

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**КЛОЧКО ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ**



УДК 621.9

**ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ  
ПРОДУКТИВНОСТІ, ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ  
КРУПНОМОДУЛЬНИХ КОЛІС, ЩО ЗАГАРТОВАНІ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м.Харків.

Науковий консультант            доктор технічних наук, професор  
**Тимофієв Юрій Вікторович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри технології  
машинобудування та металорізальних верстатів

Офіційні опоненти:            доктор технічних наук, професор  
**Равська Наталія Сергіївна**,  
Національний технічний університет  
України «Київський політехнічний  
інститут», професор кафедри  
інтегрованих технологій машинобудування

доктор технічних наук, професор  
**Грицай Ігор Євгенович**,  
Національний університет «Львівська політех-  
ніка», завідувач кафедри  
технології машинобудування

доктор технічних наук, професор  
**Михайлов Олександр Миколайович**,  
Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»,  
завідувач кафедри технології машинобудування

Захист дисертації відбудеться « 25 » червня 2014 р. о «14<sup>00</sup>» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м.Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м.Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 23 » травня 2014 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.А. Пермяков

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Підвищення ефективності промислового виробництва в значній мірі пов'язане з розробкою й освоєнням гірничодобувного й переробного устаткування, транспортних, енергетичних систем і інших великогабаритних машин, приводи яких містять у собі крупномодульні зубчасті передачі ( $m=12\dots65$ мм). Несуча здатність зубчастих передач по контактній міцності збільшується з підвищенням поверхневої твердості зубів. Підвищення твердості поверхні зубів з *HRC32* до *HRC60* дозволяє вдвічі зменшити габарити редуктора й в 3 рази зменшити масу. Однак висока трудомісткість виготовлення крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані (ЗКЗК), через значні припуски, призначають на операціях зубошліфування для усунення дефектів після термообробки, можливість утворення пріжогов і мікротріщин, обмеження в розмірах зубчастих коліс, що установлюються на зубошліфувальних верстатах, не сприяють розширенню застосування ЗКЗК. З іншого боку, висока ймовірність відмови в роботі крупномодульних незагартованих зубчастих коліс, для яких по технологічних причинах неможливо виконати зубошліфування, при їх значних розмірах та масі значно підвищує витрати при виконанні позапланових ремонтів.

Виготовити високоточні ЗКЗК, ступінь точності яких 6В ГОСТ1643-81...8В ГОСТ1643-81, що працюють у широких діапазонах зміни швидкостей (від 0,5 до 30 м/с), потужностей (від 50Квт до 500000Квт), що мають діаметри до  $\phi 12000$ мм, ширину зубчастого вінця до 1200 мм, модуль до  $m=65$  мм у багатьох випадках практично неможливо через відсутність технологічного устаткування, інструментального забезпечення, технологічних регламентів чистової зубообробки та недостатність досліджень по питанню забезпечення якості поверхневого шару ЗКЗК при зубофрезеруванні.

Для обробки крупномодульних зубчастих коліс із високою зносостійкістю зубів, з високими властивостями міцності поверхневого шару доцільно дослідити технологічні напрямки остаточної обробки ЗКЗК для забезпечення необхідних параметрів шорсткості поверхні, якості зубофрезерування з досягненням високої продуктивності.

Тому розробка технологічних основ забезпечення продуктивності, точності та якості зубофрезерування ЗКЗК є актуальною проблемою важкого верстато - й машинобудування та визначила напрямки дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі технологія машинобудування та металорізальні верстати НТУ «ХПІ» у рамках НДР МОН України: «Розробка теоретичних основ і методів рішення задач забезпечення міцності та надійності високонавантажених елементів машинобудівних конструкцій» (ДР № 0112U000403), «Зниження енерговитрат обробки деталей в умовах складних динамічних процесів різання на унікальних верстатах важкого машинобудування», (ДР № 0109U002670); «Розробка енергоефективних процесів та інструментальних систем механічної обробки в умовах важкого машинобудування», (ДР № 0111U000882), «Оперативна оптимізація процесів різання для систем адаптивного управління важкими верстатами нового покоління» (ДР №0111U000884), «Підвищення якості верстато-інструментальних систем для автоматизованого виробництва в умовах важкого машинобудування»

(2009- 2013р.р.), (ДР №0109U001623), де здобувач був виконавцем окремих розділів. Дисертація виконана на підставі рішень Державної цільової науково-технічної програми розвитку машинобудування на 2012-2017 роки (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 9.07.2008р. № 947, м.Київ) та Концепції розвитку машинобудування Донецької області на 2011-2013 роки «Стратегія економічного й соціального розвитку Донецької області на період до 2015 року», затверджено рішенням Донецької обласної ради від 23.03.2007 № 5/8-158.

**Мета та задачі дослідження.** Мета роботи полягає в підвищенні продуктивності, точності та якості зубообробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, за рахунок удосконалення технології та кінематики зубофрезерування, розробки інструментального і технологічного оснащення, яке дозволить забезпечити прогнозовану якість поверхневого шару зубів та експлуатаційні властивості зубчастих передач.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні задачі дослідження:

- аналізувати та встановити основні напрямки підвищення продуктивності та якості зубообробки ЗКЗК в умовах дрібносерійного виробництва;
- науково обґрунтувати застосування технологічних методів зубообробки для формування експлуатаційних властивостей крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, визначити ступінь впливу якості поверхневого шару зуба ЗКЗК, отриманого механічною обробкою різанням, на його експлуатаційні характеристики;
- теоретично обґрунтувати технологічні способи формування параметрів хвилястості поверхні зуба на основі заданих експлуатаційних властивостей циліндричних крупномодульних коліс;
- розробити математичну модель прогнозування показників якості поверхневого шару зуба на основі комплексної оцінки його стану;
- сформулювати критерії вибору структур і параметрів систем лезової обробки ЗКЗК з метою забезпечення заданих експлуатаційних властивостей;
- розробити загальну методологію керування процесом формування характеристик поверхневого шару зуба ЗКЗК залежно від умов обробки й експлуатації;
- розробити методику кількісної оцінки стану поверхневого шару зуба ЗКЗК і виконати її експериментальну перевірку;
- розробити методику моделювання керування точністю, якістю й продуктивністю формування при лезовій обробці ЗКЗК;
- здійснити впровадження результатів досліджень на підприємствах важкого машинобудування.

*Об'єкт дослідження* – технологічні процеси зубообробки крупномодульних зубчастих коліс.

*Предмет дослідження* – забезпечення заданих експлуатаційних властивостей крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, шляхом формування якісного поверхневого шару методами швидкісного зубофрезерування.

**Методи дослідження:** в основу роботи покладений системний підхід при проведенні теоретичних і експериментальних досліджень, що базується на фундаментальних положеннях теорій технології машинобудування, триботехники,

різання матеріалів, моделювання, імовірності й математичної статистики. Математична обробка результатів досліджень виконувалася з використанням сучасного прикладного програмного забезпечення (пакета MathCAD). Надійність розробки теоретичних положень роботи підтверджується результатами експериментальних досліджень і промисловим впровадженням рекомендацій по проектуванню технологічних процесів, інструменту та оснащення при зубофрезеруванні ЗКЗК. Експериментальні дослідження проводилися у виробничих і лабораторних умовах на діючому технологічному устаткуванні (ДДМА, м. Краматорськ, ПАО «НКМЗ», м. Краматорськ, ТОО «КЗМО», м. Костянтинівка).

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у наступному:

- на основі широкого аналізу та узагальненню промислових досягнень в зубообробці ЗКЗК, вимог до важконавантажених і відповідальних зубчастих передач вперше сформульовані і реалізовані принципи забезпечення високої продуктивності, точності та якості чистового зубофрезерування при оптимізації структури і параметрів технологічної дії та наукові підвищення вимог до розробки інструментального і технологічного оснащення при умовах обмежень на якість поверхневого шару зуба зубчастого колеса;
- вперше розроблені технологічні засоби зубофрезерування ЗКЗК, які неможливо було виконати на існуючому обладнанні за рахунок відсутності можливості зубошліфування;
- розроблена нова технологічна схема швідкісного зубофрезерування ЗКЗК замість зубостругальної операції з забезпеченням якості зубообробки ЗКЗК з використанням нових технологічних рішень формування поверхневого шару з урахуванням ролі радіуса округлення ріжучої крайки інструменту;
- впровадженні дослідження по визначенні та математичного опису взаємозв'язків експлуатаційних властивостей поверхонь ЗКЗК з показниками якості, що дозволило вирішити основну технологічну проблему зубофрезерування - забезпечення продуктивності, точності і якості зубообробки;
- запроваджено перспективний підхід до вибору методів обробки поверхонь зубів коліс на основі використання математичного апарату відповідностей, який базується на положеннях розрахунку вимог до поверхневого шару ЗКЗК за допомогою графів, параметрів стану поверхневого шару ЗКЗК залежно від умов обробки, ступеня впливу параметрів хвилястості на експлуатаційні властивості ЗКЗК, керування якістю й продуктивністю формування при зубофрезеруванні;
- науково обґрунтовано комплексні параметри оцінки стану поверхонь ЗКЗК після лезової обробки, оцінки довговічності ЗКЗК та мінімально можливих пластичних деформацій зубів ЗКЗК;
- уперше розроблений механізм технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь зубів ЗКЗК на основі математичного структурно-параметричного моделювання процесу обробки;
- застосування комплексного параметру стану зуба в умовах багатокритеріальної оптимізації двоступінчастого технологічного процесу обробки вперше дозволило науково обґрунтувати взаємозв'язок технологічного впливу на зуб колеса з параметрами якості зубчастого зачеплення крупномодульної циліндричної передачі;
- запропоновано математичний опис взаємозв'язків якісних і кількісних показників поверхневого шару зуба колеса й експериментально підтверджені загальні

принципи керування параметрами точності, якості й продуктивності зубофрезерування ЗКЗК;

– уперше розроблена імітаційна модель керування технологічним процесом фінішної лезової обробки зубів коліс на основі обмежень по якості й точності формованих зубів;

– сформульовано наукове положення по технологічному оснащенню для інтенсивної й високоякісної зубообробки ЗКЗК.

**Практичне значення отриманих результатів** для машинобудівельної галузі полягає в побудові перспективних технологічних процесів швидкісного зубофрезерування із забезпеченням якості поверхневого шару й експлуатаційних характеристик ЗКЗК, для яких не можливо було раніше виконати чистову зубообробку. Запропоновано універсальну методика розрахунку параметрів стану поверхневого шару ЗКЗК залежно від умов їхньої обробки.

Розроблена система комплексних параметрів: стану поверхонь, по забезпеченню довговічності, мінімальних пластичних деформацій зубів, багатокритеріальної оптимізації двоступінчастого технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих коліс. Розроблено спеціальне технологічне оснащення та інструментальне забезпечення високопродуктивної зубообробки за допомогою технологічної оптимізації довжини головних ріжучих крайок фрез та немодульні дискові фрези для забезпечення високоякісної зубообробки ЗКЗК, яке суттєво підвищило продуктивність, якість та точність зубообробки.

Результати роботи впроваджені на: ПАО «НКМЗ» (м. Краматорськ), ТОВ «Костянтинівський завод механічної обробки» (м. Костянтинівка) та навчальний процес у Донбаській державній машинобудівній академії (м.Краматорськ).

**Особистий внесок здобувача.** Усі положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно. Серед них: проведені експериментально-розрахункові дослідження експлуатаційних властивостей поверхонь крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, з показниками якості, що дозволило вирішити основну технологічну проблему зубообробки – забезпечення продуктивності, точності і якості, розширені та встановлені й науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки стану ЗКЗК після лезової обробки, оцінки довговічності та оцінки мінімально можливих пластичних деформацій зубів крупномодульних зубчастих коліс, що гарантує вибір технологічних параметрів для забезпечення гарантованого строку експлуатації зубчастих передач. Сформульовано наукове положення по технологічному оснащенню для інтенсивної й високоякісної зубообробки.

Постановка завдань дослідження, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем разом з науковим консультантом.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення та результати, що представлені в дисертації, доповідалися й обговорювалися на: науково-технічних семінарах «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (м.Краматорськ, ДДМА, 2004-2013р.р.) II-X Міжнародні науково-практичні конференції; МНТК «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Вінниця, 2011р.); МНТК «Машиноприладобудування та транспорт» (м. Севастополь, 2011-2013р.р.); X

Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивні технології життєвого циклу авіаційних двигунів і енергетичних установок» (м. Запоріжжя, 2013р.); XXI МНТК «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2013р.); МНТК «Інтерпартнер» -2013 – «Високі технології: розвиток і кадрове забезпечення» (м. Харків, 2013р.); МНТК «Високі технології в машинобудуванні» (м. Харків, 2013р.); «Прогресивні технології в машинобудуванні», II Всеукраїнська науково-технічна конференція. Збірник наукових праць (м. Львів, 2014р.).

**Публікації.** Основні наукові положення і результати досліджень дисертації відображено у 47 наукових працях, 3 монографії у співаторстві, 30 статей у наукових фахових виданнях України (4 - у науково метричних базах), 1 стаття у іноземному періодичному фаховому виданні, 1 патент України, 8 - у матеріалах конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, 8 розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 382 сторінки, з них: 183 рисунків по тексту; 32 рисунка на 22 окремих сторінках; 55 таблиць по тексту; 17 таблиць на 15 окремих сторінках; список використаних джерел з 285 найменувань на 30 сторінках, 7 додатків на 28 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У введенні** обґрунтована актуальність науково-технічної проблеми, що вирішується, сформульовані, мета й завдання дослідження, визначена наукова новизна роботи й практичне значення отриманих результатів.

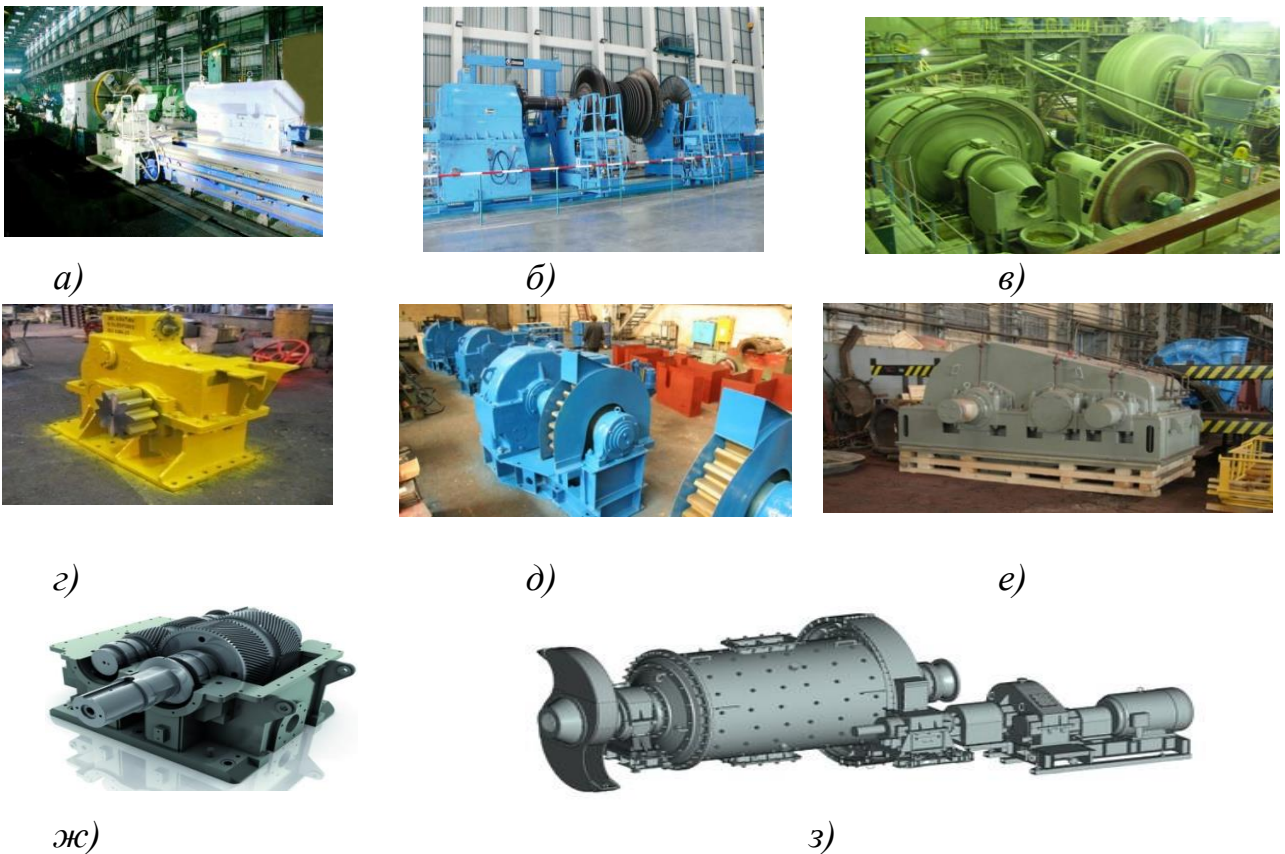
**У першому розділі** виконаний аналіз стану технології і зубообробки поверхневого шару зубів крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані. з можливостями обробки з формуванням евольвентної поверхні для забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих передач у важкому машинобудуванні. Предметно розглянуті існуючі крупномодульні зубчасті передачі з надзвичайно великими розмірами, масами, які виробляються завдяки тому, що не існує можливостей підвищення міцності зубчастих коліс у наслідок недостатності технологічних рішень чистової обробки зубчастих коліс, що загартовані. Тому при проектуванні та виготовленні зубчаті колеса, як правило, виробляють з термообробкою до 260...280 НВ, або виконують термообробку зубів колес після зубофрезерування до HRC50...63, але без чистової обробки поверхонь. Таким чином, на евольвентній поверхні утворюється дефектний шар, який сприяє руйнуванню зубчастих колес.

