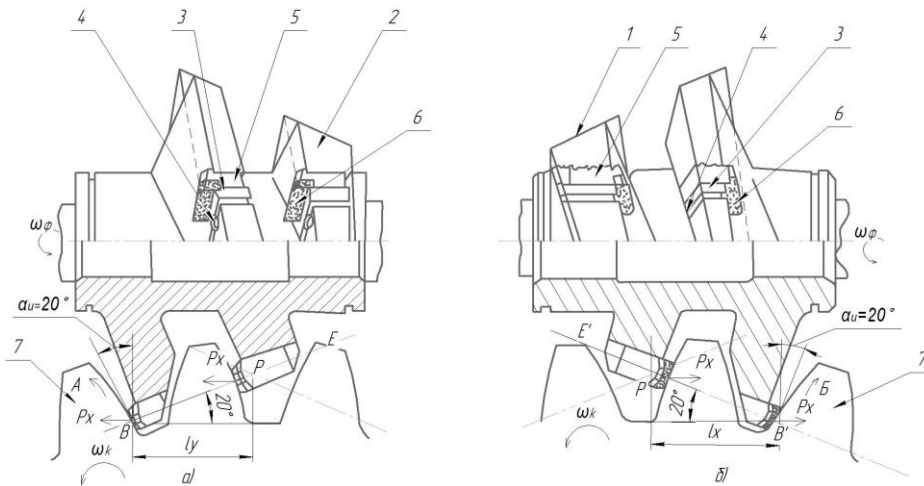


Рис. 9 – Двокорпусна універсальна фреза одно-стороннього різання: а) – правий корпус; б) – лівий корпус

Згідно з схемою зубооброблення, розробленою для цієї конструкції, кожен із корпусів фрези встановлюється окремо на зубофрезерній оправці зі зміщенням відносно міжосьового перпендикуляру  $OO'$  пари «інструмент - деталь» на відстань  $l_\gamma$  (рис.10, а, б), визначену точкою В (В') перетинання окружності нижньої граничної точки евольвенти зубів і лінії верстатного зачеплення ВЕ (В' Е'). Установлювальна відстань не залежить від кількості зубів оброблюваного колеса.

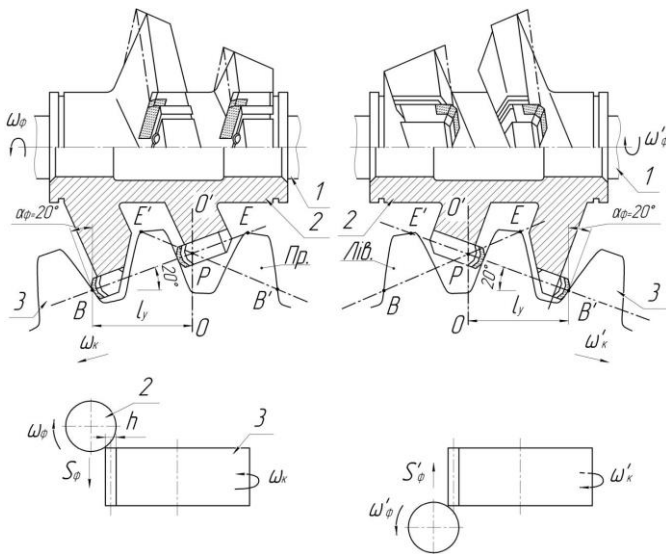


Рис. 10 – Схема оброблення зубів колеса одним правим корпусом фрези: а), с) – правий корпус при зустрічному фрезеруванні; б), d) - правий корпус при попутному фрезеруванні

Установлювальна відстань визначається за формулою:

$$l_\gamma = \frac{h_f - xm - r_\phi(1 - \sin\alpha_0)}{\operatorname{tg}\alpha_0} \quad (9)$$

де  $x$  – коефіцієнт зміщення вихідного контуру зубчастої рейки;  $m$  – модуль зубів колеса.

Для підвищення економічності використанні інструменту, обробку обох бічних поверхонь зубів колеса можна здійснювати тільки одним, наприклад, правим корпусом фрези, по черзі зміщуючи його вліво та вправо на зуборізальній оправці. У цьому випадку (рис.10) при обробці лівих бічних поверхонь є необхідним реверс напрямку обертання інструменту  $\omega_\phi$  та колеса  $\omega_\kappa$ , а обробка здійснюється при попутному фрезеруванні.

Застосування розроблених схем попереднього лезового оброблення зубів загартованих коліс твердосплавними фрезами дозволяє зменшити трудомісткість малопродуктивних зубошліфувальних операцій, у залежності від модуля колеса, в 3 - 4 рази за рахунок зменшення припуску з 1,5 - 2,5 мм на бік зуба до 0,3 - 0,5 мм.

З метою дослідження напружено-деформованого стану леза фрези, силових параметрів процесу обробки, зміни крутного моменту фрези методом кінцевих елементів (пакет DEFORM-3D) проводилося моделювання процесу зубонарізання великомодульних коліс із загартованої сталі інструментом із твердого сплаву. При типовій схемі використання інструменту за перші 2 секунди  $M_{кр}$  зростає до величини близько 250 - 260 Н·м із подальшою стабілізацією цього значення у період, на протязі якого активною є один зуб фрези, а товщина зрізу, що визначає навантаження на інструмент, залишається постійною. Зі збільшенням периметру активних ділянок відбувається дискретне зростання крутного моменту до величини  $M_{кр} = 780$  Н·м. Аналіз результатів моделювання напружено - деформованого стану леза інструменту показав, що у початковий момент врізання та в умовах, коли товщина зрізу досягає максимального значення (0,15 мм) еквівалентні (за Писаренко - Лебедєвим) напруження  $\sigma_{eq} = \chi \cdot \sigma_{ef} + (1 - \chi) \cdot \sigma_1 \leq R_m$  в небезпечних зонах складають 900 МПа та 725 МПа відповідно. Дані величини менші за критерій руйнування – межу міцності на розтяг  $R_m = 1600$  МПа, що свідчить про можливість реалізації обробки загартованих сталей пропонованим інструментом (рис. 11).

