

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

Гасанов Магомедмін Ісамагомедовіч



УДК 621.9

**ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЯКОСТІ
КРУПНОГАБАРИТНИХ ЗУБЧАТИХ ПЕРЕДАЧ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
МЕТОДІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Краматорськ – 2019

Дисертацією є рукопис.

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

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

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Луців Ігор Володимирович,
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя,
завідуючий кафедрою конструювання верстатів,
інструментів та машин;

доктор технічних наук, професор
Кальченко Володимир Віталійович,
Чернігівський національний технологічний
університет, проректор з науково-педагогічної
роботи;

доктор технічних наук, доцент
Васильченко Яна Василівна,
Донбаська державна машинобудівна академія,
завідуюча кафедрою комп'ютеризовані мехатронні
системи, інструменти та технології.

Захист відбудеться «27» червня 2019 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02 у Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Академічна (Шкадінова), 72, корп. 3, ауд. 3308.

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

Автореферат розісланий «27» травня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 12.105.02,
кандидат технічних наук, доцент



С.Л. Міранцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підвищення технічного рівня робочих машин, його збереження протягом певного періоду експлуатації, а також відновлення на етапі ремонту і модернізації є актуальними завданнями сучасного машинобудування.

Так, ефективність виробництва в гірничодобувній і переробній галузях пов'язана з рівнем розвитку машин транспортних і енергетичних систем, приводи яких включають в себе унікальні крупногабаритні зубчасті передачі (КЗП) діаметром до 8,5 метрів і модулем до 65 мм. Гірські і транспортні машини працюють при високих навантаженнях в екстремальних умовах навколишнього середовища, абразивний знос і вібраційний характер навантаження яких призводить до прискореної втрати функціональних параметрів зубчастих передач, скорочуючи терміни експлуатації приводів. Проблема забезпечення життєвого циклу подібних машин полягає у визначенні доцільності виготовлення нових деталей приводу або відновлення зношених. Практичний досвід показує, що для крупногабаритних зубчастих передач ремонт і відновлення є економічно найкращим.

Сучасний процес ремонту крупногабаритних зубчастих коліс (КЗК) вимагає розробки нових підходів до стратегії відновлення функціональних параметрів, методів формоутворення, забезпечення надійності процесів механічної обробки, верстатів та інструментів.

Для вирішення проблеми забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих коліс з урахуванням їх несучої здатності і контактної взаємодії, які залежать від стану поверхневого шару в цілому (макровідхилення, хвилястості, шорсткості, фізико-хімічних властивостей), а не тільки від параметрів шорсткості, необхідний комплексний підхід до вивчення зміни форми зубів, зносу і подальшого відновлення КЗК.

Забезпечення якості відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс може бути успішно реалізовано тільки при правильному виборі стратегії ремонту, заснованому на метрологічній системі контролю параметрів стану поверхневого шару зубчастих коліс, що характеризують їх експлуатаційні властивості. З цієї точки зору, вивчення закономірностей процесів відновлення функціональних параметрів крупномодульних зубчастих коліс як основи комплексного варіаційного вибору стратегії ремонту є актуальною науково-технічною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі технологій машинобудування та металорізальних верстатів наступних науково-дослідницьких та науково-технічних робіт за тематичним планом НДР МОН України: «Забезпечення міцності елементів машин військового та цивільного призначення на основі дослідження нелінійних моделей контактної взаємодії» (ДР № 0119U02569); «Меркурій» (ДР № 0117U00015). Договорів про співробітництво між НТУ «ХП» та ДП «Завод ім. В. О. Малишева» (м. Харків); ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О. О. Морозова»; ДП

«Харківське конструкторське бюро з двигунобудування», де здобувач був виконавцем окремих розділів. По Договору ХТ22908 (2019-2020pp.) «Дослідження фінішних методів обробки складнопрофільних деталей після їх отримання та відновлення» є керівником теми.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності ремонту крупногабаритних зубчастих передач шляхом вибору раціональної стратегії відновлення їх функціональних параметрів на основі системного аналізу дефектів і методів їх усунення імітаційним моделюванням взаємозв'язків геометричних, кінематичних і динамічних параметрів зачеплення зубів важконавантажених зубчастих коліс.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі.

1. Виконати функціонально-вартісний аналіз процесу експлуатації КЗП і пов'язаними з ними проблем відновлення функціональних властивостей за даними літературних джерел з проблеми ремонту КЗП, сформулювати критерії формування структури і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зношених КЗП, і оцінити ефективність існуючих методів відновлення.