Фундаментом закладених дотепер наукових основ технології виготовлення в машинобудуванні послужили роботи Балакшина Б. С., Базрова Б. М., Грановського Г. И., Дальського В. А., Кована В. М., Корсакова В. С., Маталіна А. А., Соколовського А. П., Сулова А. Г. та ін.

У роботах вчених Адама Я. П., Гавриленко В. А., Гінзбурга Є. Г., Голованова М. Ф., Горленко О. А., Грицяя І. Є., Гришко В. А., Гуліди Е. Н., Кане М. М., Михайлова О. М., Овумяна Г. Г., Равської Н. С., Родіна П. Р., Северилова В. С., Сідоренко О. К., Фіруна Н. Б., Шаповалова В. Ф. та ін. розглянуті основні наукові

напрямки, технологічні фактори, послідовність проектування технологічних процесів і реалізуючих їхніх засобів технологічного й інструментального оснащення при обробці зубчастих коліс.

Для підвищення якості зубчастих коліс та постійно зростаючими вимогами до зменшення розмірів великогабаритних зубчастих передач систематизовані основні напрямки розробки нових технологічних рішень по забезпеченню якості, точності та високопродуктивної обробки. Відзначено, що сучасні вимоги по збільшенню твердості робочих поверхонь зубів зубчастих коліс є одним з найбільш ефективних і актуальних напрямків підвищення навантажувальної здатності й довговічності зубчастих передач (рис. 1).



*а) - Важкий токарний верстат моделі ІДО670Ф3 ( $m=14-24$ мм); б) - Важкий токарний верстат моделі РТ95 ( $m=12-16$ мм); в) - Рудорозмольний млин( $m=24-65$ мм); г) - Редуктор шлаковоза ( $m=20-46$ мм); д) - Редуктор ЦДН-630 ( $m=18-36$ мм); е) - Редуктор ЦЦ2-1250 ( $m=20-40$ мм); ж) - Редуктор ( $m=12-18$ мм); з) - Рудорозмольний кульовий млин( $m=20-50$ мм)*

Рисунок 1 – Токарні верстати, редуктора з циліндричними крупномодульними загартованими зубчастими передачами

У той же час виробництво крупномодульних зубчастих передач із твердістю зуба  $HRC\ 52...60$  і довжиною зубів  $200...1200$  мм вимагає значної трудомісткості. Відзначено, що комплексний підхід до вибору, призначенню й технологічному забезпеченню системи параметрів поверхневого шару ЗКЗК забезпечує взаємозв'язок стану поверхневого шару зубчастих ЗКЗК (макрівідхилення, хвилястості, шорсткості, фізико-механічних властивостей). Розвиток наукових методів



визначення необхідних параметрів стану робочих поверхонь зубчастих коліс, що загартовані, формування якісних показників стану поверхневого шару, відповідає рішенню задач в підвищенні продуктивності, точності та якості зубообробки ЗКЗК.

**Розділ 2.** У розділі сформульована структурна постановка до формування поверхневого шару ЗКЗК з забезпеченням основних напрямків підвищення продуктивності, точності і якості зубообробки ЗКЗК на основі.

Основними напрямками технологічного забезпечення продуктивності, параметрів стану поверхневого шару і якості зубообробки ЗКЗК є розробка й дослідження технологічних методів формування поверхневого шару і альтернативних зубошліфованню технологій.

При призначенні параметрів стану контактуючих поверхонь циліндричних КЗКЗ установлені можливості технологічних методів обробки по забезпеченню параметрів стану поверхневого шару шорсткості ( $R_{max}$ ,  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $S_m$ ,  $S$ ), хвилястості ( $W_a$ ,  $W_p$ ,  $S_m$ ) і фізико-механічних властивостей поверхневого шару ( $k=(H_{\mu 0}/H_{\mu}) \cdot 100\%$ ,  $h_{\mu 0}, \pm \sigma_0, h_{\sigma}$ ). Введено на основі цих показників комплексний параметр стану поверхні, що характеризує певні експлуатаційні властивості через систему параметрів її якості й змінює свої значення в процесі приробляння поверхонь, не залежачи від вихідних значень, отриманих обробкою.

Забезпечення шорсткості поверхні при обробці зубчастого колеса зі сталі 45,  $m = 20$ ,  $z = 23$  показане на рис. 2.

На підставі структурних досліджень процесів формування досліджені параметричні залежності процесів зубообробки ЗКЗК. Дані експериментів і розрахунків по отриманих рівняннях наведені на рис. 3.

Процес зубофрезерування безупинно вдосконалюється в напрямку підвищення продуктивності й точності обробки. Можливості підвищення продуктивності зубофрезерування визначаються аналізом формули основного технологічного (машинного) часу  $t_0$

$$t_0 = \frac{(b + y_1 + y_2) \cdot z \cdot \pi \cdot D_{\phi}}{S \cdot k \cdot 10^3 \cdot v}, \quad (1)$$

де  $b$  – ширина зубчастого колеса, мм;  $y_1$  – шлях врізання фрези;  $y_2$  – шлях вихода фрези з заготівки;  $z$  – число зубів циліндричного зубчастого колеса;  $D_{\phi}$  – діаметр фрези, мм;  $S$  – подача на оберт заготівлі, мм/про;  $k$  – число заходів фрези;  $v$  – швидкість різання, м/хв.

На процес формування поверхневого шару значно впливає утворення хвилястості залежно від методів і режимів зубообробки. Висота хвилястості утвореної на евольвентній поверхні циліндричного зубчастого колеса при зубообробці, у відповідності з правилами підсумовування випадкових величин

$$W_z = 1,2 \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2}. \quad (2)$$

де  $W_{zucx}$  – ісходна висота хвиль;  $H_1$  – складлова висоти хвилястості, обумовлена вихідним станом поверхневого шару;  $H_2$  – складлова висоти хвилястості, обумовлена вимушених коливань фрези;  $H_3$  – кінаматична складлова висоти хвиль.

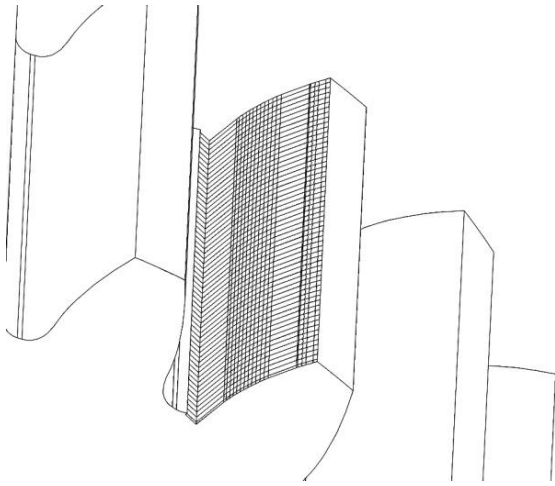


Рисунок 2 – Забезпечення шорсткості поверхні при обробці зубчастого колеса з сталі 45,  $m = 20, z = 23$

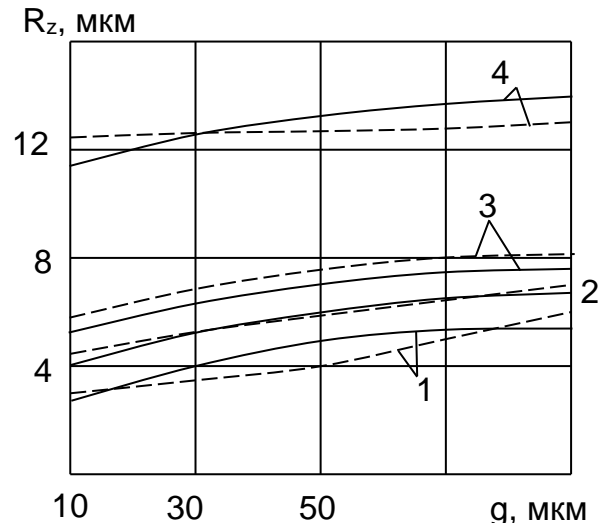


Рисунок 3 – Залежність параметра шорсткості  $R_z$  від радіуса округлення ріжучої кромки зубів фрези  $r$  для послідовних значень  $S_0$ , мм/об: 1 – 0,05; 2 – 0,1; 3 – 0,2; 4 – 0,4 (сплошні лінії – теоретичні, штрихові – експеримент)

На основі оцінки взаємодії структурних процесів формування хвилястості поверхневого шару, отримані залежності знаходження параметричних показників. Зробивши математичні перетворення, одержимо для визначення середньої висоти хвиль при зубофрезеруванні

$$W_z = \frac{1,2c_y S^y p y_0^2 p y (HB_{max}^n t^{xp} - HB_{min} (t - W_{2иск} - R_{зиск})^{xp})}{HB_{срснид}^{n_j} \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{2}\right)^2 + T_h \lambda^2}} \quad (3)$$

Причиною деформації поверхневого шару, а отже, і зміцнення, є те, що різання металів здійснюється зубом фрези з радіусом округлення ріжучої кромки  $\rho$ . Для керування технологічними параметрами при обробці ЗКЗК розроблен алгоритм (рис. 4).

При механічній обробці ЗКЗК поверхневий шар піддається пластичному деформуванню й місцевому короткочасному нагріванню. У цьому шарі виникають залишкові напруги, які мають значну величину (рисунки 5 та 6).

Рівноважний стан поверхонь тертя зубчастих коліс (рис. 7) характеризується параметром

$$C_x = \frac{H_p \cdot W_p \cdot \rho^{0,28} (0,75 \cdot R_z)^4}{S_m^6 \cdot k^{-12}}, \quad (4)$$

де  $H_p$  – висота згладжування макровідхилення;  $W_p$  – висота згладжування профілю хвилястості;  $R_z$  – висота нерівностей профілю по десятих точках;  $S_m$  – середній крок нерівностей;  $k$  ( $H_{\mu 0}$ ) – ступінь зміцнення.

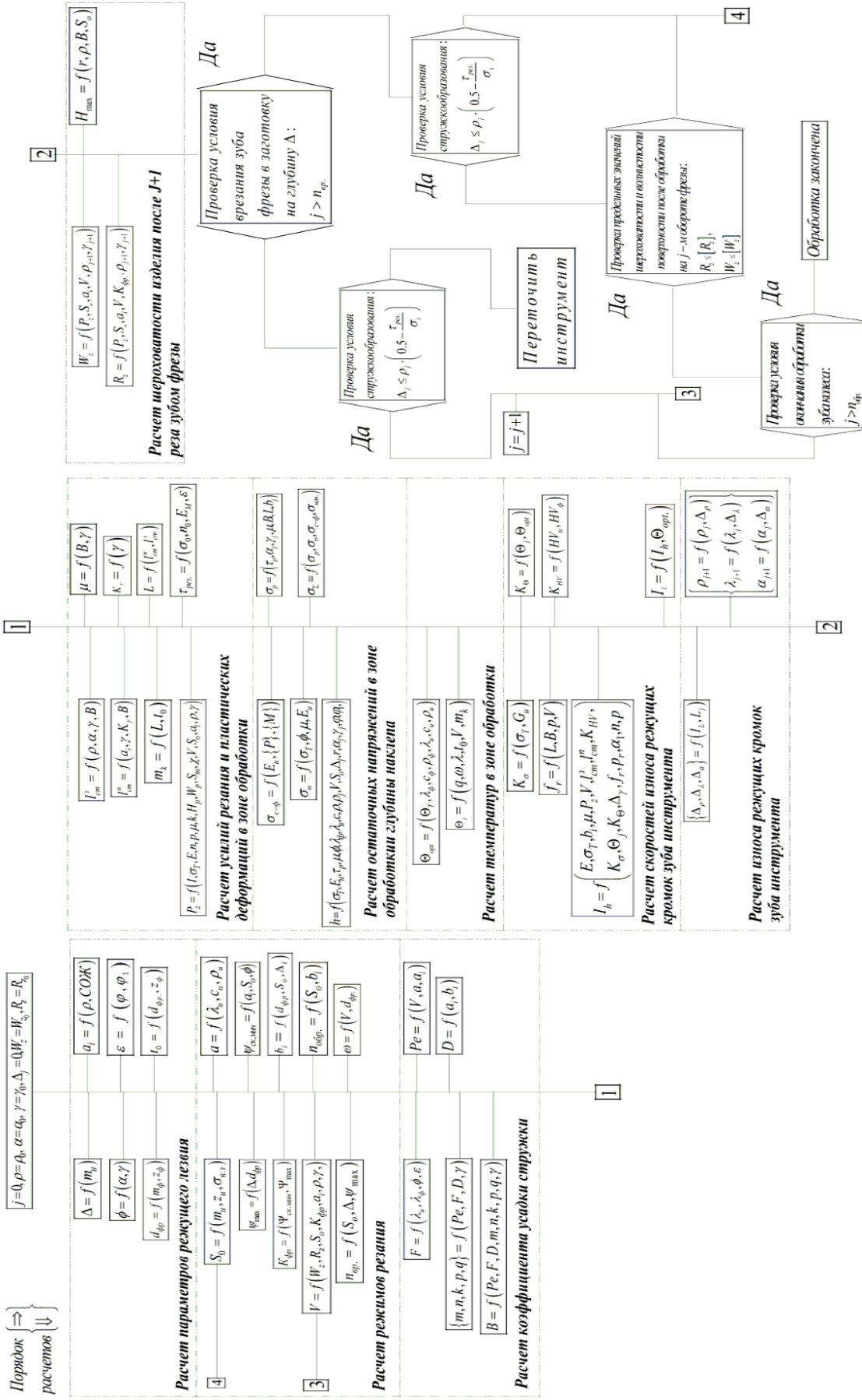


Рисунок 4 – Алгоритм напрямку керування технологічними параметрами при багатокригеріальній оптимізації обробці ЗКЗК

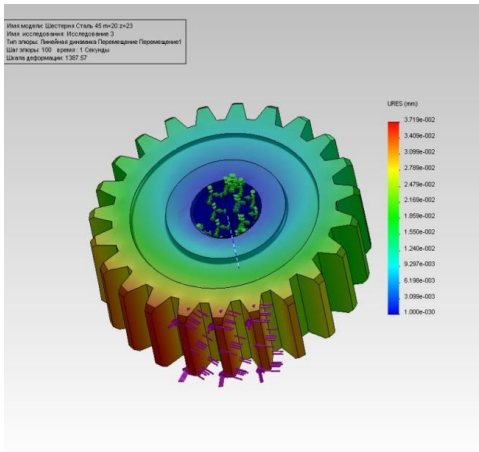


Рисунок 5 – Виникнення залишкових напруг в поверхневому шару при динамічному навантаженні

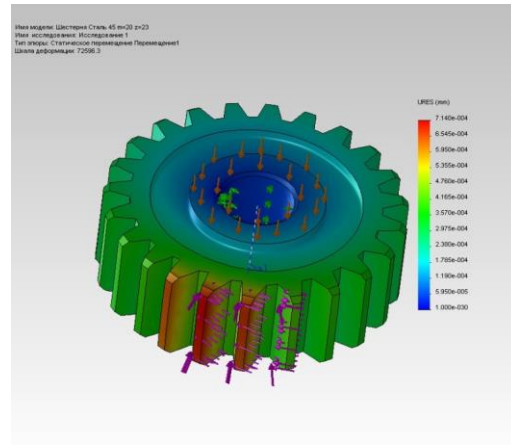


Рисунок 6 – Виникнення залишкових напруг в поверхневому шару при статичному навантаженні

Значення комплексного параметра, що забезпечує необхідну зносотривкість, має вигляд

$$C_x = 3375 \cdot \left[ \frac{\sigma_m \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left( \frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^6, \quad (5)$$

де  $\sigma_m$  – напруга плинності;  $E$  – модуль пружності %;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона;  $n$  – число циклів впливу, що призводить до руйнування поверхні зубчастих коліс;  $I$  – інтенсивність зношування зубчастих коліс у період нормального зношування;  $\chi$  – коефіцієнт, що враховує параметри опорної кривої;  $p$  – питоме навантаження, що доводиться на геометричну площу контакту.

Тому для підвищення ефективності процесу формоутворення при фрезеруванні ЗКЗК необхідне визначення мінімального кута ковзання  $\Psi_{ск}$ , який характеризує найбільшу продуктивність та забезпечення точності зубообробки.