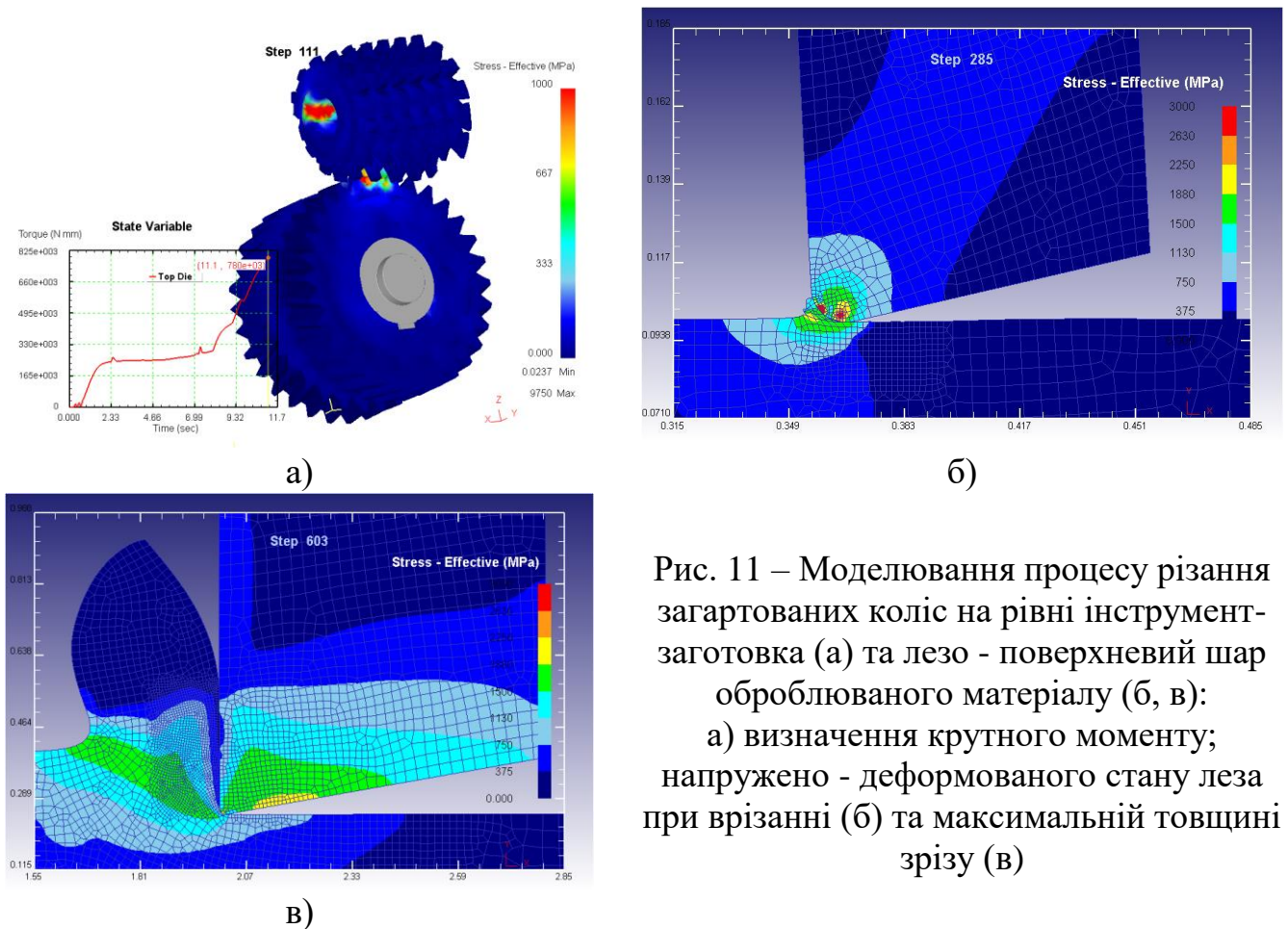


Рис. 11 – Моделювання процесу різання загартованих коліс на рівні інструмент-заготовка (а) та лезо - поверхневий шар оброблюваного матеріалу (б, в): а) визначення крутного моменту; напружено - деформованого стану леза при врізанні (б) та максимальній товщині зрізу (в)

У четвертому розділі розроблено методику процесу проведення експериментальних досліджень. При порівняльних дослідженнях обробки коліс черв'ячними фрезами  $m=20\text{мм}$  для стандартної фрези була застосована схема чистового зубофрезерування (рис. 12), коли в роботі беруть участь бічні і вершинні кромки зубів. Припуск, що зрізався, при цьому становив  $0,45\text{ мм}$  на бічній поверхні зубів і  $0,6\text{ мм}$  на дні западин зубів.

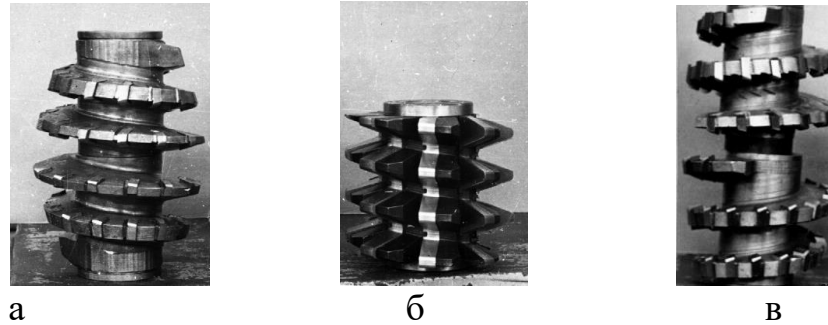


Рис. 12 - Експериментальний зубофрезерний інструмент:  
 а – черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення  $m = 20\text{мм}$ ;  
 б – стандартна черв'ячна фреза  $m=20\text{ мм}$  (ГОСТ 9324 -80);  
 в - черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення  $m = 28\text{ мм}$

Вимірювання зносу зубів фрез здійснювалося за допомогою відлікового мікроскопу з ціною поділки шкали  $0,05\text{ мм}$ . Знос зубів фотографувався під мікроскопом.

На рис. 13 показана залежність середніх крутних моментів  $M_{к.ср.}$  і середньої потужності, що споживається верстатом  $N_{ст.ср}$  (рис.14), від подачі при нарізуванні зубів  $m = 20\text{ мм}$  черв'ячною фрезою з роздільною схемою формоутворення і фрезою стандартної конструкції.