2. На основі аналізу методів відновлення функціональних властивостей КЗП, організаційних і технічних обмежень, що накладаються на область формування математичної моделі регламенту відновлення функціональних характеристик КЗП, здійснити формалізацію процесу опису системи відновлення поверхонь зубів шляхом формулювання критеріїв та областей існування математичних моделей.

3. Розробити узагальнену математичну модель процесу відновлення функціональних властивостей КЗП у вигляді інформаційних, організаційних та функціональних моделей системи обробки.

4. Сформулювати методологію дефектації та відновлення заданих властивостей КЗП, а також реалізувати її у вигляді набору методик використовуваних в умовах промислового виробництва.

5. Здійснити експериментальну перевірку математичних моделей і методик проектування при відновленні КЗК.

6. Розробити технологічне і інструментальне оснащення процесів високоефективної обробки загартованих КЗК.

Об'єкт дослідження – процеси відновлення крупномодульних зубчастих коліс.

Предмет дослідження – закономірності процесів відновлення функціональних властивостей КЗК як основа комплексного варіаційного вибору стратегії ремонту методами імітаційного моделювання.

Методи дослідження. В основу роботи покладено єдиний підхід щодо проведення теоретичних і експериментальних досліджень, що базується на фундаментальних положеннях теорій процесів машинобудування, триботехніки, теорії різання матеріалів, теорії ймовірності та математичної статистики. Експериментальні дослідження проводилися в виробничих і лабораторних умовах на реальному технологічному обладнанні. Математична обробка результатів досліджень виконувалася з використанням прикладного

програмного забезпечення (пакет MathCAD). Достовірність теоретичних положень роботи підтверджується результатами експериментальних досліджень і промисловим впровадженням результатів досліджень процесів формоутворення при обробці зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс.

Дані теоретичних досліджень перевірялися експериментально, при цьому результати експериментів піддавалися статистичному аналізу з визначенням (90–95) % довірчих інтервалів.

Кожен експеримент проводили за заздалегідь складеним планом, який включав: мета і завдання експерименту; вибір змінних параметрів; обґрунтування числа проведених дослідів; визначення послідовності зміни чинників; вибір кроку зміни чинників; обґрунтування вибору засобів вимірювань; опис проведення експериментів; обґрунтування способів обробки і аналізу результатів експерименту. При виконанні роботи використовували сучасні методи імітаційного моделювання. Дослідження обробленої поверхні проводили з використанням оптичної та електронної мікроскопії. Глибину дефектного шару визначали по косому зрізу з використанням оптичної мікроскопії. Всі вимірювання проводилися на повірених приладах.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі системного аналізу і узагальнення досвіду відновлення КЗК, вимог до важконавантажених і відповідальних зубчастих передач вперше сформульовані і реалізовані принципи відновлення функціональних властивостей КЗК на основі імітаційного моделювання високоякісної обробки, що дозволяють інтенсифікувати процес відновлення зуба в умовах обмежень на якість його поверхневого шару. Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному.

1. Вперше встановлено і науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки стану поверхонь, довговічності, мінімально можливих пластичних деформацій зубів зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс після лезової обробки, що дозволило забезпечити їх якісне відновлення та експлуатаційні властивості.

2. Удосконалено теорію імітаційного моделювання взаємозв'язків якості зубчастого зачеплення крупногабаритних модульних коліс в процесі експлуатації при зношуванні і процесів їх обробки при відновленні, що дозволило оптимізувати параметри різання та якісні властивості відновленого поверхневого шару евольвентного профілю зубчастих коліс.

3. Отримав подальшого розвитку вплив удільного зносу зубів в контактній зоні на потужність, затрачену на подолання сил тертя з урахуванням забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубів відновлюваних коліс, що забезпечило збільшення високопродуктивної обробки.

4. Вперше визначено сумарний знос поверхні в контактній зоні зуба в залежності від умов тертя, фази зачеплення і часу контакту, що дозволило збільшити стійкість високопродуктивного швидкісного інструменту.

5. Отримала подальшого розвитку математична структурно-параметрична модель процесу обробки крупногабаритних зубчастих коліс, яка забезпечує

задані експлуатаційні властивості поверхонь відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс, що враховує дійсну форму профілю зуба після зносу.

6. Отримала подальшого розвитку імітаційна модель управління процесом фінішної лезової обробки зубів відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс, що дозволило забезпечити експлуатаційні властивості в умовах обмежень по якості і точності формованих поверхонь зубів.