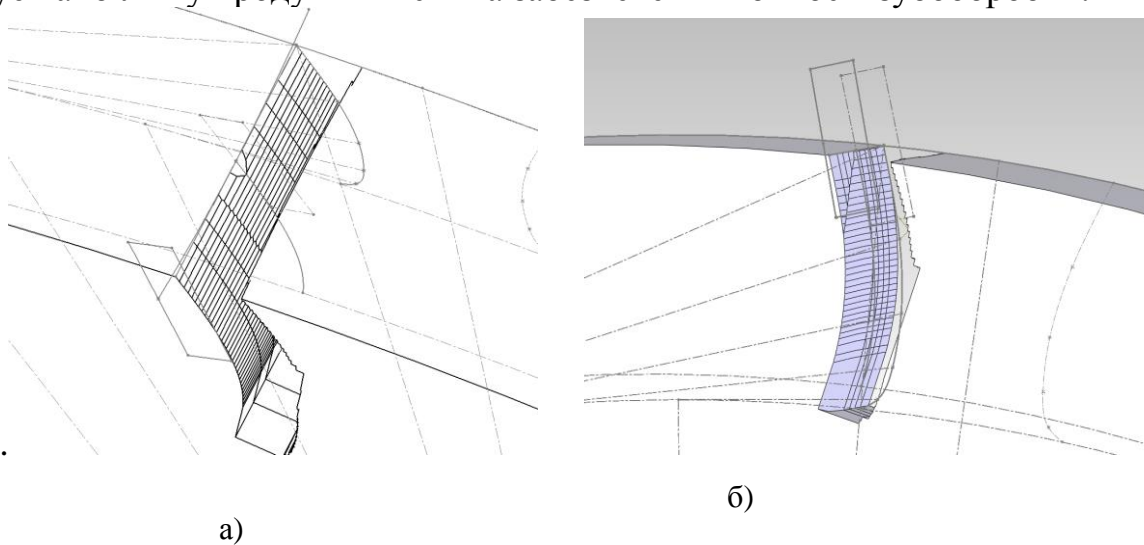


Рисунок 7 - Утворення рівноважної шорсткості евольвентної поверхні крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, з обліком необхідної зносотривкості  
В таблицях 1 та 2 приведені параметри формування поверхневого шару зуба ЗКЗК.

Таблиця 1 - НІРРО – діаграма розрахунку режимів формування поверхневого шару зуба крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані

Вхід	Процес	Вихід
$\sigma_T = 785 \text{ Н/мм}^2*$ $E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}*$ $\mu = 0,25 \dots 0,30*$ $S_m = 0,8 \dots 2,5**$ $I = (0,1 \dots 0,85) \cdot 10^{10}*$ $n = 100 \dots 2000*$ $k = 1,1 \dots 1,5**$ $P = 0,5 \dots 2,5 \text{ МПа}*$ $H_p = (0,4 \dots 0,6) \cdot H_{max}**$ $H_{max} = (10 \dots 40) \text{ мкм}**$ $W_p = 0,25 \dots 2,5 \text{ мкм}**$	$P_z = \frac{10,16 \cdot \left( \frac{10 \cdot I \cdot n \cdot S_m \cdot \sigma_T \cdot E}{\chi \cdot \rho \cdot \pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{1,25} \cdot \left( \frac{10 \cdot I \cdot n \cdot S_m}{H_p \cdot W_p \cdot \chi \cdot \rho} \right)^{0,25} \cdot V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \gamma^{0,41}}{S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5} \cdot k^3}$ $\chi = \frac{1}{2(v+1)} \sqrt{\frac{v}{2\alpha}}$	$P_z$
$W_z = 0,5 \dots 4,0 \text{ мкм}**$ $R_z = 0,32 \dots 1,6 \text{ мкм}**$ $\gamma = 0^0 \dots 10^0$	$V = W_z^{0,645} \cdot R_z^{0,813} \cdot \rho^{0,217} \cdot \gamma^{0,682} \cdot S_z^{-0,722} \cdot a_i^{-0,11} \cdot K_{\phi p}^{-0,813}$	$V$
	$K_{\phi p} = \frac{\sin(\Psi_{\max}) - \sin(\Psi_{ск.мин})}{\sin(\Psi_{\max})} \cdot 100\%$	$K_{\phi p}$
	$\Psi_{\max} = \arcsin \left[ \frac{\sqrt{t \cdot (d_{\phi p} - t)}}{d_{\phi p}} \right]$	$\Psi_{\max}$
$\phi = 10^0 \dots 60^0$ $S_z = 0,05 \dots 0,8$	$\Psi_{ск.мин} = \arcsin \left( \frac{C \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi} \right)$	$\Psi_{ск.мин}$
$\rho = 0,02 \dots 0,4$	$a_i = C \cdot \rho$	
СОЖ: ОСМ-3, ОСМ-5, МР-14, МР-15**	$COЖ = \text{Нет}, C = 0,5$ $COЖ = \text{Да}, C = 0,31$	

Таблиця 2 - НІРРО – діаграма розрахунку фізико-механічних властивостей формоутворення поверхневого шару зуба ЗКЗК

Вхід	Процес. Знаходження комплексного параметра стану поверхневого шару крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані	Вихід
$\sigma_T = 785 \text{ Н/мм}^2*$ ; $E = 2,1 \cdot 10^4 \text{ МПа}*$ $\mu = 0,25 \dots 0,30*$ ; $S_m = 0,8 \dots 2,5**$ $I = (0,1 \dots 0,85) \cdot 10^{10}*$ ; $n = 100 \dots 2000*$ $k = 1,1 \dots 1,5**$ ; $P = 0,5 \dots 2,5 \text{ МПа}*$ $H_p = (0,4 \dots 0,6) \cdot H_{max}**$ ; $H_{max} = (10 \dots 40) \text{ мкм}**$ ; $W_p = 0,25 \dots 2,5 \text{ мкм}**$	$C_x = \frac{H_p W_p R_p^4 \rho}{S_m^6 k_1^{12}};$ $C_x = 3375 \left[ \frac{\sigma_T E}{\pi (1 - \mu^2)} \right]^3 \left( \frac{10 \ln \lambda}{\chi \rho} \right)^6$	$\sigma_T$
$W_z = 0,5 \dots 4,0 \text{ мкм}**$ $R_z = 0,32 \dots 1,6 \text{ мкм}**$	<p>В період нормального(сталого) зношування величина упровадження визначається пружними контактними деформаціями</p> $f = \frac{\tau_0}{ck_1 \sigma_T} \times \sqrt{\frac{30(1 - \mu^2)(2\rho R_a W_z H_{max})^{1/3}}{ES_m t_m}}$	$f$

Примітка: \* - параметри, обрані в залежності від оброблюваного матеріалу та умов навантаження зубчастієї передачі у процесі експлуатації; \*\* - параметри, обрані в залежності від метода остаточної обробки поверхні;

Розрахунок інтенсивності зношування ЗКЗК $I_h = \frac{2,5v^{0,5}R_g^{3/2}\rho^{0,5}P}{n\lambda(v+1)S_m t_m^{3/2} k_i \sigma_T} \times \dots$ $\dots \times \sqrt[3]{15\pi(2\pi W_z H_{max} \rho^2)} \left[ 1 + \frac{2\pi k_i \sigma_T (1-\mu^2)}{E} \right]$	$\longrightarrow$ $I_h$
---	-------------------------

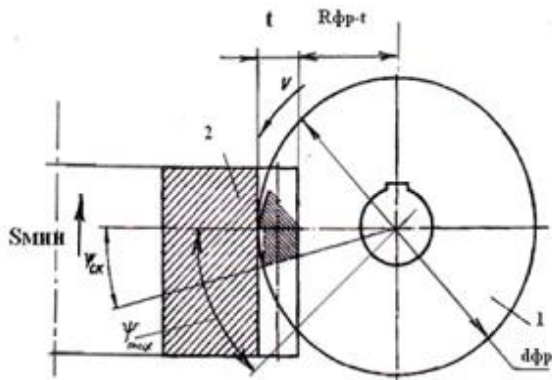
Для дослідження параметрів поверхневого шару запропоновано розглядати елемент, що упровадився - індентор, який, переміщаючись у тангенціальному напрямку деформує нижчележачий шар, як ріжуче лізо з радіусом  $\rho$ , а глибину нерівності, що упровадилася,  $h_i$ , як  $a_i$ , то глибина відносного упровадження  $hi/\rho$  має вигляд:  $a_i/\rho$ . Значення цього параметру, що приводить до різання без застосування змащення, відповідає  $a_i/\rho \geq 0,5$ , а зі змащенням –  $a_i/\rho \geq 0,31$ . Тоді товщина зрізуємого шару визначається, як,  $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ck} \cdot \sin \varphi$ , де  $S_z$  – подача на зуб;  $\varphi$  – кут профілю зуба фрези.

На підставі теоретичних досліджень для оцінки шорсткості поверхонь зубчастих коліс досить мати наступну систему параметрів:  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_{max}$ ,  $t_m$ ,  $S_m$  і  $S$ , через які визначаються всі інші:  $v$ ,  $b$ ,  $t_p$ ,  $p_m$ ,  $\rho$ ,  $p'_m$ ,  $\Delta$ , використовувані в розрахунках контактної взаємодії й утоманої міцності зубчастих коліс.

**Розділ 3.** У розділі обґрунтовані параметричні залежності до забезпечення двухпараметричного адаптивного керування процесом швидкісного зубофрезерування ЗКЗК.

Керування параметрами точності, якості й продуктивності зубообробки пропонується вирішувати методами технологічного впливу з урахуванням кінематичних рухів зуборізного інструменту, залежності шорсткості поверхневого шару, який утворюється за рахунок постійно змінюючої геометрії різальної частини інструмента, який необхідно обов'язково урахувувати при швидкісному зубофрезеруванні.

**Схема кінематичних рухів зуба фрези відносно зуба ЗКЗК**



**Рівняння балансу шорсткості поверхні зуба ЗКЗК, отриманої на основі кінематичних рухів зуба фрези і його силового впливу на заготовку**

$$\frac{P_z \cdot S_z^{1,09} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,34} \cdot \gamma^{0,41} \cdot K_p^{0,24}} = \frac{10,16 \cdot \left( \frac{\sigma_r \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{3/4} \cdot \left( \frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{3/2} \cdot S_m^{3/2} \cdot k^{-3}}{H_p^{3/4} \cdot W_p^{3/4}};$$

$$K_p = \frac{\sin(\Psi_{\max}) - \sin(\Psi_{\text{ср.взм}})}{\sin(\Psi_{\max})} \cdot 100\%;$$

$$\Psi_{\text{ср.взм}} = \arcsin\left(\frac{C \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi}\right);$$

$$\Psi_{\max} = \arcsin\left[\frac{\sqrt{t \cdot (d_{\text{фр}} - t)}}{d_{\text{фр}}}\right].$$

**Схема силової дії зуба фрези на зуб ЗКЗК**

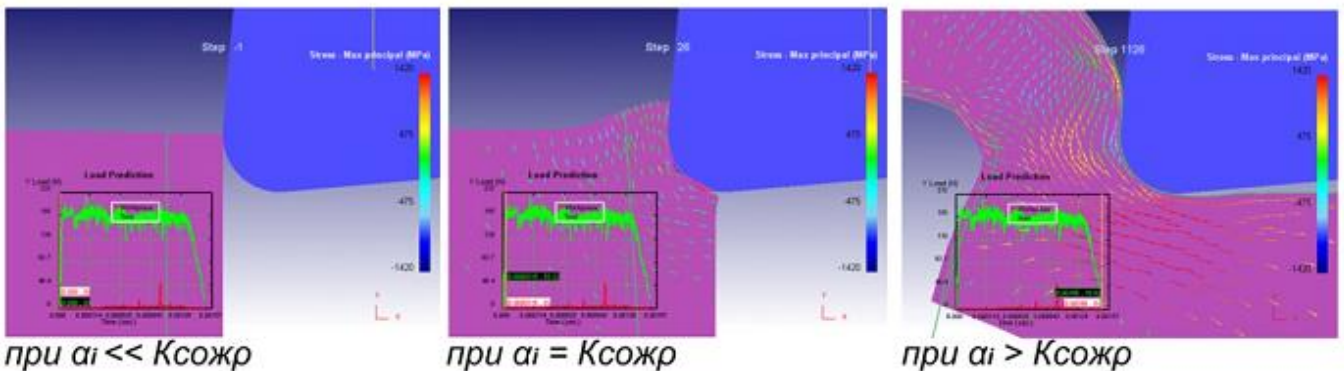


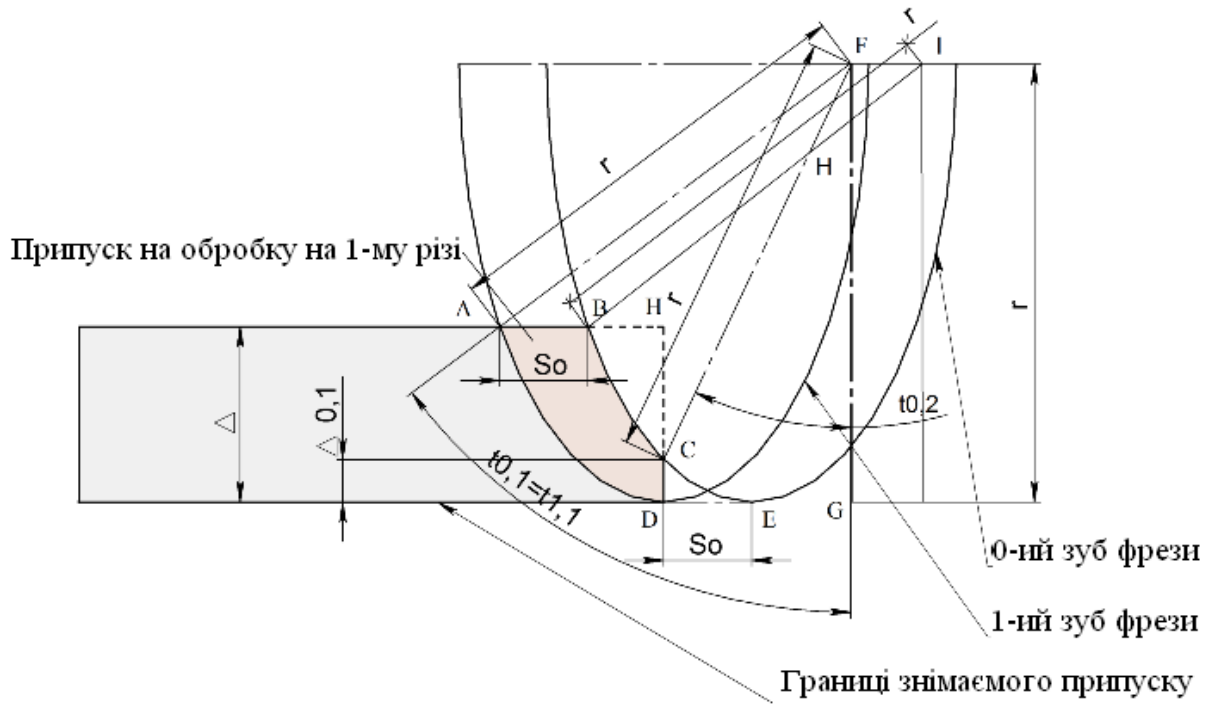
Рисунок 8 - Схема двухпараметричного адаптивного керування процесом швидкісного зубофрезерування ЗКЗК

З огляду на те, що процес зустрічного зубофрезерування пов'язаний з нестабільністю через переривчасте різання, яке постійно змінює товщину зрізуемого шару  $a_i$ , зі зміною  $\Psi_{\text{ск}}$  по залежності  $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{\text{ск}} \cdot \sin \phi$ , визначено мінімальні значення кутів ковзання без МОР (мастильно охолоджувана рідина) та з МОР:

$$\Psi_{\bar{n}\bar{e}} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi}; \quad (6)$$

$$\Psi_{\bar{n}\bar{e}} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi}. \quad (7)$$

Для моделювання припуску при формуванні з наступним одержанням розподілу глибини різання на ділянці стаціонарного різання (коли схеми навантаження зуба на попередньому й наступному різках збігаються), сформувано припуск, що знімає одним зубом при врізанні в заготовку на повну глибину  $\Delta$  при допущенні, що 1-й різ зубом фрези здійснюється у точці  $D$ , 0-й різ - на відстані  $S_0$  від точки  $D$  (рис. 9).



$S_o$  – подача інструмента на одне обертання;  $r$  – радіус фрези;  $\Delta$  - припуск;  $\Delta_{0,1}$  - висота врізання зуба фрези в заготовку на 0-м різі (на 1-м різі врізання в заготовку виконується у точці  $D$ );  $t_{1,1} = t_{0,1}$  – кут виходу фрези із заготовки на 0-м і 1-м різах;  $t_{0,2}$  – кут входу фрези у заготовку на 0-м різі

Рисунок 9 - Схема різа зубом фрези на торці заготовки при зустрічній подачі

Рух вершини зуба фрези описується рівнянням циклоїди з ковзанням

$$\begin{cases} x = K_{ск} \cdot r \cdot [t - \sin(t)] \\ y = r \cdot [1 - \cos t] \end{cases} \quad (8)$$

Коефіцієнт ковзання при цьому

$$K_{ск} = \frac{S_o}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (9)$$

Для цього перетворимо багатокутник  $ABC$  у прямокутник виду (рис. 10), де точки  $C$  і  $D$  не змінюють свого положення. У той же час, точки  $A_1$  і  $B_1$  віддаляються від первісного розташування щодо точки  $H$ . Це пояснюється збільшенням довжин відрізків  $DA_1$  і  $CB_1$ . Глибина різання для одиничного зуба на першому різі утворюється на перпендикулярі до дотичної дуги  $DA$ .