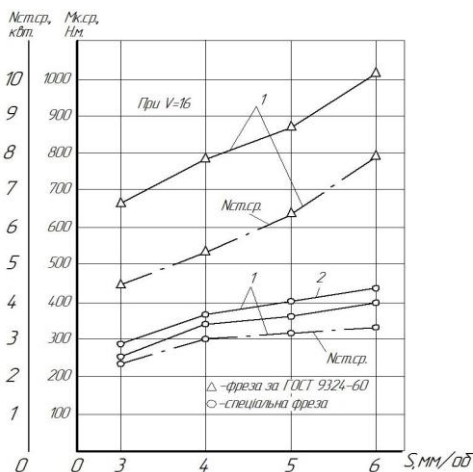


Рис. 13 – Залежність середнього крутного моменту  $M_{к.ср.}$  та середньої споживаної верстатом потужності  $N_{ст.ср}$  від подачі черв'ячних фрез  $S$  при оброблюванні колеса  $m = 20\text{ мм}$ ,  $z = 95$ : 1-зустрічне фрезерування; 2 - попутне фрезерування

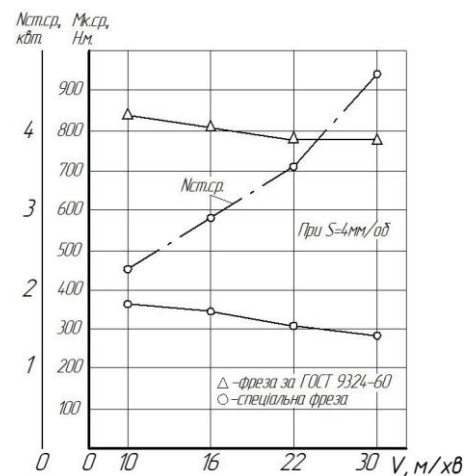


Рис. 14 – Залежність середнього крутного моменту  $M_{к.ср.}$  від швидкості різання при зустрічному зубофрезеруванні колеса  $m = 20\text{ мм}$ ;  $z = 96$

Зі збільшенням подачі середні крутні моменти збільшуються, більш інтенсивно для стандартної фрези, що, вочевидь, пов'язане з більшим зростанням товщин стружок, зрізаних вершинними кромками її зубів. В діапазоні подач 3 - 6 мм/об, при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення середня споживана верстатом потужність у 1,8 - 2,4 рази менша, ніж при роботі стандартною фрезою.

Вивчення осцилограм показало, що коефіцієнт нерівномірності фрезерування  $K_n$ , при нарізуванні коліс як стандартними фрезами, так і фрезами з роздільною схемою формоутворення, знаходиться в межах  $K_n = 2,4-2,8$ , дорівнюючи в середньому 2,6.

Зона найбільшого зносу різальної кромки для зубів правого корпусу розташована ближче до забірної фаски, кромка бере участь у різанні не всією довжиною. Знос кромки зубів лівого корпусу (рис. 15, б) є більш рівномірним, кромка бере участь у різанні практично всією довжиною.

На рис. 16 показано стружку, що зрізана фрезою з роздільною схемою формоутворення. Ширина стружки не перевищує довжину різальної кромки зубів фрези і дорівнює 14-18 мм.

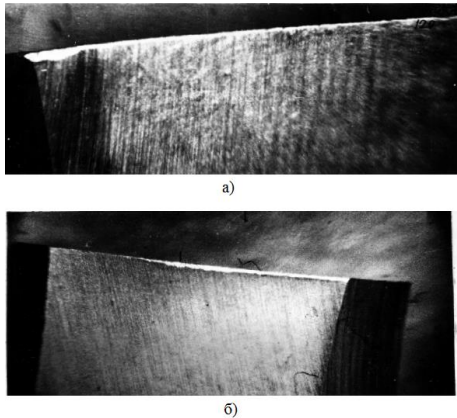


Рис. 15 – Типовий знос зубів фрези з роздільною схемою формоутворення по заднім граням після оброблення зубчастого вінця  $m = 20$  мм;  $z = 316$ ;  $b = 800$  мм: а - зуб правого корпусу; б - зуб лівого корпусу



Рис. 16 – Стружка, що зрізується фрезою з роздільною схемою формоутворення, при оброблюванні зубчастих вінців  $m = 20$  мм;  $z = 316$ .  
Режими різання -  $\Delta = 0,65$  мм

Обробка вінців фрезою з роздільною схемою формоутворення здійснюється в наступних режимах різання:  $\Delta = 0,5 - 0,8$  мм;  $S = 3,5 - 4$  мм/об;  $V = 0,8$  м/с, машинний час обробки складає 57 годин. Параметри фрези (рис. 17):  $\gamma = 7^\circ$ ;  $\alpha_\delta = 10^\circ$ ;  $\lambda_\delta = 10^\circ$ ;  $Z_\phi = 16$ ;  $D_\phi = 310$  мм; матеріал зубів - сталь Р18. На рис. 18 наданий графік зносу зубів фрези після обробки одного вінця. Основна кількість зубів має знос, як правило, в межах 0,15 - 0,8 мм.

Про наявність застійної зони та її захисний ефект свідчить відсутність помітного зносу передньої поверхні зубів навіть при значному (35 - 50 годин) часі роботи фрези. Поблизу різальної кромки помітні частинки металу, що приліпився. Це, вочевидь, є наслідком адгезійного зчеплення оброблюваного матеріалу та матеріалу різальної частини інструменту.

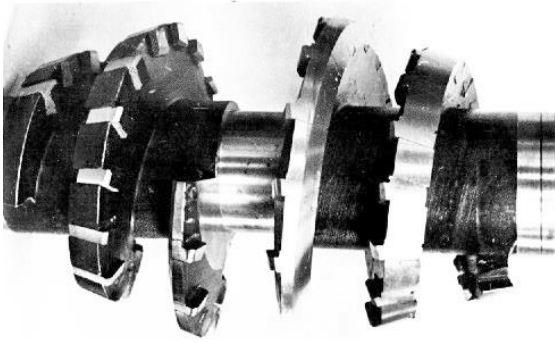


Рис. 17 – Черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення  $m = 28\text{мм}$