Це положення дозволяє стверджувати, що перпендикулярні відрізки прямих  $B_1U_2$  і  $CC_1$  до відрізка  $DIA$  є максимальними значеннями глибини різання в точках  $U$  і  $C$  і можуть бути описані залежностями

$$\angle A_1DH = \arccos\left(\frac{\Delta}{l_1}\right) = \arccos\left(\frac{\Delta}{\sqrt{\left\{\frac{S_o}{2 \cdot \pi} [t_{0,1} - \sin(t_{0,1})]\right\}^2 + \{r \cdot [1 - \sin(t_{0,1})]\}^2}}\right) \quad (10)$$

Тоді відрізок  $CC_1$  ( $T_n$  – початкова глибина різання)



$$CC_1 = T_n = \Delta \cdot \sin(\angle A_1DH) = \Delta \cdot \sin \left\{ \arccos \left( \frac{\Delta}{\sqrt{\left\{ \frac{S_0}{2\pi} [t_{0,1} - \sin(t_{0,1})] \right\}^2 + \{r \cdot [1 - \sin(t_{0,1})]\}^2}} \right)} \right\}, \quad (11)$$

за аналогією відрізок  $B_2B_1$  ( $T_k$ — кінцева глибина різання)

$$B_2B_1 = T_k = \Delta \cdot \sin(\angle DA_1H) = S_0 \cdot \cos(\angle A_1DH) = \quad (12)$$

$$= S_0 \left( \frac{\Delta}{\sqrt{\left\{ \frac{S_0}{2\pi} [t_{0,1} - \sin(t_{0,1})] \right\}^2 + \{r \cdot [1 - \sin(t_{0,1})]\}^2}} \right).$$

Проведені теоретичні й експериментальні дослідження дозволяють визначити оптимальні кути ковзання  $\Psi_{ск}$ , при яких забезпечується стабільність процесу зубофрезерування. Співвідношення між кутом ковзання  $\Psi_{ск}$  і найбільшим кутом контакту зуба фрези з оброблюваною поверхнею  $\Psi_{max}$  дозволяє встановити ефективність процесу формування через коефіцієнт функціонального формування поверхневого шару  $K_\rho$

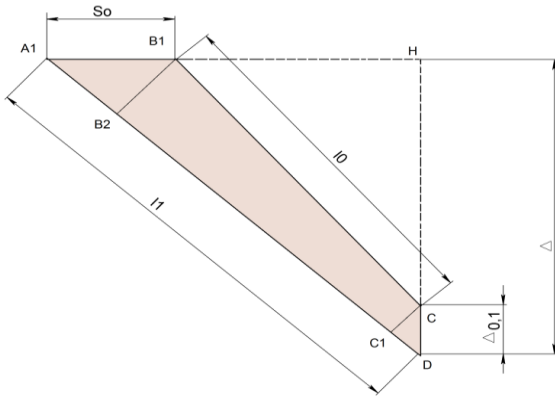


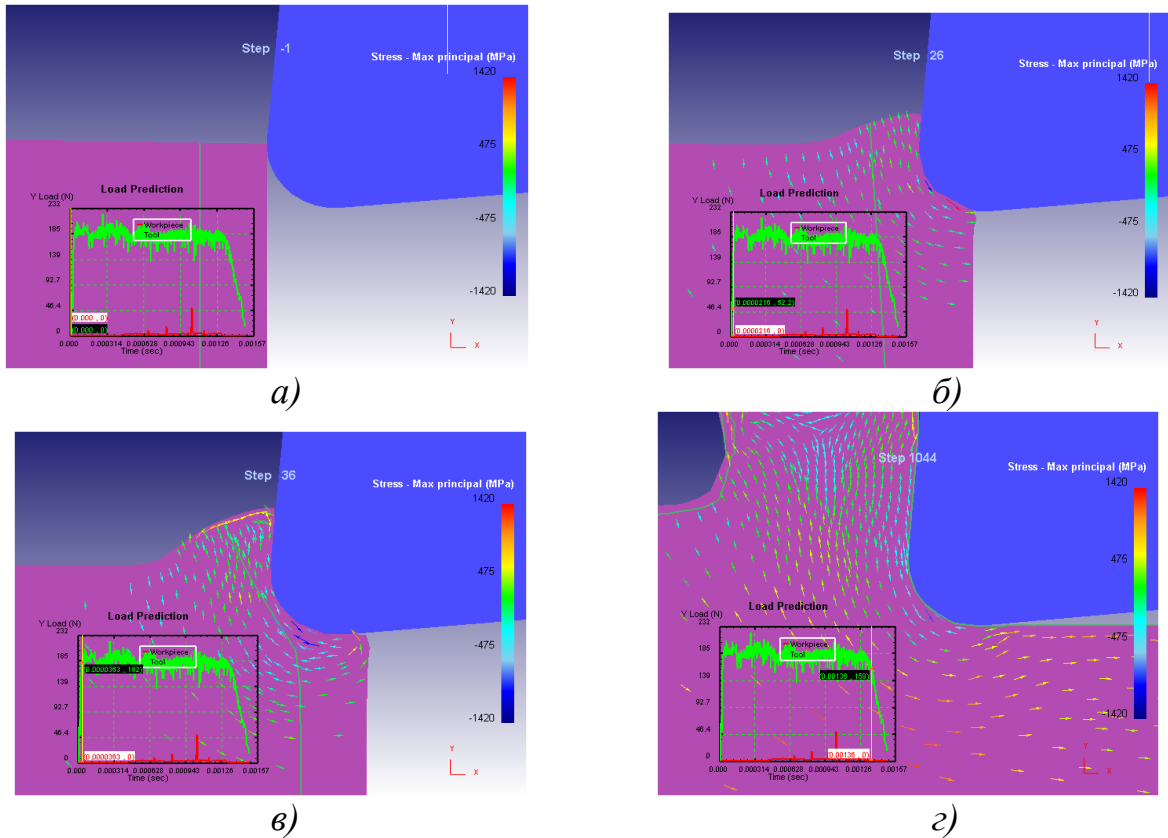
Рисунок 10— Схема зрізального припуску

$$\hat{E}_\rho = \frac{\sin \Psi_{max} - \sin \Psi_{\hat{n}\hat{e}}}{\sin \Psi_{max}} \cdot 100\% . \quad (13)$$

Для прогнозування показників якості поверхневого шару розроблена параметрична функціональна залежність з обліком технологічних, геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей за умови переходу пластичного відтискування матеріалу з оброблюваної поверхні загартованих крупномодульних зубчастих коліс у взаємозв'язку з комплексним параметром стану поверхневого шару, вираженому через параметр шорсткості  $R_z$

$$R_z = 5 \cdot R_a = \frac{P_z \cdot S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \gamma^{0,41} \cdot \hat{E}_\rho^{0,24}} = \frac{10,16 \cdot \left( \frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{3/4} \cdot \left( \frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{3/2} \cdot S_m^{3/2}}{H_p^{1/4} \cdot W_p^{1/4} \cdot k^3} . \quad (14)$$

При врізанні зуб фрези ковзає по оброблюваній поверхні на кути ковзання  $\Psi_{ск}$  (рис. 11, а) при  $\alpha_i \ll K_{сож}\rho$ , на рис. 11, б  $\alpha_i < K_{сож}\rho$  відбувається пластичне деформування поверхневого шару без зняття припуску, на рис. 11, в  $\alpha_i = K_{сож}\rho$  початок процесу стружкоутворення на кути ковзання  $\Psi_{ск}$ , що відповідає початку формування поверхневого шару, на рис. 11, г  $\alpha_i > K_{сож}\rho$ , початок стійкого процесу стружкоутворення з формуванням поверхневого шару протягом часу контактування зуба фрези до повного виходу з контакту з оброблюваної поверхні на кути  $\Psi_{max}$ . Співвідношення кутів ковзання  $\Psi_{ск}$  і найбільшого кута контакту зуба фрези  $\Psi_{max}$  з оброблюваною поверхнею визначають ефективність процесу формування.



а) - при  $\alpha_i \ll K_{сожр}$ , б) - при  $\alpha_i < K_{сожр}$ , в) - при  $\alpha_i = K_{сожр}$ , г) - при  $\alpha_i > K_{сожр}$   
Рисунок 11 - Формування поверхневого шару ЗКЗК

Технологічні умови забезпечення показників якості поверхневого шару від кута ковзання при обробці крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, дозволяють стабілізувати процес формування ЗКЗК.

**Розділ 4.** Присвячений теоретичним дослідженням процесів моделювання взаємозв'язків технологічного впливу при зубообробці і якості зубчастого зачеплення ЗКЗК.

При виготовленні циліндричних зубчастих коліс, що працюють при високих знакозмінних навантаженнях в умовах високих контактних напруг, потрібно витримувати задані параметри якості поверхневого шару, зокрема шорсткість поверхні, глибину й ступінь наклепу, залишкові напруги. Наведено розрахунок для визначення температурних залишкових напруг при обробці циліндричних ЗКЗК черв'ячними модульними й спеціальними немодульними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні:

$$\sigma_{ост.т} = -\sigma_T + \frac{\beta_D A_1 E_D}{1-\mu} \left\{ \left( \frac{H-y+a_1}{a_1} \right)^{x_1} - \frac{a_1^{1+x_2} - (H+a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} (1+x_2) H} \right\}, \quad (15)$$

при  $y = y_{OH}$ ;  $\sigma_{0max} < 2\sigma_T$ .

Залишкові напруги, обумовлені силовим впливом на поверхневий шар, визначаються відповідно до теореми Генки про розвантаження, як різниця напруг, що виникають при навантаженні  $\sigma_{ФНКТ}$  і розвантаженні  $\sigma_{Н\beta\tau}$ :

$$\sigma_x = -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_1 \left[ B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[ \frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2},$$

$$\begin{aligned}\sigma_y &= -\frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_2 \left[ B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_2 \left[ \frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2}, \\ \sigma_{xy} &= \frac{\tau_p}{2\pi} \left\{ \psi_3 \left[ B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \xi_3 \left[ \frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \frac{1}{1-\mu^2}.\end{aligned}\quad (16)$$

Умова пластичності визначається по теорії Хубера-Мизеса. При аналізі впливу шорсткості обробленої поверхні на формування нерівностей при зустрічному фрезеруванні враховується радіус округлення ріжучої крайки зубів фрези  $\rho$ , змінювана в часі геометрія перетину зрізу  $a_i = S_z \sin \Psi \sin \varphi$ , обсяг і швидкість пластичного деформування металу, що виникають у зоні різання (рис. 12). Таким чином параметр шорсткості поверхні знаходиться по запропонованій формулі

$$R_z = \left\{ \frac{a_i^{0,125} b_1^{0,7} c \theta \rho^{0,1} a^{0,43} \left[ 2,85 \sin^{0,115} \alpha v^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda \rho^{0,57} \rho^{0,075} \right]}{V \lambda \sin^{0,165} \alpha} \right. \\ \left. - 0,5 \tau \rho \cdot b \left[ \arccos \left( 1 - a_2 B^{-b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}} \right) + \frac{a_2 B^{1 - b_2 (1 - \sin \gamma)^{-x_2}}}{\sin \alpha (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho} \right] \cos \alpha \right\} \frac{1}{\frac{K}{\rho}} \cdot \quad (17)$$

$$\left. \frac{t \tau \rho \left[ 1 + \frac{1}{B} + \operatorname{tg}(\operatorname{arctg} B - \gamma) \right]}{\rho} \right\}$$

При виготовленні ЗКЗК необхідно забезпечити такий стан контактуючих евольвентних поверхонь, який гарантував би мінімальне зношування при експлуатації зубчастих коліс, а так само сталість коефіцієнта тертя. Залежності для розрахунку інтенсивності зношування й коефіцієнту тертя знаходиться з рахунком прироблення та нормального зношування:

а) у період прироблення:

$$J_h = \frac{2,5 v^2 R_a^{2/3}}{n \lambda (\nu + 1) S_m t_m^{3/2}} \cdot \frac{P}{K^l \sigma_T} \sqrt{15 \pi (2 \pi W_z H_{\max})^{1/3} \left[ 1 + \frac{2 \pi K^l \sigma_T (1 - \mu^2)}{E} \right]}, \quad (18)$$

$$f_h = \frac{\tau_0}{c^l K^l \sigma_T} + \beta + \frac{4 \alpha_\Gamma R_a^{2/3}}{S_m t_m} \sqrt{\frac{60 \pi}{t_m} \left( \frac{2 \pi P W_z H_{\max}}{K^l \sigma_T} \right)^{1/3} \left( 1 + \frac{2 \pi K^l \sigma_T (1 - \mu^2)}{R_a E} \right)}, \quad (19)$$

б) у період нормального зношування:

$$J = \frac{2,5 \pi v^{0,5} P^{7/6}}{n \lambda (\nu + 1) t_m^{3/2} (K^l \sigma_T)^{2/3}} \sqrt{\frac{30 (1 - \mu^2) (2 \pi R_a W_z H_{\max})^{1/3}}{E S_m}}, \quad (20)$$

$$f = \frac{\tau_0}{c^l K^l \sigma_T} + \beta + \frac{8 \alpha_\Gamma (K^l \sigma_T)^{1/3}}{t_m} \sqrt{\frac{30 (1 - \mu^2) (2 \pi P R_a W_z H_{\max})^{1/3}}{E S_m t_m}}. \quad (21)$$

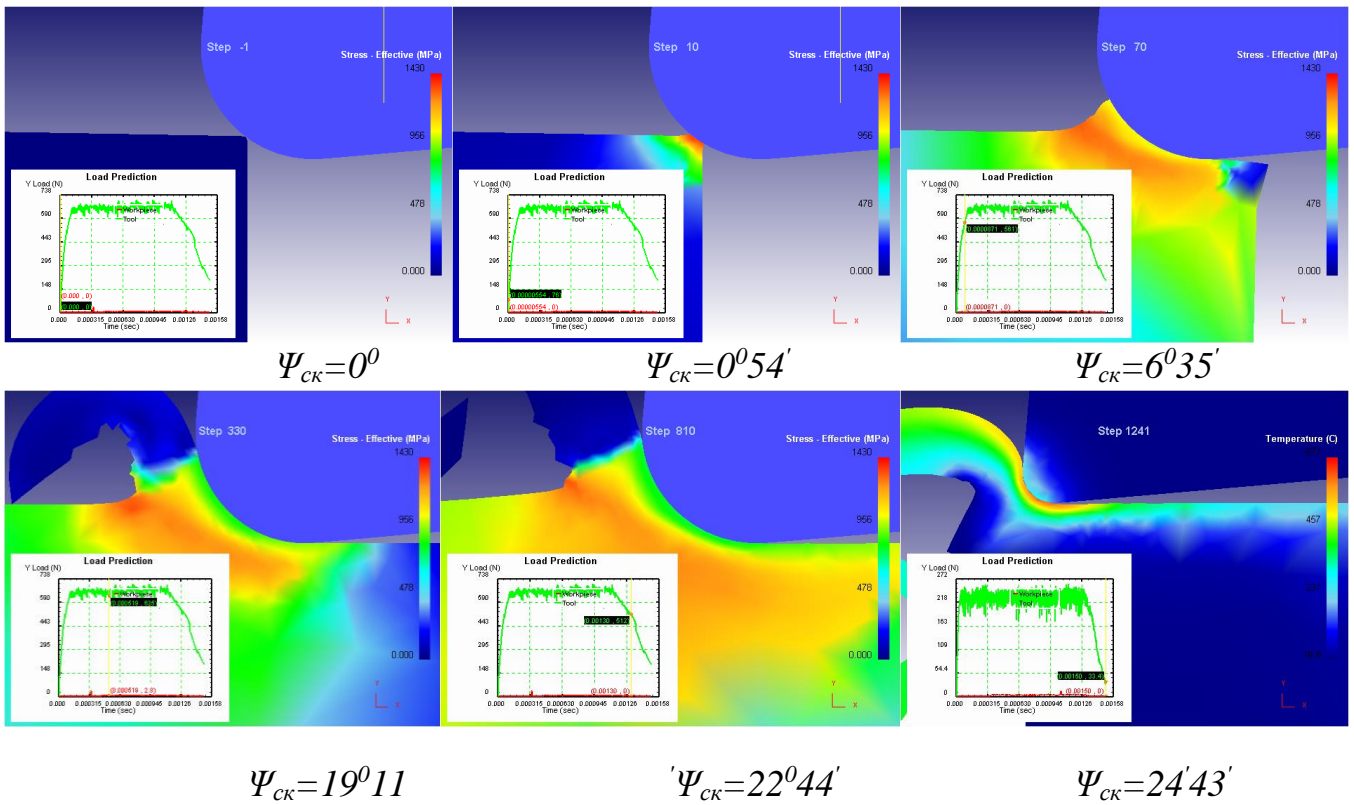


Рисунок 12 - Послідовність моделювання глибини залігання залишкових напруг поверхневого шару  $h_c$  та сходу стружки при швидкістному зубофрезеруванні ( $\rho=0,300$  мм) у залежності від кута ковзання  $\Psi_{CK}$

На рис. 13 представлена еюра зношування зуба шестірні. Ресурс закритих передач визначається пітінгом (рис. 14), при чому площа не повинна перевищувати 30% площі робочої поверхні зуба при глибині пітінгов понад 10% товщини зуба.

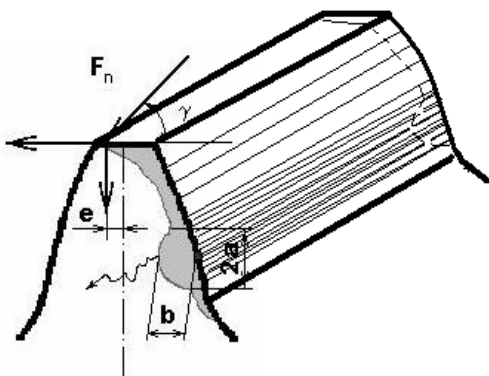


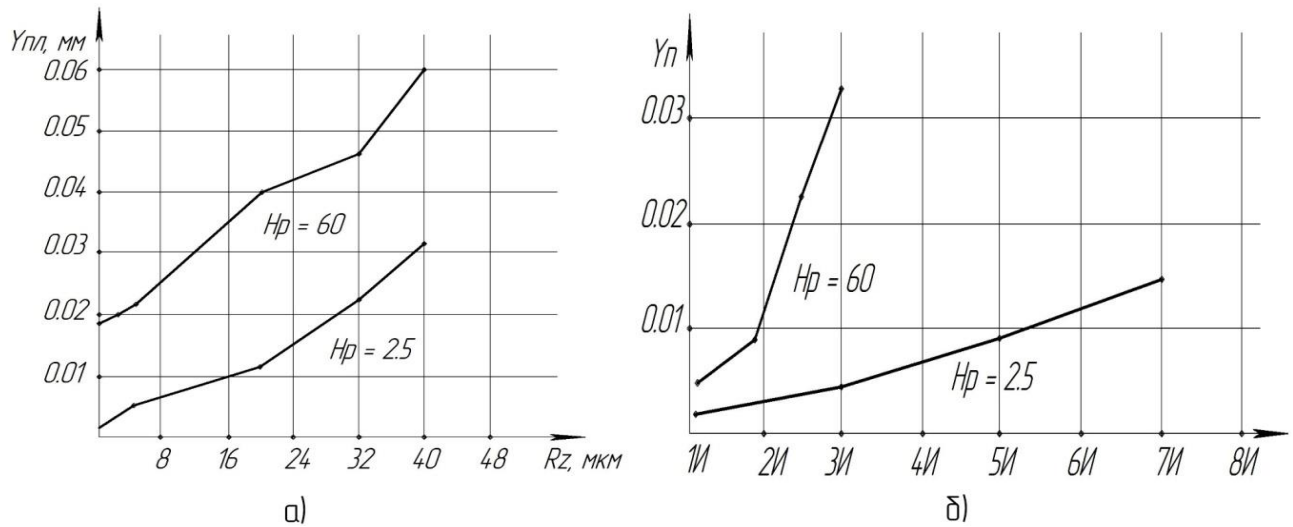
Рисунок 13 – Еюра зноса зуба шестерні зубчастої передачі



Рисунок 14 – Утворення пітінгов на поверхні зуба колеса

На рис. 15, а показані залежності зміни величини зноса зуба шестерні після

1000 годин роботи, при окружній швидкості 12 м/с, при регламентації параметра *И*. На рис. 15, б регламентація проводилася по параметру *Rz*.



*а* – традиційна методика регламентації якості поверхні, *б* – регламентація за допомогою комплексних параметрів; ( $H_p$  – висота згладжування макровідхилень, мкм)

Рисунок 15 – Залежність зносу поверхні зуба колеса від параметрів поверхневого шару

Запропоновано структуру моделі (табл. 3), на базі якої здійснюється вибір методу й режимів обробки поверхні ЗКЗК при забезпеченні експлуатаційних властивостей (*ЕВ*).

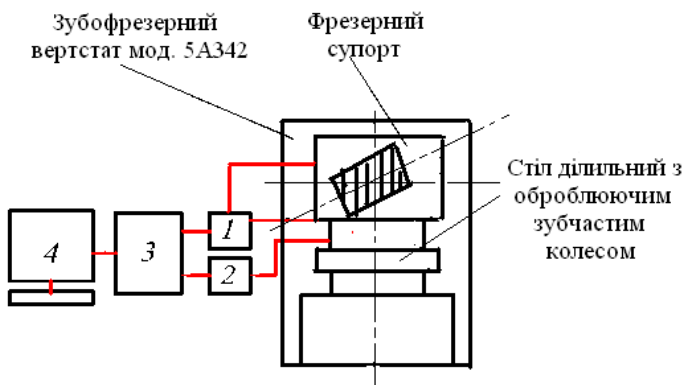
Таблиця 3 - Комплексні параметри (КП) застосовувані при технологічному забезпеченні *ЕВ* поверхонь ЗКЗК у період нормального зношування

Найменування поверхні	КП	Технологічне значення параметрів	Розрахунково-конструкторське значення параметрів
Працюючі в умовах викрашування активних поверхонь	$C_x$	$\frac{H_p \cdot W_p \cdot (R_p)^4}{(S_m)^6 \cdot (K^1)^{12}}$	$3375 \cdot \left[ \frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left( \frac{10 \cdot J_{пл} \cdot \lambda}{\chi \cdot P} \right)^6$
Працюючі в умовах відшаровування поверхневих шарів зубів	$\Pi$	$\left[ \frac{R_p \cdot W_p \cdot H_p}{(K^1)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$	$\left[ \frac{\sigma_T \cdot J_{пл}^6}{1.7 \cdot P} \right]^{\frac{1}{6}}$
Працюючі в умовах поломки зубів	$H$	$\frac{R_a^2 \cdot K^1}{W_z \cdot H_{man}}$	$\frac{P}{A \cdot \sigma_T}$
Працюючі в умовах абразивного зношування зубів	$И$	$\frac{R_a}{S_m \cdot K^1}$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E}$
Працюючі в умовах пластичного деформування	$Д$	$\frac{K^1 \cdot S_{mw}^{0.4} \cdot R_a}{W_a^{0.2} \cdot S_m \cdot t_m}$	$\frac{\gamma^{0.2}}{13.5} \cdot \left[ \frac{\sigma_{-1d}}{\sigma_{-1}} - 1 \right]$

зубів			
Працюючі в умовах заїдання	СМ	$R_p + W_p + H_p$	$\Delta - 2 \cdot 10^3 \cdot \frac{M}{\pi d l f} \cdot \frac{C}{E}$

**Розділ 5.** Присвячений експериментальним дослідженням продуктивності, точності і якості зубофрезерування крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.

Для визначення фізико-механічних характеристик оброблюваних зубчастих коліс використався діагностичний стенд (рис. 16).



Дослідження процесу динаміки чистового зубофрезерування крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, проводились за допомогою wavelet-аналізу й дозволили встановити основні залежності по забезпеченню якості, точності й продуктивності обробки зубчастих коліс.

Ядро функції є базовим вейвлетом,

Рисунок 16 – Функціональна схема стенда.

що стискає (розтягує) досліджуваний сигнал. Функція

$g \in L^2(\mathbb{R})$  прийнятна як вейвлет, якщо виконується умова

$$C_g \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|G(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (22)$$

де  $G(\omega)$  – є перетворення Фур'є  $g(t)$ ,  $L^2(\mathbb{R})$  – інтегровальний у квадраті сигнал або сигнал з обмеженою енергією;  $\mathbb{R}$  – дійсні числа.

Застосувавши вейвлет-преобразование до вираження (22) і вибравши значення параметра  $S$  таким, що вплив сусідніх резонансних частот буде незначним, одержана залежність

$$\psi(t) = \omega_e t + \varphi_e = \angle[W(S, \tau)] / \tau, \quad (23)$$

яка описує процес зміни динаміки чистового зубофрезерування. Продиференціював повну фазу  $\psi(t)$  за часом, знаходимо частоту  $\omega_{\partial\partial}$  у вираженні (23).

На рис. 17 показана схема верстатного зачеплення правого корпусу фрези й оброблюваного колеса.

Аналіз експериментальних досліджень підтвердив адекватність теоретичних виводів (рис. 18) при моделюванні процесу формування поверхневого шару зубчастих коліс із використанням вейвлет-аналіза при зустрічному фрезеруванні, де коефіцієнт нерівномірності фрезерування варіювання в межах  $K_n = 1,5 \dots 1,7$  і визначає макронапружений стан поверхневого шару, що й необхідно враховувати при розрахунках.

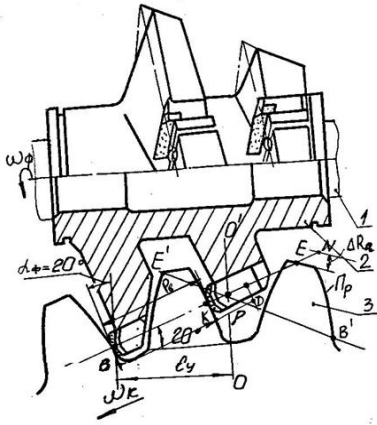


Рисунок 17– Схема станочного зачеплення правого корпусу фрези та оброблюваного колеса

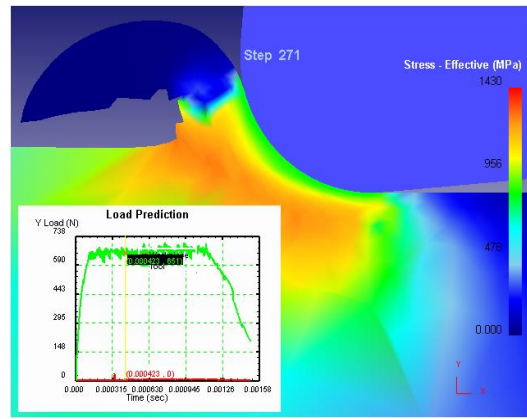


Рисунок 18 – Зміна макронапруження поверхневого шару при запровадженні ріжучого клина в оброблюєму поверхню зубчастого колеса

При чистовій і швидкісній зубообробці виникають вібрації, які викликають відхилення параметрів поверхневого шару зубчастих коліс, джерелом яких є: зміна радіуса округлення ріжучої крайки зубів зуборізної фрези –  $\rho$  при змінному знятті припуску при зустрічному фрезеруванні; швидкості різання –  $V$ ; подачі –  $S_{мин}$ ,  $S_o$ ; геометричні параметри зуборізних фрез; сполучення, величини й співвідношення параметрів радіуса округлення ріжучої крайки зубів зуборізної фрези –  $\rho$ , швидкості різання –  $V$ , подачі –  $S_{мин}$ ,  $S_o$ .

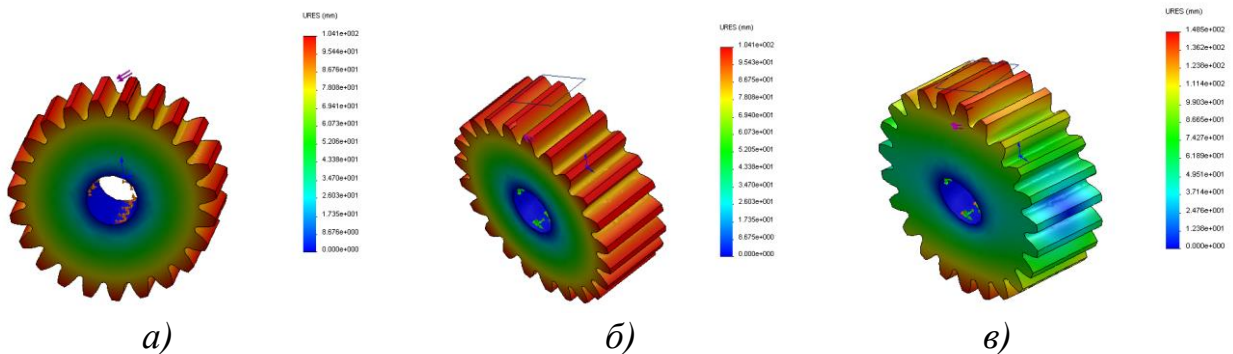
При зубофрезеруванні циліндричних ЗКЗК спостерігаються три основних типи вібрації (коливачь):

1. Вільна вібрація (власні коливачь) системи виникає внаслідок ударних впливів (Рис. 19). Ця вібрація буде загасати внаслідок дії демпфування верстата.
2. Змушені коливачь, виникають внаслідок дисбалансу привода верстата або під дією зовнішнього динамічного навантаження. Такі коливачь звичайно не досягають резонансної частоти системи верстат – інструмент – заготовка.

Імя моделі: Шестерня Сталь 45 m=20 z=23 In4 AutoCAD  
Імя дослідження: Исследование 2  
Тип з'явки: Частотний Перевладження2  
Параметр коливачь: 1. Значення = 191.52 Гц  
Цикл деформачь: 0.480202

Імя моделі: Шестерня Сталь 45 m=20 z=23 In4 AutoCAD  
Імя дослідження: Исследование 1  
Тип з'явки: Частотний Перевладження2  
Параметр коливачь: 1. Значення = 191.54 Гц  
Цикл деформачь: 0.480202

Імя моделі: Шестерня Сталь 45 m=20 z=23 In4 AutoCAD  
Імя дослідження: Исследование 1  
Тип з'явки: Частотний Перевладження2  
Параметр коливачь: 2. Значення = 248.79 Гц  
Цикл деформачь: 0.257241



а) – 181,5 Гц; б) – 191,54 Гц; в) – 248,79 Гц

Рисунок 19 – Вільна вібрація при зубофрезеруванні циліндричної крупномодульної шестірні, що загартована  $m = 20$  мм,  $z = 23$  с частотою власних коливачь

3. Змушені коливання, порушені під час процесу переривчастого зустрічного зубофрезерування і є основним впливом на процес формоутворення поверхневого шару.

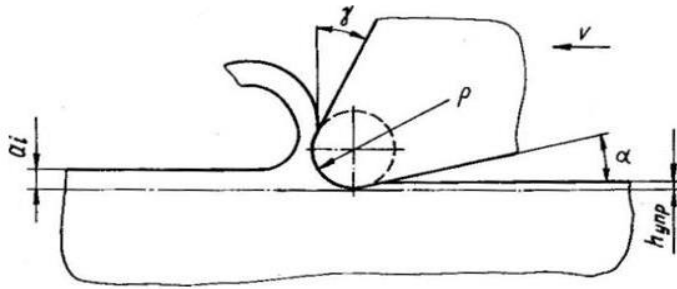


Рис. 20. Схема розподілу товщини зрізуемого шару  $\alpha_i$  та радіуса округлення ріжучої крайки зуба фрези  $\rho$

Процес врізання (рис. 20) теоретично здійснюється з нульової товщини зрізуемого слоя.

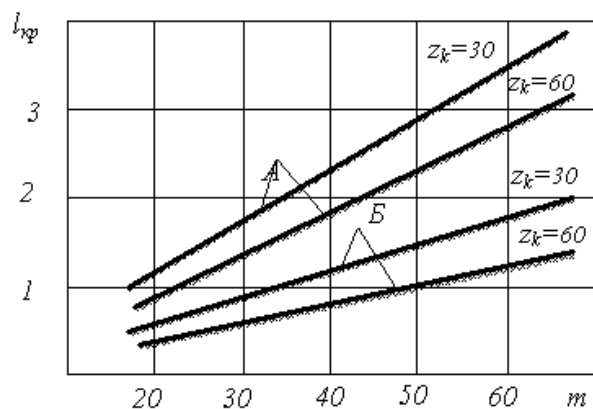
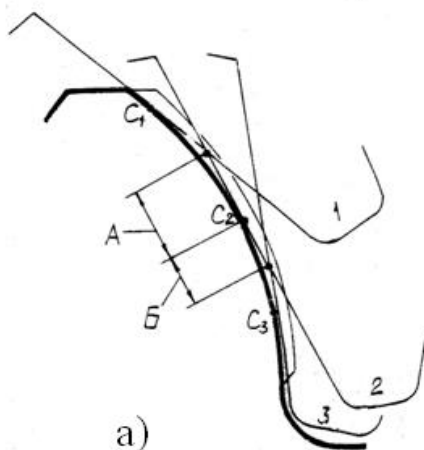
Наведені результати теоретичного дослідження балансу тепла при зубофрезеруванні в основі своєї погодяться з результатами експериментальних досліджень. Установлено, що більша частина роботи тертя ковзання перетворюється в теплоту, а з збільшенням поверхневої температури відзначається тенденція росту зношування ріжучої частини фрези.

Таким чином, для забезпечення експлуатаційних властивостей циліндричних зубчастих коліс у сполученні параметрів якості їхніх поверхневих шарів здійснено шляхом використання емпіричних залежностей, отриманих методами планування експерименту та шляхом використання теоретичних (аналітичних) залежностей, отриманих описом фізичної картини технологічного процесу формоутворення.

Таким чином, для забезпечення експлуатаційних властивостей циліндричних зубчастих коліс у сполученні параметрів якості їхніх поверхневих шарів здійснено шляхом використання емпіричних залежностей, отриманих методами планування експерименту та шляхом використання теоретичних (аналітичних) залежностей, отриманих описом фізичної картини технологічного процесу формоутворення.

**Розділ 6.** У розділі наведене інструментальне забезпечення високопродуктивної чистової зубообробки ЗКЗК для технологічної оптимізації довжини головних ріжучих крайок інструмента за рахунок залежності модуля та числа зубців обробляемого колеса.

Аналіз технологічних схем різання зубів черв'ячної фрези при напівчистовому й чистовому зубофрезеруванні (рис. 21, а) показує, що робоча довжина ріжучої крайки визначається з умови обов'язкового забезпечення перекриття резів у процесі огибання евольвентної поверхні зубами фрези й включає дві ділянки А і Б, розташовані відповідно нижче й вище точки профілювання С. Довжина ділянок А і Б збільшується зі збільшенням модуля й зменшенням числа зубів оброблюваного колеса й інструмента.