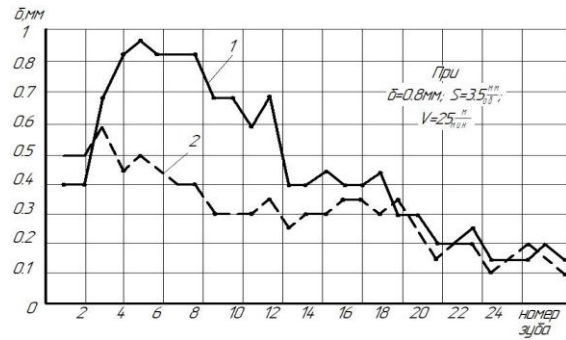


Рис. 18 – Графік зносу зубів фрези з роздільною схемою формоутворення по заднім граням після обробки зубчастого вінця  $m = 28\text{мм}$ ;  $z = 284$ ;  $b = 1000\text{мм}$ :  
1-правий корпус фрези; 2- лівий корпус фрези

У п'ятому розділі викладено експериментальні дослідження точності і якості процесу зубофрезерування загартованих шевронних коліс черв'ячними фрезами

При дослідженні шорсткості оброблених поверхонь колісних зубів колеса, в якості інструментів були використані чистова черв'ячна фрези  $m = 20\text{ мм}$ , черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення (рис. 19). Вимірювання шорсткості виконано за допомогою електронно-щупового пристрою, параметри зуба вимірювалися електронним зубоміром (рис. 20).

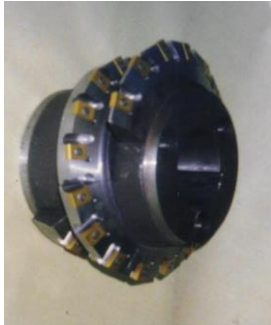


Рис. 19 – Евольвентна черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення  $m = 20\text{ мм}$

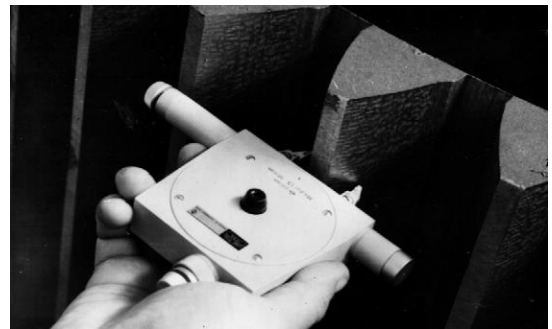


Рис. 20 – Контроль профілю зубів за допомогою оптичного зубоміра

Для визначення мікротвердості окремих ділянок обробленої поверхні із зубів експериментальних коліс вирізано зразки. Мікротвердість вимірювалася на приладі 1МГ-3. Мікроструктуру поверхневого шару металу зубів фотографували зі збільшенням під мікроскопом МИМ-8М.

Послідовність проведення дослідів та обробка отриманих даних проводилися за допомогою математичного методу планування екстремальних експериментів.

Поверхня зуба (рис. 21), яка оброблена черв'ячною фрезою, має ямкоподібний рельєф. Краї ямок мають більш блискучий вигляд, що свідчить про певний наклеп обробленої поверхні у місцях входу зубів фрези до металу заготовки. На рис. 21 блискучі ділянки поверхні виглядають як темні смужки, а матові – як світлі.



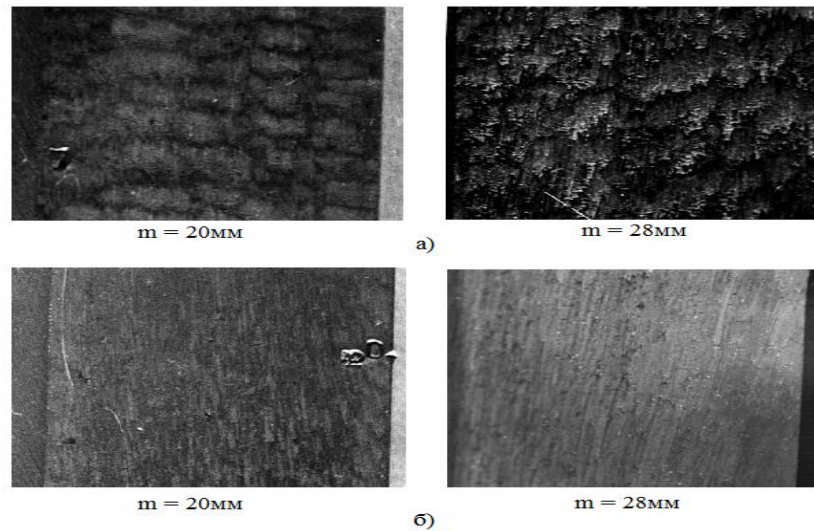


Рис. 21 – Вид бічної поверхні зубів коліс  $m = 20$  мм й  $m = 28$  мм ( $\Delta = 0,5$ м;  $S = 4$  мм/об;  $V = 1,0$  м/с): а - оброблення стандартною фрезою; б - оброблення фрезою з роздільною схемою формоутворення

Глибина поширення наклепу для стандартної фрези становить 0,15 - 0,13 мм, а для фрези з роздільною схемою формоутворення - 0,1 - 0,12 мм (табл. 3).

Таблиця 3 – Шорсткість оброблення при різних задніх кутах зубів фрези з роздільною схемою формоутворення

$R_z$ , мкм				
При задніх кутах зубів $\alpha_\delta$ , град.				
3°	5°	7°	10°	14°
19 - 34	18 - 35	22 - 34	25 - 39	28 - 46

Профільний кут нахилу зубів  $\alpha_k$  (рис. 22,а), незалежно від кількості зубів нарізаного, колеса не змінюється.