*а - схема огибання крайками фрези зуба колеса; б – залежність довжини крайки  $l_{кр}$  від модуля й числа зубів колеса*

Рисунок 21 – Визначення оптимальної довжини головних ріжучих крайок чистової фрези

Розрахунки показують (рис. 21, б), що навіть при модулі  $m = 60$  мм і числі зубів колеса  $Z_k = 30$  для забезпечення умов обробки досить мати ріжучі крайки інструмента довжиною  $l_{кр} = 5...6$  мм.

Виходячи із цього, розроблена технологія нарізання зубів чистовими черв'ячними фрезами, у яких довжина ріжучих крайок зубів не залежить від розмірів оброблюваних зубів колеса й становить 16...20 мм із урахуванням можливих погрішностей виготовлення інструмента по куту профіля й величині припуску, що зрізує.

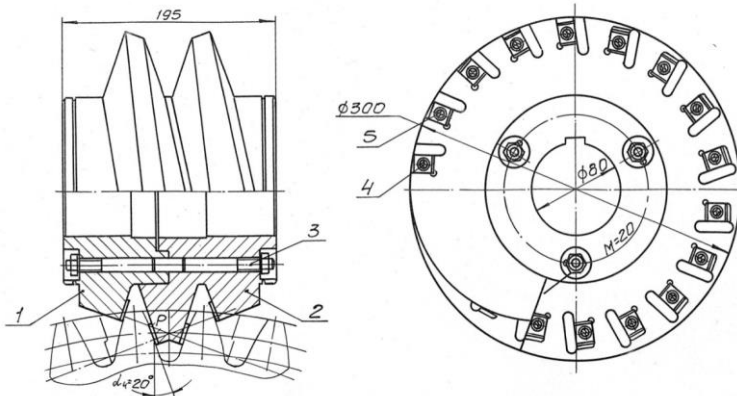


Рисунок 22 – Схема зубофрезерування двухвітковою збірною фрезой

*MF1 (MC3215), P15-P20 - MF2 (MC1466).*

Технологія оптимізації процесу формування ЗКЗК базується на підставі мінімізації довжини ріжучого леза зуба фрези, забезпечення якості виготовлення інструменту та стабільності процесу зубофрезерування і можливістю оснащення фрез, що не переточують, поворотними пластинками із твердого сплаву, кераміки, надтвердих матеріалів з отриманням необхідної точності виготовлення і якості обробки поверхні зубчастих коліс.

**Розділ 7.** У розділі приведені технологічне оснащення при інтенсивній і високоякісній зубообробці крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.

На рис. 23 наведено отримане при експериментальному дослідженні моделі розподіл інтенсивності напруг у зоні стружкоутворення при зубофрезеруванні та також досить чітко проглядаються зони пружного стиску поперед зуба фрези й розтягання під задньою поверхнею зуба фрези.

На рис. 22 представлена схема зубонарізання ЗКЗК двухвітковими фрезами. Спосіб фрезерування зубів двухвітковими фрезами реалізується при обробці зубчастих коліс модулем до 65 мм.

Фрези оснащуються ріжучими пластинами зі швидкорізальної сталі *P6M5DO5, S6-5-2-5, SKH55*, пластинами із твердого сплаву підгрупи застосування по *ISO DO10-DO20 - MK8 (MC318), M10 -*

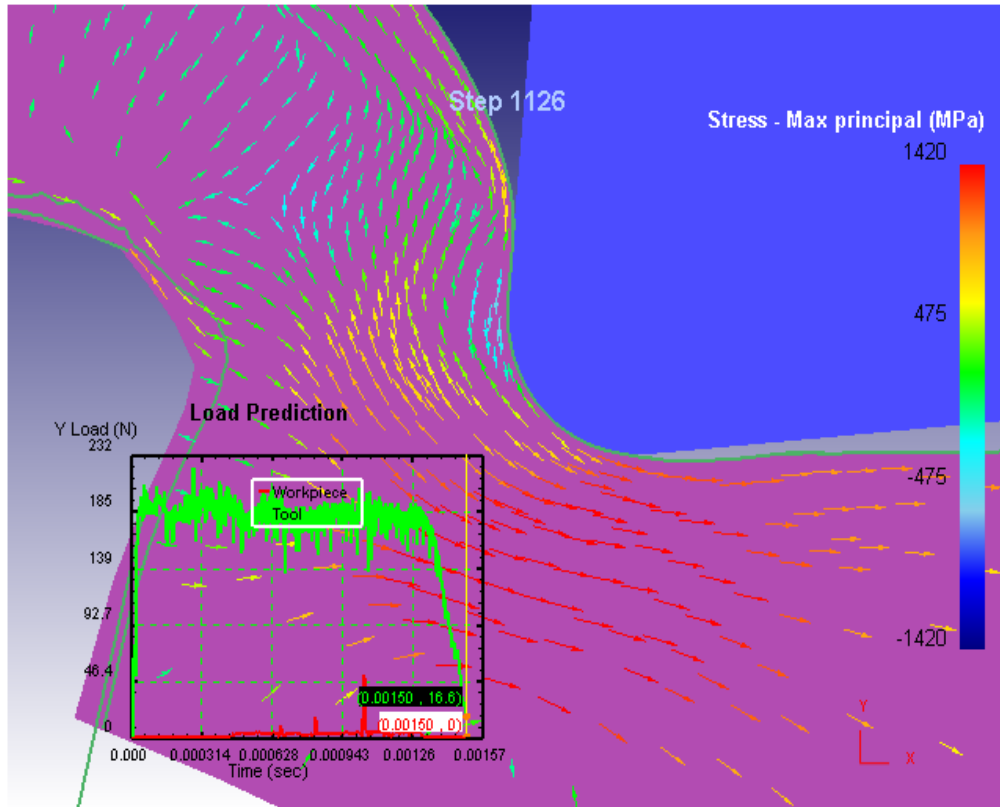
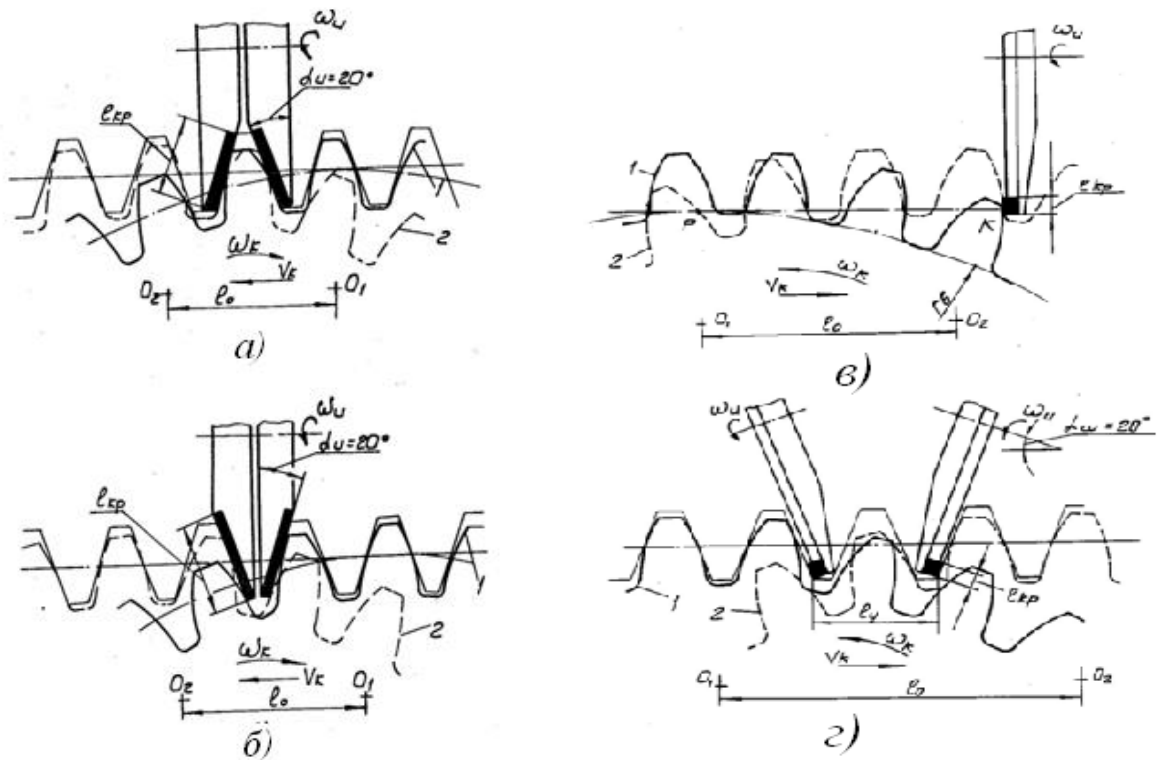


Рисунок 23 – Розподіл інтенсивності напруг в області формоутворення поверхневого шару

При реалізації технології лезвійної обробки коліс, що загартовані, замість зубострогання, інструментами дискового типу запропоновані схеми резання *I* і *II* (рис. 24, а, б). Перевага схем *I* і *II* у тім, що обидва інструменти розташовані на одній і тій же оправці, тобто є можливість здійснити привод обертання від одного електродвигуна. При схемі *III* (рис. 24, в) верстатна лінія зачеплення пари інструмент – деталь використовується нормаль до евольвенти *PK*, яка розташована горизонтально.

При використанні технологічних схем швидкісного зубофрезерування профільний кут зубів інструмента дискової немодульної фрези дорівнює  $\alpha_u = 0^\circ$  і фреза при обробці розташовується зі зсувом щодо вісі колеса на відстані  $l_0$ , по наступній

$$l_0 = r_b \cdot \operatorname{tg} \alpha_a. \quad (25)$$



а) - схема різання I; б) - схема різання II; в) - схема різання III;  
г) - схема різання IV

Рисунок 24 – Перспективні технологічні схеми швидкісного зубофрезерування дисковими немодульними фрезами

Схема різання IV (рис. 24, г) припускає одночасну обробку обох бічних поверхонь зубів колеса з використанням двох дискових фрез, розташованих з нахилом на кут  $\alpha_\phi = 20^\circ$ . Профільний кут зубів фрези дорівнює  $\alpha_\phi = 0^\circ$ .

Відзначено, що зі схем різання для дискових фрез, які оснащені мінералоке-рами (III, IV) найбільш ефективною є схема IV. Тут шлях обкату – найменший, але необхідно враховувати величину допоміжного часу, пов'язаного з переустановкою інструмента й підналагодженням заготовки колеса.

Схема III є другою по ефективності. Недолік її в тому, що через великий вихідний зсув інструмента щодо вісі колеса на існуючих верстатах ВАТ “КЗТС” (м. Коломна) можлива обробка косозубих коліс тільки із зовнішнім діаметром до 800 мм. Схема IV зручна в експлуатації, тому що не вимагає переустановки фрез.

Для чистової обробки загартованих коліс на верстатах фірми “MAAG” розроблені 2 конструкції спеціальних фрезерних супортів: одношпіндельна, реалізуюча схему III, і двошпіндельна, реалізуюча схему різання IV (рисунки 25 та 26). Двошпіндельний супорт складається із двох шпіндельних головок (рис. 27), кожна з яких має незалежний привод і нахилена на кут  $\alpha_\phi = 20^\circ$ .

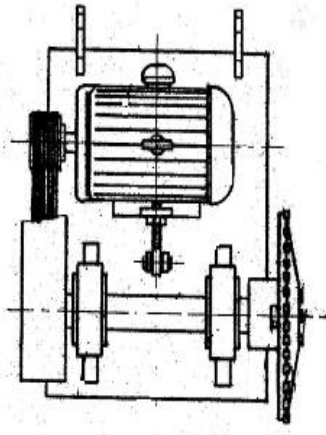


Рисунок 25 – Принципіальна схема одношпіндельного спецуппорта

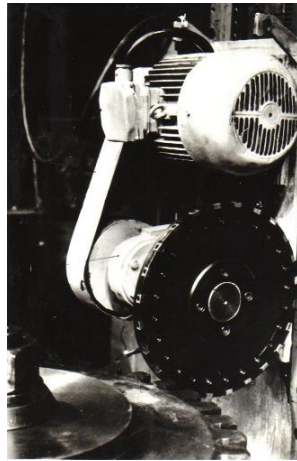


Рисунок 26 – Робоча конструкція одношпіндельного спецуппорта

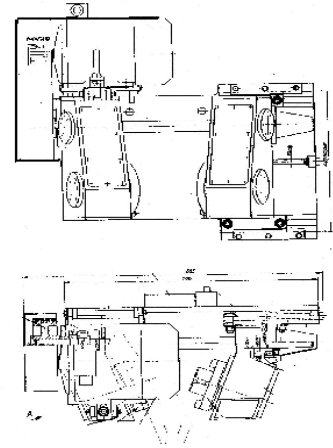


Рисунок 27 – Принципіальна конструкція двухшпіндельного спецуппорта

Взаємозв'язок залежності швидкості різання від різних технологічних факторів, фізико-механічних властивостей матеріалів, інструмента й ЗКЗК дозволив здійснити вибір раціональних режимів різання в кожному конкретному виробничому випадку з урахуванням необхідних показників стійкості інструмента, продуктивності обробки, точності і якості зубофрезерування.

**Розділ 8.** Наведено результати промислового впровадження результатів досліджень, наведені конкретні приклади по призначенню й забезпеченню параметрів поверхневого шару циліндричних ЗКЗК, виходячи з їхнього функціонального призначення, і програма для рішення цих завдань.

Формування моделі параметрів норм точності при зубофрезеруванні, що показано на рис. 28, розрахункова схема геометричного зсуву й перекосу площини обробки колеса наведена на рис. 29

Тим самим, зробивши повний оберт координатних осей від  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$  одержана функціональна залежність кінематичного ексцентриситету  $P$  від фазового кута повороту зубчастого колеса (рис 29).

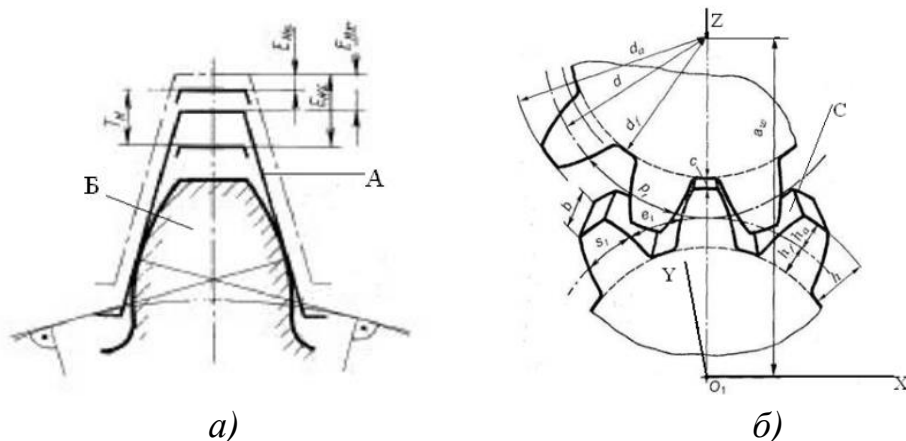
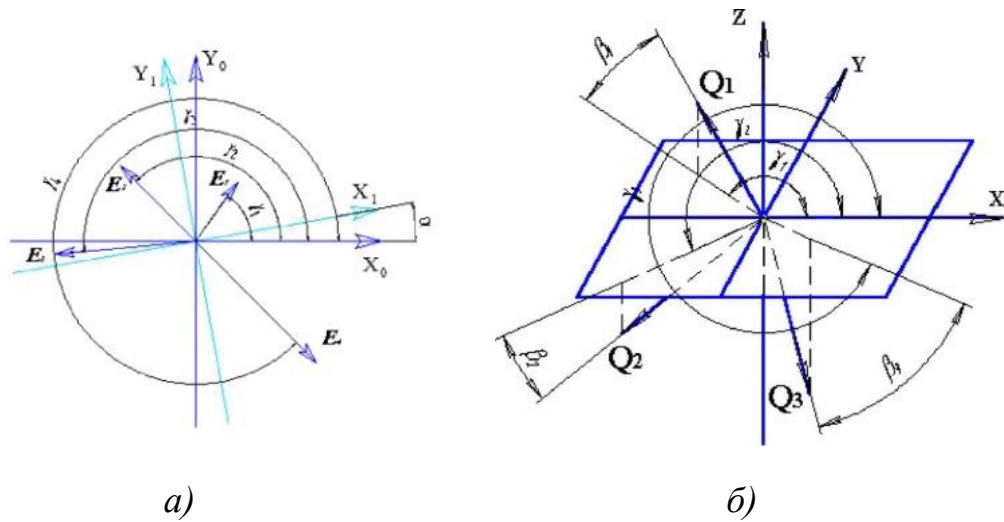


Рисунок 28 – Загальна модель формування параметрів точності при зубофрезеруванні



*a* - геометричне зміщення площини колеса; *б* – перекош площини обробки зубчастого колеса

Рисунок 29 – Разрахункова схема зсуву й перекошу площини обробки колеса

Користуючись принципом суперпозиції, побудована функціональна залежність погрішності вінця від фазового кута повороту зубчастого колеса

$$f\Delta(\alpha) = E(\alpha) + Q(\alpha) + P(\alpha), \quad (26)$$

представлена на рис. 30 і дає функціональну залежність похибки зубчастого вінця від фазового кута поворота колеса відносно норм кінематичної точності (рис. 30, *a*), норм плавності (рис. 30, *б*), норм бічного зазору (рис 30, *в*), сумарної погрішності (рис. 30, *г*) зубчастого колеса після обробки та контролю..