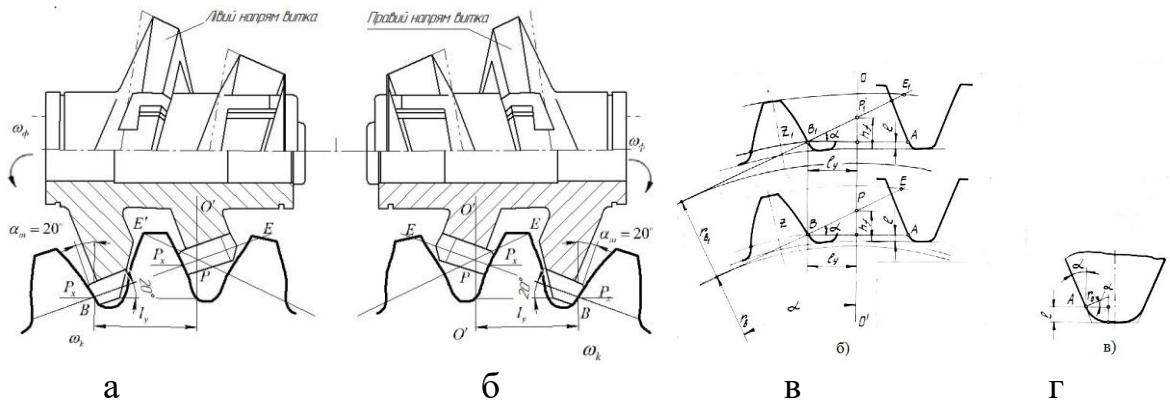


Рис. 22 – Новий спосіб обробки зубів черв'ячною фрезою з роздільною схемою формоутворення: а - схема установлювання фрези; б - зв'язок установлювальної відстані з кількістю зубів колеса; в - параметри вершини зуба чорнової фрези

Кожний з корпусів установлюється на оправці з перетином міжосьового перпендикуляру  $00'$  на відстань  $l_y$ , яка визначається точкою В (В') перетину кола  $r_B$  нижньої граничної точки евольвенти зубів і лінії верстатного зачеплення ВЕ (В'Е').

На рис. 22, б наведені графічні побудовання, які показують, що розміри установлювальної відстані  $l_y$  не залежать від кількості зубів оброблюваного колеса. Величина  $l_y$  визначається профільним кутом початкового контуру зубчастої рейки, висотою ніжки зуба  $h_f$  і відстанню  $l$  від точки А до початку заокруглення головки зуба чорнового інструменту до її вершини. Ці параметри залежать тільки від модуля і співвідношення корекції колісних зубів.

Виходячи з рис. 22, б установлювальну відстань  $l_y$  можна визначити за формулою:

$$l_y = \frac{h_f - l}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{h_f - r_\phi(1 - \sin\alpha)}{\operatorname{tg}\alpha}, \quad (10)$$

де  $r_\phi$  - радіус заокруглення зуба чорнової фрези біля вершини.

Для випадку оброблення коригованих коліс відстань  $l_y$  можна визначити за формулою:

$$l_{yx} = \frac{h_f - xm - l}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{h_f - xm - r_\phi(1 - \sin\alpha)}{\operatorname{tg}\alpha}, \quad (11)$$

де  $x$  - коефіцієнт зміщення початкового контуру, який підставляється до формули зі своїм знаком.

Для коліс із початковим контуром зубчастої рейки згідно з ГОСТ 13755-81, де  $\alpha = 20^\circ$ ;  $h_f = 1,25m$ , и при  $r_\phi = 0,3m$ , формули (10) і (11) спрощуються та мають вид:

$$l_y = 2,892m, \quad (12)$$

$$l_{yx} = \frac{m(1,052 - x)}{0,363910}, \quad (13)$$

Оснащення черв'ячних фрез твердосплавними непереточуваними пластинами слід розглядати як один із шляхів підвищення стійкості інструменту. запропонованої конструкції надзвичайно економічні, оскільки не вимагають для своєї експлуатації спеціальних заточувальних верстатів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача спрямована на підвищення продуктивності обробки великомодульних зубчастих коліс. В результаті вирішення поставленої задачі підвищена в 3-4 рази продуктивність чистового зубофрезерування загартованих шевронних зубчастих коліс,  $m = (12 \dots 36)$  мм,  $D = (400 \dots 2000)$  мм, черв'ячними модульними фрезами з роздільною схемою формоутворення, а також підвищена в 1,2 рази точність обробки та якості оброблених поверхонь.

1. Проведено дослідження схеми різання та завантаження зубів фрези в

контактному полі різання; траєкторій руху зубів фрези та їх впливу на товщину зрізаних шарів, знос інструменту і якість обробленої поверхні.

2. Розроблено метод профілювання та проектування теоретично точних черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення та модель формоутворення евольвентної поверхні зубів загартованих великомодульних шевронних коліс при зустрічному зубофрезеруванні з роздільною схемою різання з розташуванням зрізувальних лез по лінії зачеплення.

3. За результатами порівняльних досліджень динаміки чистового зубофрезерування великомодульних коліс зі стандартними черв'ячними фрезами і фрезами з роздільною схемою формоутворення в широкому діапазоні змін режимів різання запропоновані: нова конструкція черв'ячної фрези з роздільною схемою формоутворення, яка виключає систематичні похибки профілювання; рівняння траєкторії руху зубів фрези та аналіз впливу траєкторій на різальні здібності інструменту та якість обробленої поверхні.

Досліджено вплив технологічних факторів обробки на крутний момент, колову силу та потужність різання.

4. За результатами порівняльних дослідження зносу та стійкості стандартних фрез і фрез з роздільною схемою формоутворення при обробленні шевронних коліс визначено, що процес різання фрезами з роздільною схемою формоутворення в порівнянні зі стандартними фрезами відбувається у більш сприятливих умовах, про що свідчить менша глибина наклепу поверхневого шару оброблених зубів.

5. Результати роботи впроваджені на ТОВ «КЗМО» (м. Костянтинівка), АТ «Турбоатом» (м. Харків), що дозволило підвищити якість виготовлення загартованих зубчатих передач зі збільшенням продуктивності. Зокрема, на ТОВ «КЗМО» очікуваний економічний ефект впровадження складає 145045 грн на рік.