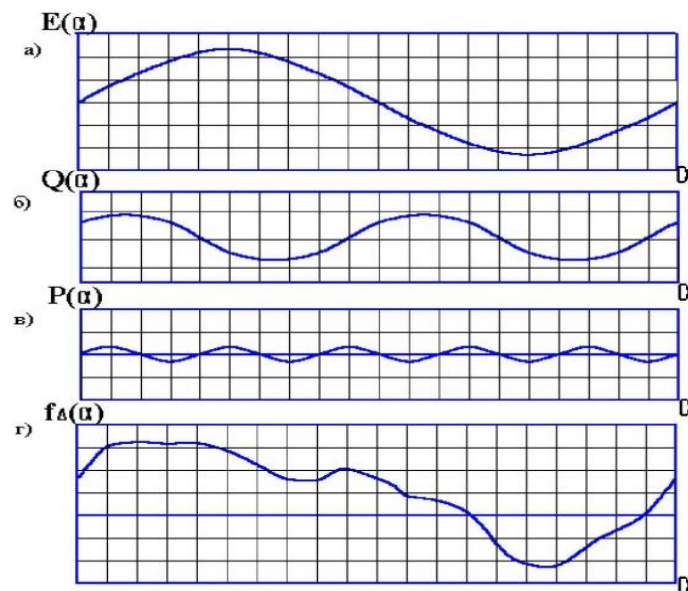


Рисунок 30 – Схема формування функціональної залежності погрішності зубчастого вінця від фазового кута поворота колеса

Визначена припустима інтенсивність зношування з умови, що зубчасте колесо при контактi із зачіплюваним колесом у зоні контакту 70% відбувається тер-

тя-кочення, 30% відбувається тертя ковзання або правильно буде – проковзування..

Виробниче впровадження запропонованої технології лезової обробки ЗКЗК з використанням одношпindelного спецсупорта й дискових фрез здійснено на зубофрезерному верстаті мод. 5А342 (рис. 31). Машинний час обробки колеса склало  $T_{маш}=6$  годин, що в 6 - 7 разів менше, ніж у випадку застосування зубошліфування. По різниці сусідніх окружних кроків зубів і кроку зачеплення колеса відповідало 7-й ступеня точності за ГОСТ1643-81. Шорсткість оброблених поверхонь зубів знаходилась в межах  $R_a = 2,5 \dots 1,25$  мкм.

У табл. 4 наведені методи зубообробки для забезпечення параметрів стану поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс.

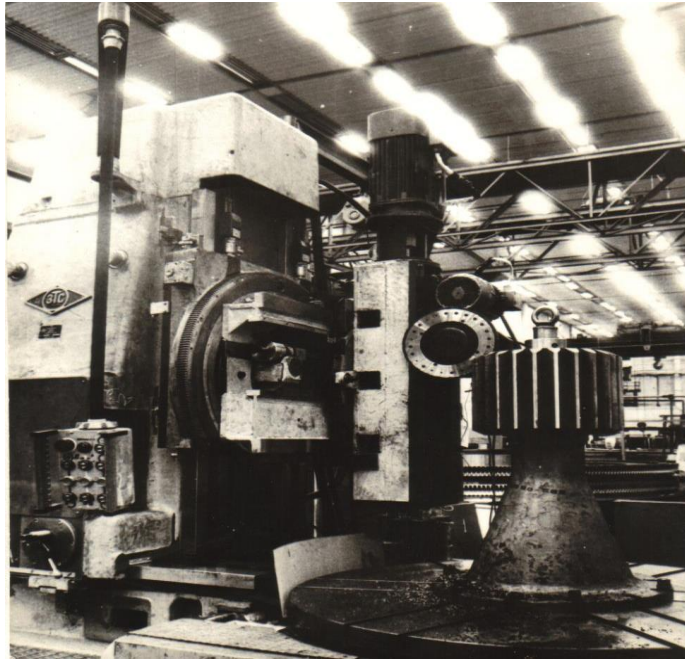


Рисунок 31 – Обробка зубів, що загартовані, з застосуванням одношпindelного спецсупорта та дискових фрез на зубофрезерном верстаті мод. 5А342

Таблиця 4 - Можливості методів зубообробки в забезпеченні системи параметрів стану поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані

Метод обробки	Параметри стану поверхневого шару								Фізико-механічні властивості поверхневого шару			
	Шорсткості					Волністості						
	$R_a$ мкм	$R_z$ мкм	$R_p$ мкм	$S_m$ мм	$S$ мм	$W_z$ мкм	$W_m$ мкм	$S_{mw}$ мм	$k=H_{\mu 0}/H_{\mu} \%$	$h_{\mu}$ мм	$\sigma_0$ Мпа	$h_{\sigma}$ мм
Зубофрезерування	4,5	60	50,0	0,5	0,1	8,0—	5,0—	2,5—	120—	0,2	250	0,1—
	2,5	40	16	0,3	60		16	10,0	180	—	—	0,2
	0,9	20	4,0	—	—	25,0	0,63	0,8-4,0	110—	0,5	300	0,08
Швидкісне зубофрезерування	1,9	16,	10,0	1,2	1,2	12,5	8,0—	2,5-	110—	0,15	300	0. 015
	0,8	0—	—	5	5-	—	40	12,0	180	—	—	—
	0,40		30	—	5,0	60,0	2,0-	0,8—	100—	0,25	350	0,25
	0,20	50	2,5	5,0	0,3	3,0	12,5	8,0	150	0,08	200	0,10
Накатування конічними роліками	1,8	32	16,0	0,2	0,2	12,5	6,3—	2,5-	130—	0,25	250	0,16
	0,8	—	—	0	0—		25	15,0	190	—	—	—
	0,40	200	125	—	1,6	40,0	1,25	0,8—	120—	0,6	350	0,28

	0,20										
--	------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Зубофрезерування фрезами, які оснащені ріжучими пластинками із твердого сплаву й минералокерамики, після термообробки ТВЧ і спреєрного загартування (сталь 34ХНМ) характеризуються наступними параамтрами шорсткості:

$$R_a = 4830 \cdot \frac{S_z^{1.69} \cdot t^{0.15}}{V^{1.25} \cdot \rho^{0.14} \cdot Z_1^{0.24} \cdot Z_2^{0.28} \cdot (HRC)^{4.02} \cdot t^{0.32} \cdot K_{\text{фр}}^{1.24}} \cdot \frac{1}{k_m \cdot k_0}, \quad (27)$$

$$R_p = 8730 \cdot \frac{S_z^{1.15}}{V^{1.27} \cdot \rho^{0.24} \cdot Z_1^{0.14} \cdot Z_2^{0.17} \cdot (HRC)^{2.82} \cdot t^{0.26} \cdot K_{\text{фр}}^{1.24}} \cdot \frac{1}{k_m \cdot k_0}, \quad (28)$$

$$W_z = 5500 \cdot \frac{S_z^{1.01} \cdot t^{0.46} \cdot \rho^{0.16} \cdot \gamma^{0.54}}{V^{1.52} \cdot \rho^{0.24} \cdot Z_1^{0.14} \cdot Z_2^{0.17} \cdot (HRC)^{2.82} \cdot K_{\text{фр}}^{1.24}}, \quad (29)$$

$$S_m = 17 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(HRC)^{1.58}}{\rho^{0.24} \cdot Z_1^{0.07} \cdot Z_2^{0.11} \cdot V^{2.04}} \cdot \frac{k_0}{k_m}. \quad (30)$$

За результатом проведених натурних досліджень надані рекомендації по здійсненню процесу зубообробки коліс:

1. Зміна товщини зрізаємого шару при досягненні мінімального кута ковзання  $\Psi_{\text{скмин}}$  змінює коефіцієнт тертя при наявності обов'язкового сплеску, що несприятливо позначається на динаміці різання і якості обробленої поверхні й визначається коефіцієнтом тертя, що залежить від молекулярно-атомної шорсткості оброблюваної поверхні й інструмента.

2. Максимальний кут контакту зуба фрези з оброблюваним зубчастим колесом (максимальний кут ковзання)  $\Psi_{\text{мак}}$  визначається, як

$$\sin \psi_{\text{мак}} = \frac{H_i}{R_{\text{од}}} = \frac{2 \cdot H_i}{d_{\text{од}}} = \frac{\sqrt{t \cdot (d_{\text{од}} - t)}}{d_{\text{од}}}, \quad (31)$$

$$\psi_{\text{мак}} = \arcsin \frac{H_i}{R_{\text{од}}} = \arcsin \frac{2 \cdot H_i}{d_{\text{од}}} = \arcsin \frac{2 \cdot \sqrt{t \cdot (d_{\text{од}} - t)}}{d_{\text{од}}}, \quad (32)$$

і дає можливість визначити з рахунком мінімального кута ковзання  $\Psi_{\text{скмин}}$  ефективність процесу зубофрезерування.

3. При збільшенні радіуса округлення ріжучої крайки зубів фрези  $\rho$  відзначається ріст залишкових напруг, тобто при  $\rho \geq a_i/K_{\text{сож}}$ , при  $\rho \leq a_i/K_{\text{сож}}$ , процес пластичної деформації переходить у різання.

Технологічний регламент вибору й призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні гарантує забезпечення високої продуктивності при максимальній стійкості інструмента, технологічне забезпечення параметрів поверхневого шару ЗКЗК при максимальній оброблюваності, високу технологічну стабільність зубооброблюючого устаткування при обробці циліндричних зубчастих коліс.

У додатку представлені таблиці допоміжного характеру, що є частиною інформаційного забезпечення методик проектування технологічних процесів обробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, деякі результати практичного використання наукових досліджень, а також акти впровадження на ПАО «НКМЗ» (м. Краматорськ), ТОВ «КЗМО» (м. Костянтинівка), із сумарним

річним економічним ефектом 787тис.375 грн..

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі використання сучасних положень технологічного впливу й узагальнення наукових досягнень у зубообробці крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, сформульовані й реалізовані загальні принципи розробки технологічних основ забезпечення продуктивності, точності і якості зубообробки ЗКЗК.

1. Визначено й математично описано взаємозв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь ЗКЗК, з показниками якості, що дозволило вирішити основну технологічну проблему зубообробки – забезпечення продуктивності, точності і якості зубообробки ЗКЗК.

2. Розроблені технологічні засоби зубофрезерування ЗКЗК, які неможливо було виконати на існуючому обладнанні та розроблена перспективна технологічна схема швидкісного зубофрезерування ЗКЗК замість зубостругальної операції з забезпеченням якості поверхневого шару з урахуванням радіуса округлення ріжучої крайки інструменту, який збільшується на протязі часу, що забезпечило підвищення ефективності швидкісного зубофрезерування зі зменшенням кута ковзання і збільшенням кута, на якому здійснюється зрізання поверхневого шару.

3. Одержано подальший розвиток підхода до вибору методів зубообробки поверхонь зубчастих коліс за допомогою апарата відповідностей, в основу якого покладено розрахунок вимог до поверхневого шару крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, за допомогою графів, розрахунку параметрів стану поверхневого шару ЗКЗК залежно від умов їхньої обробки, дослідження впливу параметрів хвилястості на експлуатаційні властивості циліндричних ЗКЗК. Це дозволило розробити теоретичні основи технологічного впливу для досягнення необхідної якості й точності поверхневого шару з урахуванням технологічної спадковості.

4. Розширені та встановлені й науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки стану крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, після лезової обробки, оцінки довговічності ЗКЗК, оцінки мінімально можливих пластичних деформацій зубів, що гарантує вибір технологічних параметрів для забезпечення гарантованого строку експлуатації зубчастих передач.

5. Розроблений механізм технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь зубів ЗКЗК на основі математичного структурно-параметричного моделювання процесу їхньої обробки з метою відповідності забезпечення конструкторських вимог.

6. Математично описані взаємозв'язки якісних і кількісних характеристик поверхневого шару зуба колеса й експериментально підтверджені загальні принципи керування параметрами точності, якості й продуктивності зубообробки ЗКЗК.

7. Сформульовано наукове положення по технологічному оснащенню для інтенсивної й високоякісної зубообробки, що дозволило розробити технологічні регламенти зубообробки ЗКЗК.

8. Розроблено методики: моделювання взаємозв'язку експлуатаційних властивостей поверхонь ЗКЗК з показниками якості за допомогою теорії графів, вибору й призначення технологічного забезпечення системи параметрів, оцінки впливу



вібрацій на процес формування, критеріального методу оцінки впливу теплового балансу на продуктивність, точність і якість формування поверхневого шару, що дозволяє сформувавши єдиний технологічний підхід обробки ЗКЗК.

9. Розроблено технологічну систему для чистового зубофрезерування ЗКЗК замість зубошліфування для зубчастих коліс ступеня точності 6ВГОСТ1643-81...8ВГОСТ1643-81, що працюють у широких діапазонах швидкостей (від 0,5 до 30 м/с), потужностей (до 50 кВт до 500000кВт) діаметром коліс від ф500мм до ф12000 мм, висотою зубчастого вінця до 1000 мм, модулем від  $m=12$  до  $m=65$  мм.

10. Розроблено спеціальне оснащення для забезпечення технологічного оснащення при інтенсивній і високоякісній швидкісній зубообробці ЗКЗК.

11. Результати роботи впроваджені на: ПАО «НКМЗ» (м. Краматорськ), ТОВ «КЗМО» (м. Костянтинівка), та впроваджені в навчальний процес у Донбасській державній машинобудівній академії.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ З ТЕМИ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Ключко А. А. Специальные технологии зубообработки крупномодульных закаленных колес: монография / Ю. В. Тимофеев, В. Ф. Шаповалов, А. А. Ключко, Е. В. Мироненко, В. В. Трунов, О. Е. Мироненко. – Краматорск :ДГМА, 2011. – 128 с. ISBN 978-966-379-524-9.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтовання процесу формування шорсткості та точності поверхонь при розробці спеціальних технологій обробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.*

2. Ключко А. А. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес [Текст] / Н.В. Кравцов, Ю.В. Тимофеев, А.А.Ключко А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. И. Волошин, А. Н. Кравцов; Науч. Ред.. А.А.Пермяков; ВолГТУ – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с.,ил., табл.; - (Серия:Управление качеством технологических процессов в машиностроении / общ. ред. Ю.М. Соломенцев), ISBN 978-59903090-6-7.

*Здобувачем виконані теоретичні та практичні дослідження по удосконаленні процесу зубообробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, з метою забезпечення продуктивності та якості обробки.*

3. Ключко, А. А. Технологическое основы обеспечения процесса зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / А. А. Ключко, А. Н. Кравцов; Донбасская государственная машиностроительная академия; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" - Краматорск: ДГМА; Ирбит: ОНИКС, 2014 – 299 с.: ил., табл.; - (Серия: «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении» / Общ. ред. Ю.М. Соломенцев). ISBN 978-5-906703-02-6.

*Здобувачем виконані теоретичні та експериментальні розробки по технологічному впровадженні нових схем швидкісного зубофрезерування крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, і дослідження по формоутворенню поверхневого шару коліс.*

4. Ключко А. А. Исследование влияния некоторых конструктивных параметров агрегатно-модульных резцов на прочность и износостойкость /Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, О. Я. Белицкая //Надежность инструмента и оптимизация

технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2004. – Вып. 16. – С. 13–17.

*Здобувачем розроблена методологія прийняття технологічних рішень по призначенню конструктивних параметрів збірного інструмента.*

5. Клочко А. А. Взаимосвязь мощности и крутящего момента при формообразовании зубьев колес и реек / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2007. – Вып. 22. – С. 30–34.

*Здобувачем запроваджена методика кількостної оцінки енергетичних параметрів процесу обробки.*

6. Клочко А. А. Топография износа зубонарезного инструмента при формообразовании зубчатых реек / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : К. : ДГМА, 2008. – Вып. 23. – С. 69–73.

*Здобувачем розроблена методика вивчення впливу зносу інструменту на точність обробки зубчастих рійок та коліс.*

7. Клочко А. А. Вибростабилизирующая обработка крупногабаритных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Д. Ковалев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – Вып. 25. – С. 90–94.

*Здобувачем виконане теоретичне обґрунтування процесу вібростабілізації крупногабаритних зубчастих коліс.*

8. Клочко А. А. О патриархе зубообработки А. К. Сидоренко / В. Ф. Шаповалов, В. И. Печеный, А. А. Клочко, А. Н. Коротун, Г. И. Михайлов // Вісник Національного технічного університету ХПІ: Проблеми механічного приводу. – Харків : НТУ ХПІ, 2009. – № 20. – С. 3–7.

*Здобувачем виконан аналіз розроблених конструкцій спеціальних фрез з метою розширення їх застосування.*

9. Клочко А. А. Синтез кинематики универсального зубообрабатывающего станка с ЧПУ / М. С. Мельник, А. А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – Вып. 27. – С. 63–68.

*Здобувачем сформульовані загальні принципи прийняття рішень в задачах синтезу кінематики універсального зубооброблювачого верстата з програмним забезпеченням.*

10. Клочко А. А. Технология зубофрезерования закаленных крупномодульных колес специальными червячными фрезами с минимизирующими параметрами главных режущих кромок / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Наукові нотатки : міжвуз. зб. – Луцьк, 2010. – Вип. 29. – С. 209–216.