6. На основі проведених досліджень розроблені рекомендації щодо режимів різання фрезами з роздільною схемою формоутворення та розроблено методіку розрахунку установлювальної відстані корпусів фрези.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Публікації, що входять до переліку наукових фахових видань:*

1. Камчатная - Степанова Е. В. Анализ механизмов реализации производственной деятельности промышленного предприятия. / Ю. А. Клочко, Е. В. Камчатная - Степанова, Н. Г. Сикетина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4 (1113). – С. 76 - 78. *(Здобувачем проведено аналіз перспективних напрямків вдосконалення і розвитку механізмів реалізації виробничої діяльності промислового підприємства).*

2. Камчатная - Степанова Е. В. Моделирование синергетических стратегий развития производственно - экономических систем. [Монографія] / Ю. А. Клочко, Е. В. Камчатная - Степанова, Н. Г. Сикетина, И. Н. Кравцов // Донбасская государственная машиностроительная академия, - Краматорск: ДГМА; Ирбит; НИКС, 2015. – 221 с. *(Здобувачем виконано трактування і визначення*

*особливостей моделювання розвитку машинобудування із застосуванням апарата синергетичної теорії).*

3. Камчатна - Степанова К. В. Дослідження методів і умов формоутворення різальних елементів твердосплавного інструменту для фрезерної обробки композиційних неметалевих матеріалів. / А. О. Скоркін, О. Л. Кондратюк, О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова // Збірник наукових праць. Машинобудування. – Харків: УПА, 2019. – № 23. – С. 32 – 42. *(Здобувачем виконано аналіз методів і умов формоутворення різальних елементів твердосплавного інструменту для фрезерної обробки).*

4. Камчатна - Степанова К. В. Технологічні засоби обробки крупногабаритних евольвентних шліцьових з'єднань з модифікацією зуборізного інструменту. / О. О. Анділахай, О. О. Ключко, К. В. Камчатна - Степанова, О. П. Старченко // Наука та виробництво. Машинобудування і зварювальне виробництво. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2019. – № 20. – С. 53 - 66. *(Здобувачем запропоновано модифікацію зуборізного інструменту).*

5. Камчатна - Степанова К. В. Забезпечення якості швидкорізального інструменту при плоскому шліфуванні. / А. О. Скоркін, О. Л. Кондратюк, О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова // Збірник наукових праць. Машинобудування. – Харків: УПА, 2020. – №25. – С. 79 - 89. *(Здобувачем виконано аналіз методів забезпечення якості швидкорізального інструменту).*

6. Камчатна - Степанова К. В. Дослідження впливу технологічних режимів фрезування на рівень вібрації шпиндельного вузла обробного центру. / А. О. Скоркін, О. Л. Кондратюк, О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: «Технології в машинобудуванні». - Харків: НТУ «ХП», 2020. – № 1. – С. 58 - 63. *(Здобувачем виконано дослідження впливу режимів фрезування на рівень вібрації шпиндельного вузла).*

7. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Analytical approach to determination of surface strengthening of chevron gears. // Вісник Тернопільського національного технічного університету - Тернопіль: ТНТУ, 2021. – том № 2 (102). - С. 5 – 12.

8. Камчатная - Степанова Е.В. Повышение эффективности фрезерования за счет использования систем динамического контроля производительности. / А. Скоркин, О. Кондратюк, Е. Старченко, Е. Камчатная - Степанова // Збірник наукових праць. Машинобудування. - Харків: УПА, 2021. – №27. – С.76 - 86. *(Здобувачем удосконалено процес фрезерування за рахунок систем динамічного контролю продуктивності).*

**Публікації у закордонних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз**

9. Камчатная – Степанова Е В. Современные методы технологии формообразования крупномодульных зубчатых колес. / А. Klochko, A. Skorkin, K. Kamchatna - Stepanova, E. Starchenko, M. Ishchenko // Znanstvena misel journal - Ljubljana, Slovenia, 2020. - № 48. – С. 25 - 26. *(Google scholar).* *(Здобувачем виконано аналіз сучасних методів формоутворення великомодульних зубчастих коліс).*

10. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Modern methods of gear milling of hardened large-module gears / Kateryna Kamchatna - Stepanova, Oleksandr Klochko // Periodyk

Naukowy Akademii Polonijnej - Czestochowa, Poland, 2020. - № 6 (43). - С. 312 – 324. (*Index Copernicus, ISSN 1895-991*). (Здобувачем удосконалено методи зубчастого фрезерування загартованих великомодульних шевронних коліс).

11. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Ensuring the High Strength Characteristics of the Surface Layers of Steel Products. / Kateryna Kostyk, Viktoriia Kostyk, Oleg Akimov, Kateryna Kamchatna - Stepanova, Yurii Shyrokyi // Lecture Notes in Mechanical Engineering - Germany: Springer Verlag, 2021. – С. 211 - 216 (*Scopus, ISSN 2195-4356*) (Здобувачем удосконалено процес підвищення працездатності накатних роликів).

12. Kamchatna - Stepanova K. Influence of waviness parameters on the operational properties of cylindrical large-modular gears. / K. Kamchatna - Stepanova, A. Klochko, A. Naydenko, A. Manokhin // International journal of engineering and advanced technology studies. - London. United Kingdom, 2021. – Vol. 9, Issue 1. – № 9. - P. 30 – 37. (*Index Copernicus, ISSN 2053-5791*) (Здобувачем розроблено алгоритм розрахунку сумарної хвилястості поверхні зубчатих коліс).

**Публікації апробаційного характеру:**

13. Камчатна - Степанова К. В. Технологія ремонту та відновлення крупномодульних загартованих зубчастих коліс методом високошвидкісної лезової обробки. / О. О. Клочко, О. О. Анциферова, Д. О. Лисиця, К. В. Камчатна - Степанова // Dynamics of the development of world science. Abstracts of the 6th International Scientific and Practical Conference. Perfect Publishing. - Vancouver, Canada, 2020, February 19 - 21. – P.628 - 636. (Здобувачем запропоновано методику процесу високошвидкісної лезової обробки великомодульних загартованих зубчастих коліс).

14. Камчатная - Степанова Е. В. Анализ современных конструкций инструментов для нарезания крупномодульных шевронных колес. / А. А. Клочко, А. Ю. Заковоротный, О. А. Анцыферова, Е. В. Камчатная - Степанова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали ХІХ Міжнародної науково - технічної конференції 01 – 04 червня 2021 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2021. – С. 68 - 70. (Здобувачем виконано аналіз застосування інструментів для нарізування великомодульних шевронних коліс).

15. Камчатна - Степанова К. В. Технологія експериментальних досліджень високопродуктивного зубофрезерування загартованих крупномодульних зубчастих коліс. / О. О. Анциферова, К. В. Камчатна - Степанова, Я. В. Васильченко, М. В. Шаповалов, Я. С. Антоненко // Scientific achievements of modern society. Abstracts of the 6th International Scientific and Practical Conference. - Liverpool, United Kingdom: Cognum Publishing House, 2020. – P. 418 - 423. (Здобувачем розроблено методику експериментальних досліджень високопродуктивного зубофрезерування загартованих великомодульних зубчастих коліс).

16. Камчатная - Степанова Е. В. Технологические основы зубофрезерования шевронных закаленных колес с отдельной схемой формообразования. / А. А. Пермяков, А. А. Клочко, Е. П. Старченко, Е. В. Камчатная - Степанова, С. П. Сапон // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем - 2019: Матеріали тез доповідей ІХ Міжнародної науково - практичної конференції. м. Чернігів, 14 – 16 травня 2019 р. Чернігівський національний технологічний

університет / відп. за вип. А. М. Єрошенко [та ін.]. – Чернігів: ЧНТУ, 2019. – Т. 1. – С. 117 - 119. *(Здобувачем запропоновано формоутворення шевронних загартованих коліс з роздільною схемою різання).*

17. Камчатна - Степанова К. В. Дослідження фрезерної обробки композиційних матеріалів. // Abstracts of the VIIIth International Scientific and Practical Conference «Modern problems in science», November 09 - 12, 2020 - Prague, Czech Republic, 2020. – С. 663 - 664.

18. Камчатна – Степанова К. В. Підвищення точності, якості та продуктивності обробки крупногабаритних евольвентних шліцьових поверхонь. / О. Ю. Заковоротний, О. О. Клочко, О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова, О. А. Анциферова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали ХІХ Міжнародної науково - практичної конференції 04 - 07 липня 2019 р. / за заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019, - С. 36 - 37. *(Здобувачем виконано аналіз методів підвищення точності обробки великогабаритних евольвентних шліцьових поверхонь).*

19. Камчатная - Степанова Е. В. Анализ перспективных технологических схем зубофрезерования крупномодульных шевронных закаленных колес. / В. Ф. Новиков, А. А. Клочко, Е. В. Камчатная - Степанова // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо - и энергосбережении: материалы международной научно-технической конференции, 16 - 18 мая 2019 г. – Одесса: ОНПУ, 2019. – С. 124 - 129. *(Здобувачем запропоновано схему зубофрезерування великомодульних шевронних загартованих коліс).*

20. Камчатная - Степанова Е. В. Технологические методы скоростного зубофрезерования крупномодульных шевронных зубчатых колес. / А. А. Клочко, Е. В. Басова, Е. В. Камчатная - Степанова // Праці ХХІХ Міжнародної конференції «Нові технології в машинобудуванні», 2 - 8 вересня 2019 р. – Коблево – Харків: НАКУ «ХАІ», 2019. – С. 7. *(Здобувачем виконано аналіз методів швидкісного зубофрезерування великомодульних шевронних зубчастих коліс).*

21. Камчатная - Степанова Е. В. Влияние технологического воздействия на обеспечение эксплуатационных свойств тяжело нагруженных крупномодульных закаленных шевронных зубчатых колес. / А. А. Клочко, О. А. Анциферова, Е. В. Камчатная - Степанова // Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали шостої міжнародної науково- технічної конференції (27 - 29 листопада 2019 року). Харків - Краматорськ – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – С. 50 - 51. *(Здобувачем виконано аналіз впливу на забезпечення експлуатаційних властивостей важконавантажених великомодульних загартованих шевронних зубчастих коліс).*

22. Камчатна - Степанова К. В. Сучасний метод забезпечення точності виготовлення евольвентних крупногабаритних шліцьових з'єднань. / О. А. Пермяков, О. О. Клочко, О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова // Прогресивні технології в машинобудуванні: збірник наукових праць ІХ - ої Міжнародної науково-технічної конференції. 03 - 07 лютого 2020 року. Львів - Плай. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2020. – С. 138. *(Здобувачем розроблено методуку забезпечення точності виготовлення евольвентних з'єднань).*

23. Kamchatna - Stepanova K. Methodology for the development of a model for

managing the quality and productivity of shaping when processing hardened coarse-modular gears. / V. Kovalov, Y. Vasylychenko, M. Shapovalov, O. Antsyferova, K. Kamchatna - Stepanova // Інформатика, управління та штучний інтелект. Тези сьомої міжнародної науково-технічної конференції (17 - 19 листопада 2020 р.). Харків - Краматорськ – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. - С. 36 - 38. *(Здобувачем запропоновано модель управління якістю формотворення шевронних зубчатих коліс).*

24. Камчатная - Степанова Е. В. Перспективные схемы зубофрезерования крупномодульных закаленных шевронных колес с отдельной схемой формообразования. // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVIII Міжнародної науково - технічної конференції 21 - 24 грудня 2020 р. / за заг. редакцією В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2020. - С. 36. *(Здобувачем запропоновано схеми зубофрезерування великомодульних загартованих шевронних коліс).*

25. Камчатна - Степанова К. В. Особливості організації педагогічної взаємодії викладача із здобувачами технічної освіти в галузях металургії та машинобудування. / К. В. Камчатна - Степанова, М. М. Ямшинський // Scientific and pedagogical intership «Mastery of the organization of pedagogical interaction between a teacher and engineering students. The experience of EU countries». February 15-March 26, 2021 Wloclawek, Republic of Poland, 2021. - С. 33 - 36. (ISBN 978-9934-26-056-8). *(Здобувачем запропоновано методику організації педагогічної взаємодії викладача із здобувачами технічної освіти в галузі машинобудування).*

26. Камчатна - Степанова К. В. Моделирование технологических процессов обработки великомодульных зубчатых колес. / К. В. Камчатна - Степанова, О. О. Клочко, В. Д. Ковальов, Я. В. Васильченко, С. П. Сапон // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021): матеріали тез доповідей XI Міжнародної науково - практичної конференції, 26 – 27 травня 2021 р., м. Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка». – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – Т. 1. – С. 73 - 74. *(Здобувачем запропоновано процес моделювання оброблення великомодульних зубчастих коліс).*

## АНОТАЦІЯ

**Камчатна - Степанова К. В. Підвищення ефективності механічного оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс при швидкісному зубофрезеруванні.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти (13 – механічна інженерія). – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2021р.

Дисертацію присвячено розробці процесів підвищення ефективності механічного оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс спеціальними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні, що є актуальним завданням сучасного машинобудування.