*Здобувачем розроблені теоретичні положення технології зубофрезерування крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані спеціальними червячними фрезами з мінімізуючими параметрами головних ріжучих кромок.*

11. Клочко А. А. Технология обработки крупномодульных зубчатых колес однокорпусными фрезами двухстороннего резания с чередующимися коническими зубчатыми рейками / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 49. – С. 111–116.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування технології зубообробки крупномодульних зубчатих коліс, що загартовані, однокорпусними фрезами двостороннього різання.*

12. Клочко А. А. Технология обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес твердосплавными червячными фрезами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 40. – С. 109–123.

*Здобувачем запропонован технологічний процес обробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, твердосплавними червячними фрезами.*

13. Клочко А. А. Технологические аспекты обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – Вып. 26. – С. 183–190.

*Здобувачем розроблена методологія прийняття технологічних рішень при обробці крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.*

14. Клочко А. А. Технологические способы повышения точности зубофрезерования универсальными червячными фрезами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 25. – С. 134–141.

*Здобувачем сформульована задача та методи її дослідження по підвищенню точності обробки зубчастих коліс.*

15. Клочко А. А. Обеспечение технологической точности обработки крупномодульных зубчатых колес специальным профилированием фрез / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, О. Е. Мироненко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ ХПІ, 2010. – № 24. – С. 77–83.

*Здобувачем розроблені методи профілювання фрез з метою підвищення точності обробки зубчастих коліс.*

16. Клочко А. А. Технология зубообработки закаленных колес червячными фрезами с неперетачиваемыми поворотными пластинками и твердосплавными роликами / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2010. – Вып. 27. – С. 69–77.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування технології зубообробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані червячними фрезами з непереточуваними поворотними пластинками.*

17. Клочко А. А. Технология чистовой лезвийной обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Клочко // Вестник Черниг. гос. технолог. ун-та. – 2011. – № 2(49). – С. 58–68.

18. Клочко О. О. Дослідження динаміки зубофрезерування крупномодульних загартованих коліс / Ю. В. Тимофійєв, О. М. Шелковий, О. О. Клочко // Вісник Інженерної академії України. – 2011. – № 3. – С. 99–103.

*Здобувачем проведена обробка отриманих результатів експериментальних досліджень по впливу вібрацій на якість поверхневого шару.*

19. Клочко А. А. Технологические особенности кинематики зубообработки крупномодульных закаленных колес дисковыми немодульными фрезами / А. А. Клочко // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – № 2(62). – С. 78–83.

20. Клочко А. А. Технология предварительной обработки закаленных зубчатых колес и реек дисковыми сборными фрезами с отдельной схемой резания / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. С. Лебединский // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск :ДГМА, 2011. – Вып. 28. – С. 219–225.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування процесу обробки зубчастих коліс та рійок, що загартовані, дисковими збірними фрезами з роздільною схемою різання.*

21. Клочко А. А. Новая технология скоростной обработки закаленных крупномодульных зубчатых колес специальными дисковыми фрезами / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов // Вісник СевНТУ : зб. наук.пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2011. – Вип. 118. – С. 139–144.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування по створенню нової технології швидкісної обробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.*

22. Клочко А. А. Технология зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов поверхностно-пластическим деформированием / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, В. И. Печеный // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск :ДГМА, 2011. – Вып. 29. – С. 124–130.

*Здобувачем розроблена методологія керування пружними переміщеннями при зубообробці зубчастих вінців поверхнево-пластичним деформуванням.*

23. Клочко А. А. Импульсная электроконтактная технология зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов накатными роликами / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, В. Ф. Шаповалов, В. И. Печеный // Вісник Національного технічного університету ДПІ: Проблеми механічного приводу. – Донецьк : НТУ ДПІ, 2012. – № 9(205). – С. 194–201.

*Здобувачем запропонован технологічний регламент зубообробки накатними головками.*

24. Клочко А. А. Научные предпосылки определения условий формирования величин упроченного слоя при формообразовании крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко // Вісник Національного технічного університету України КПІ: Проблеми механічного приводу. – Київ : НТУУ КПІ, 2012. – № 64. – С. 288–293.

*Здобувачем розроблені теоретичні обґрунтування та умови зміцнення поверхневого шару зубчастих коліс, що загартовані.*

25. Клочко А. А. Технологические особенности зубофрезерования крупномодульных коррегированных закаленных колес / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник СевНТУ : зб. наук.пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2012. – Вип. 129. – С. 238–245.

*Здобувачем розроблені технологічні особливості зубофрезерування корегованих*

*крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.*

26. Клочко А. А. Научное обоснование технологических методов обеспечения эксплуатационных свойств закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. И. Волошин, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 30. – С. 194–204.

*Здобувачем розроблені технологічні методи забезпечення експлуатаційних властивостей крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.*

27. Клочко А. А. Анализ параметров поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес, характеризующих их эксплуатационные свойства / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Д. Кошелева, И. Г. Годзула // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 118–131.

*Здобувачем виконані дослідження про впливання поверхневих умов на експлуатаційні властивості зубчастих коліс.*

28. Клочко, А. А. Области оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. А. Клочко, Ю. В. Тимофеев., А. Н. Шелковой// Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 332–343.

*Здобувачем обґрунтовані параметри забезпечення оптимального керування процесом зубобробки.*

29. Клочко А. А. Исследование гидродинамических свойств высокоскоростных тяжело нагруженных зубчатых цилиндрических передач тяжелых токарных станков / В. Д. Ковалев., А. А. Клочко, Д. А. Кравченко, Е. Н. Киреев // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 79–93.

*Здобувачем запропоновано забезпечити передачу крутильного моменту зубчастих передач через рідину, яка знаходиться у неньютонівському стані, під час контакту за допомогою спеціальних гідрокарманів на евольвентній поверхні ведучого колеса.*

30. Клочко А. А. Обобщенная модель технологического процесса формообразования цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, В. А. Чмырь, М. А. Саенко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 235–250.

*Здобувачем розроблена модель управління технологічним процесом формоутворення крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, з забезпеченням експлуатаційних вимог.*

31. Клочко А. А. Методика расчета параметров состояния поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес в зависимости от условий их обработки / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, Д. В. Ефремов, А. А. Клиновский // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 31. – С. 157–173.

*Здобувачем розроблена методика розрахунків технологічних параметрів з забезпеченням експлуатаційних параметрів крупномодульних зубчастих коліс, що*

загартовані.

32. Клочко А. А. Информационное моделирование технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Д. Кошелева, И. Г. Годзула // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 351–358.

*Здобувачем запропоновано інформаційне моделювання технологічних процесів зубообробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.*

33. Клочко А. А. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – Вып. 32. – С. 274–280.

*Здобувачем теоретично обґрунтоване формування параметрів поверхневого шару крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, технологічними параметрами обробки.*

34. Клочко А. А. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : Різання та інструмент в технологічних системах. – Харків : НТУ ХПІ, 2013. – № 83. – С. 286–295.

*Здобувачем розроблені теоретичні технологічні засоби забезпечення заданих експлуатаційних параметрів крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.*

35. Клочко А. А. Исследование динамики зубофрезерования крупномодульных закаленных зубчатых колес с помощью WAVLET-анализа [Текст] / А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Проблемы проектирования и автоматизации машиностроительных производств: сборник научных трудов. – Волгоград: ВолгГТУ, Тольятти: Ирбит: ЗАО «ОНИКС», 2013. - 208 с.: ил., табл.; - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ.ред. Ю. М. Соломенцева). (с. 106 - 115).

*Здобувачем проведені експериментальні дослідження, визначений характер і механізм виникнення вібрацій, зміни сил різання та їх вплив на якість обробляємх евольвентних поверхонь крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані за допомогою WAVLET-аналіза.*

36. Клочко А. А. Вибір і призначення систем параметрів поверхневого шару циліндричних великомодульних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості / Е. В. Мироненко, О. М. Шелковий, О. О. Клочко, О. М. Кравцов // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». : зб. наук. пр. : Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. Львів. – 2013. – №772. – С. 207–213. *Здобувачем запропонована математична модель систем параметрів поверхневого шару циліндричних великомодульних зубчастих коліс.*

37. Клочко А. А. Технологические основы обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, Е. В. Мироненко // Вісник До-

нецького Національного технічного університету : зб. наук. пр. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк : ДНТУ, 2013. – № 1 (10)'(2013). – С. 131–140.

*Здобувачем розроблені технологічні засоби забезпечення продуктивності зубообробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.*

38. Клочко А. А. Оптимизация технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес [Текст] / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Харьков. Том 4, – № 7 (64)'(2013). – С. 49–55.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування процесу виникнення стружкоутворення при обробці крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, та вплив параметрів різання на властивості оброблених поверхонь.*

39. Клочко А. А. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник СевНТУ : зб. наук.пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203–210.

*Здобувачем розроблен механізм утворення зубообробки поверхневого шару і закладені вихідні дані по утворенню функцій для розробки моделювання процесу оптимального керування параметрами точності, якості та продуктивності.*

40. Клочко А. А. Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ ХПІ, 2013. – Вип. 8. – С. 185–200. – Укр., рос., англ. мовами.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування критеріїв формування поверхневого шару.*

41. Пат. 19936 UA, МПК В23С 7/00. Вихрова головка для обробки ходових гвинтів / О. О. Клочко, О. Ф. Бабін, О. В. Павленко. – № 200604574 ; заявл. 25.04.06; опубл. 15.01.07, Бюл. № 1. – 3 с. : ил.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування технології обробки ходових гвинтів з застосуванням гідростатичних опір обертання віхревої головки.*

42. Клочко А. А. Инструментальные системы и инструментальное обеспечение / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, Е. В. Марчук. – Краматорськ : ДГМА, 2007. – 116 с.

*Здобувачем розроблені теоретичні положення по інструментальному забезпеченню технологічних систем.*

43. Клочко А. А. Масляная СОЖ при зубообработке: эффективность и перспективы их применения. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, А. Г. Суслов, А. А. Клочко [и др.] // Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2008. – № 5. – С. 70–73.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування процесу формування шорсткості та точності поверхні при зубообробці з застосуванням мастильно охолоджуючої ріднини.*

44. Ключко А. А. Расчет зубчатых передач в ремонтном производстве. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2008. – № 3. – С. 40–46.

*Здобувачем запроваджена методологія кількісної оцінки параметрів розрахунку зубчастих циліндричних передач.*

45. Ключко А. А. Крупномодульные закаленные колеса. Новые технологические направления зубообработки. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, В. Ф. Шаповалов, А. А. Ключко [и др.] // Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2009. – № 4. – С. 18–19.

*Здобувачем проаналізовані нові технології зубообробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.*

46. Ключко А. А. Моделирование технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных зубчатых колес при помощи системной оптимизации /Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, А. Н. Кравцов // Прогрессивные технологии жизненного цикла авиационных двигателей и энергетических установок: Тезисы докладов. X Международная научно-техническая конференция. – АО «Мотор Сич». – Запорожье, 2013. –С. 64–67.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування процесу обробки зубчастих коліс, що загартовані, за допомогою системної оптимізації.*

47. Ключко А. А. Вибір і призначення системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості / Е. В. Мироненко, О. М. Шелковий, О. О. Ключко, О. М. Кравцов // Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів II-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції, 10-15 лютого 2014 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2014. – С. 40–41.

*Здобувачем виконані теоретичні обґрунтування по призначенню системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупно модульних зубчастих коліс.*

## АНОТАЦІЇ

**Ключко О.О. Технологічні основи забезпечення продуктивності, точності та якості зубофрезерування крупномодульних коліс, що загартовані.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2014.

У дисертаційній роботі на основі використання сучасних положень технологічної дії і узагальнення наукових досягнень в зубообробці крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, вимог до важконавантаженим і відповідальних зубчастих передач вперше сформульовані і реалізовані загальні принципи розробки технологічних основ забезпечення продуктивності, точності і якості зубообробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс, що дозволяють інтенсифікувати технологічний процес зубообробки із забезпеченням якості поверхневого шару зубчастих коліс, що характеризують їх експлуатаційні



властивості.

Вперше визначен і математично описаний взаємозв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, з їх показниками якості, що дозволило вирішити основну технологічну проблему зубообробки – забезпечення продуктивності, точності і якості зубообробки крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані. Встановлені і науково обгрунтовані комплексні параметри оцінки поверхневих умов крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, після лезвійної обробки.

Розроблений механізм технологічного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь зубів крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані, на основі математичного структурно-параметричного моделювання процесу їх обробки. Сформульовано наукове положення по технологічному оснащенню для інтенсивної і високоякісної зубообробки.

Розроблені практичні рекомендації по вживанню технології швидкісного зубофрезерування з призначенням і забезпеченням параметрів поверхневого шару крупномодульних зубчастих коліс, що загартовані.

*Ключові слова:* чистове зубофрезерування, крупномодульні зубчасті колеса, що загартовані, технологічна спадковість, поверхневий шар, режими різання, продуктивність, точність, якість, експлуатаційні властивості.

**Клочко А.А. Технологические основы обеспечения производительности, точности и качества зубофрезерования закаленных крупномодульных колес. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2014.

В диссертационной работе на основе использования современных положений технологического воздействия и обобщения научных достижений в зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес, требований к тяжело нагруженным и ответственным зубчатым передачам впервые сформулированы и реализованы общие принципы разработки технологических основ обеспечения производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес, позволяющие интенсифицировать технологический процесс зубообработки с обеспечением качества поверхностного слоя зубчатых колес, характеризующего их эксплуатационные свойства.

Впервые определена и математически описана взаимосвязь эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес с их показателями качества, что позволило решить основную технологическую проблему зубофрезерования – обеспечение производительности, точности и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес. Установлены и научно обоснованы комплексные параметры оценки состояния поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес после лезвийной обработки, комплексные параметры оценки долговечности закаленных крупномодульных зубчатых колес.

Разработан механизм технологического обеспечения эксплуатационных

свойств поверхностей зубьев закаленных крупномодульных колес на основе математического структурно-параметрического моделирования процесса их обработки. Математически описаны взаимосвязи качественных и количественных показателей поверхностного слоя зуба колеса и экспериментально подтверждены общие принципы управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки, разработана имитационная модель управления технологическим процессом финишной лезвийной обработки зубьев колес на основе ограничений по качеству и точности формируемых зубьев. Сформулировано научное положение по технологическому оснащению для интенсивной и высококачественной зубообработки.

Основным практическим результатом работы является разработка эффективных технологических процессов высокоскоростной зубообработки с обеспечением качества поверхностного слоя и эксплуатационных характеристик колес, предложена универсальная методика расчета параметров состояния поверхностного слоя в зависимости от условий их обработки.

Разработаны методики: моделирования взаимосвязи эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес с их показателями качества при помощи теории графов, выбора и назначения технологического обеспечения системы параметров поверхностного слоя, оценки влияния вибраций на процесс формирования поверхностного слоя при зубонарезании, критериального метода оценки влияния теплового баланса на производительность, точность и качество при обработке закаленных крупномодульных зубчатых колес.

Разработана специальная оснастка для обеспечения технологического оснащения при интенсивной и высококачественной зубообработке закаленных крупномодульных зубчатых колес.

Впервые разработана применительно для закаленных крупномодульных зубчатых колес система комплексных параметров: состояния поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес, по обеспечению долговечности колес, по обеспечению минимальных пластических деформаций зубьев, многокритериальной оптимизации двухступенчатого технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес.

Разработаны практические рекомендации по применению технологии скоростного зубофрезерования с назначением и обеспечением параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес.

*Ключевые слова:* чистовое зубофрезерование, закаленные крупномодульные зубчатые колеса, технологическая наследственность, поверхностный слой, режимы резания, производительность, точность, качество, эксплуатационные свойства.

**Klochko A.A. Technological basis of performance, precision and quality gear milling hardened coarse-grained wheel.** – The rights of the manuscript.

Dissertation on the competition of scientific degree of doctor of engineering sciences on speciality 05.02.08 is technology of engineer. - It is the National technical university the «Kharkov polytechnic institute», Kharkov, 2014.

In dissertation work on the basis of the use of modern positions of technological

influence and generalization of scientific achievements in treatment of hard-tempered large module gear-wheels, requirements to tyazhelonagruzhennym and responsible gearings first formulated and realized general principles of development of technological bases of providing of the productivity, exactness and quality of treatment hard-tempered large module gear-wheels, allowing to intensify a technological process treatments with providing of quality of superficial layer of gear-wheels, characterizing their operating properties.

First certain and intercommunication of operating properties of surfaces of hard-tempered large module gear-wheels is mathematically described with their indexes of quality, that allowed to decide the basic technological problem of treatment of points – providing of the productivity, exactness and quality of treatment of gear-wheels.

Set and the complex parameters of estimation of the state of surfaces of hard-tempered large module gear-wheels are scientifically grounded after rapid treatment, complex parameters of estimation of longevity of gear-wheels. Scientific position is formulated on a technological equipment for intensive and high-quality treatment of gear-wheels.

Practical recommendations are developed on application of technology of speed zubofrezerovaniya with setting and providing of parameters of superficial layer of cylindrical hard-tempered large module gear-wheels.

*Keywords:* finish hobbing, clean gear milling, hard-tempered large module gear-wheels, surface layer cutting modes, performance, productivity, exactness, quality, operating properties.