Досліджена та реалізована схема процесу різання черв'ячними фрезами з

роздільною схемою формоутворення за рахунок контактної області різання фрези. Розроблено геометричну модель кінематики процесу оброблення зубів черв'ячною фрезою з диференціацією роботи різання кожним з її зубів у контактній області різання та з'ясовано характер врізання зубів фрези в метал заготовки. Аналіз процесу врізання зубів розглядається як траєкторії руху будь-якої точки різальної кромки кожного з них у кінематиці взаємних рухів інструменту та заготовки.

Досліджено вплив траєкторій руху різальних кромок зубів фрези на товщину зрізуваних шарів, знос фрези, на хвилястість і шорсткість обробленої поверхні зубів колеса. Також розроблено математичну модель розрахунку ефективності фрез із роздільною схемою формоутворення в діапазоні кількостей зубів  $z = 30 - 90$ , де при значно меншому, ніж для стандартних фрез профільному куті зубів, розрахункова висота хвилі в 2,5 рази менше, що свідчить про можливість суттєвого підвищення подачі інструмента.

Розроблено математичну модель розрахунку систематичних помилок профілювання та точності оброблення шевронних зубів архімедовими черв'ячними фрезами за рахунок порівняльного теоретичного аналізу органічних похибок профілювання великомодульних черв'ячних фрез зі стандартним профільним кутом оригінального контуру інструментальної рейки та спеціальних черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення зі зменшеним профільним кутом оригінального контуру.

Розроблено методику проведення експериментальних досліджень різальних властивостей черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення.

За наслідками експериментальних та виробничих досліджень отримані залежності, які характеризують динаміку процесу різання новим інструментом, його ріжучі здатності, а також вплив факторів на хвилястість, шорсткість і точність обробленої поверхні зубів. Розроблено практичні рекомендації щодо використання.

*Ключові слова:* великомодульні шевронні колеса, механічне оброблення, швидкісне зубофрезерування, кінематика процесу, черв'ячні фрези, роздільна схема різання.

## АННОТАЦІЯ

**Камчатная - Степанова Е. В. Повышение эффективности механической обработки закаленных крупномодульных шевронных колес при скоростном зубофрезеровании.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 - процессы механической обработки, станки и инструменты (13 - механическая инженерия). - Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2021 г.

Диссертация посвящена разработке процессов повышения эффективности механической обработки закаленных крупномодульных шевронных колес специальными фрезами при скоростном зубофрезеровании, что является актуальной задачей современного машиностроения.

Исследована и реализована схема процесса резания червячными фрезами с раздельной схемой формообразования за счет контактной области резания фрезы.



Разработана геометрическая модель кинематики процесса обработки зубов червячной фрезой с дифференциацией работы резания каждым из ее зубов в контактном поле резания и выяснено характер врезки зубьев фрезы в металл заготовки. Анализ процесса врезки зубьев рассматривается как траектории движения любой точки режущей кромки каждого из них в кинематике взаимных движений инструмента и заготовки.

Исследовано влияние траекторий движения режущих кромок зубьев фрезы на толщину срезаемого слоя, износ фрезы, на волнистость и шероховатость обработанной поверхности зубьев колеса. Также разработана математическая модель расчета эффективности фрез с отдельной схемой формообразования в диапазоне количеств зубов  $z = 30 - 90$ , где при значительно меньшем, чем для стандартных фрез профильном угле зубов, расчетная высота волны в 2,5 раза меньше, что свидетельствует о возможности существенного повышения подачи инструмента.

Разработана математическая модель расчета систематических ошибок профилирования и точности обработки шевронных зубов архимедова червячными фрезами за счет сравнительного теоретического анализа органических погрешностей профилирования крупномодульных червячных фрез со стандартным профильным углом оригинального контура инструментальной рейки и специальных червячных фрез с отдельной схемой формообразования с уменьшенным профильным углом оригинального контура.

Разработана методика проведения экспериментальных исследований режущих свойств червячных фрез с отдельной схемой формообразования. Разработаны практические рекомендации по использованию.

Ключевые слова: крупномодульные шевронные колеса, механическая обработка, скоростное зубофрезерование, кинематика процесса, червячные фрезы, отдельная схема резания.

## ABSTRACT

**Kamchatna – Stepanova K. V. Improving the efficiency of mechanical processing of hardened large-module chevron wheels during high-speed gear milling.**  
– On the rights of the manuscript.

The thesis for the scientific degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.03.01-mechanical processing processes, machine tools and tools (13-mechanical engineering). – Donbass State Machine-Building Academy, Kramatorsk, 2021.

The thesis is devoted to the development of processes for improving the efficiency of mechanical processing of hardened large-module chevron wheels with special cutters during high-speed gear milling, which is an urgent task of modern mechanical engineering.

The scheme of the cutting process with worm cutters with a separate shaping scheme due to the contact field of the cutter cutting is investigated and implemented. A geometric model of the kinematics of the process of processing teeth with a worm cutter is developed with the differentiation of the cutting work by each of its teeth in the contact field of cutting and the nature of the cutting of the teeth of the cutter into the metal of the

workpiece is clarified. The analysis of the process of cutting teeth is considered as the trajectory of movement of any point of the cutting edge of each of them in the kinematics of mutual movements of the tool and the workpiece.

The influence of the trajectories of the cutting edges of the milling cutter teeth on the thickness of the cut layer, the wear of the milling cutter, on the undulation and roughness of the treated surface of the wheel teeth is studied. A mathematical model has also been developed for calculating the efficiency of milling cutters with a separate shaping scheme in the range of the number of teeth  $z = 30-90$ , where, with a much smaller profile angle of the teeth than for standard milling cutters, the calculated wave height is 2.5 times less, which indicates the possibility of a significant increase in the tool feed.

A mathematical model has been developed for calculating systematic profiling errors and the accuracy of processing Archimedean chevron teeth with worm cutters due to a comparative theoretical analysis of organic profiling errors of large-module worm cutters with a standard profile angle of the original contour of the tool rail and special worm cutters with a separate shaping scheme with a reduced profile angle of the original contour.

A method for conducting experimental studies of the cutting properties of worm cutters with a separate shaping scheme has been developed. Practical recommendations for use have been developed.

Keywords: large-module chevron wheels, mechanical processing, high-speed gear milling, kinematics of the process, worm cutters, separate cutting scheme.



Підп. до друку 20.08.2021 р. Формат 60x84 1/16. Папір Сору Paper.  
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 1,9.  
Наклад 100 прим.

---

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)  
М. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1  
Тел. 7-170-354  
**[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)**