7. Вперше визначено та математично описано взаємозв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс на основі оцінки показників якості поверхонь, що дозволило вирішити основну проблему зубообробки – забезпечення продуктивності, точності та якості відновлення крупногабаритних зубчастих коліс.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудування та гірничої промисловості:

- сформульовано принципи дефектації КЗК і на їх основі розроблено методику систематизації дефектів і методів їх усунення;

- розроблено методологію відновлення КЗК на основі імітаційного моделювання виробничих процесів;

- розроблено ефективні процеси високошвидкісний лезової зубообробки на основі швидкісного зубофрезерування спареними фрезами і фрезами типу «Перемога», що забезпечують якість поверхневого шару в межах $R_z = 10\text{--}20$ мкм, швидкістю різання $V = 3\text{--}5$ м/с зубчастих коліс з модулем зачеплення 12–65 мм;

- запропоновано методику розрахунку параметрів стану поверхневого шару відновлюваних поверхонь зубів крупногабаритних коліс в залежності від умов їх обробки;

- розроблено методики: моделювання взаємозв'язку експлуатаційних властивостей поверхонь зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс з їх показниками якості; вибір і призначення забезпечення системи параметрів поверхневого шару зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс;

- розроблено методику імітаційного моделювання процесу фінішної лезової обробки зубів відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс на основі обмежень по якості і точності формованих зубів;

- розроблено спеціальне оснащення і ріжучий інструмент для високошвидкісної зубообробки крупногабаритних зубчастих коліс з модулем зачеплення 12–65 мм;

- сформульована система комплексних параметрів стану поверхонь зубів, що дозволяє оцінити довговічність зубчастих передач за критерієм мінімальних пластичних деформацій зубів.

Результати роботи впроваджені:

- ДП «Завод ім. В. О. Малишева» (м. Харків), ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О. О. Морозова» з економічним ефектом 775 тис. 000 грн;

– ТОВ «Костянтинівський завод механічної обробки» (м. Костянтинівка), при відновленні крупногабаритних зубчастих коліс з сумарним річним економічним ефектом 787 тис. 375 грн;

– ТОВ «Слобожанська промислова компанія» (м. Харків), при відновленні зубчастих коліс важких тракторів з річним економічним ефектом складає 495 тис. 240 грн;

– у навчальному процесі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем самостійно. Постановка задач досліджень, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим консультантом.

Розробка стендів, експериментальних установок, їх налагодження, вимірювання контрольованих параметрів проводились спільно з працівниками кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» і кафедри «Інтегровані процеси машинобудування ім. М.Ф. Семко» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків).

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на Міжнародних науково-технічних, науково-практичних конференціях і семінарах: «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2016–2018 рр.); «Прогресивні технології в машинобудуванні» (м. Львів, 2016 р.); «Фізичні і комп'ютерні процеси» (м. Харків, 2016 р.); «Обладнання і технології сучасного машинобудування» (м. Тернопіль, 2017 р.); «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 2017 р.); «Розвиток прикладної науки, освіти та студентського самоврядування на Буковині» (м. Чернівці, 2017 р.); «Інформатика, управління та штучний інтелект» (м. Харків, 2017 р.); «Сучасні технології промислового комплексу»: (м. Херсон, 2017 р.); «Високі технології: тенденції розвитку» (Харків – НТУ «ХПІ» – ОНПУ – Одеса, 2018 р.); «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта» (м. Київ, 2018 р.); «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2018 р.); «Сучасні технології промислового комплексу» (м. Херсон, 2018 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 51 науковій публікації, з них: 23 статті у наукових фахових виданнях України (19 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 2 статті у закордонних періодичних фахових виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus, 4 патентів України (3 – на винахід, 1 – на корисну модель); 1 – навчальний посібник; 21 – у матеріалах конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 475 сторінках друкованого тексту, складається зі анотації двома мовами, вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 298 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 34 таблицями та 106 рисунками. Список використаних джерел містить 284 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У першому розділі здійснено аналіз важко навантажених зубчастих передач, до яких відносяться приводи машин, при проектуванні яких висуваються жорсткі вимоги до мінімізації їх габаритів, маси і вартості. У важкому машинобудуванні при відновленні і ремонті відповідальних точних вузлів техніки, найбільший обсяг займають редуктори і приводи з прямозубими і косозубими циліндричними зубчастими колесами, які розрізняються компонованнями і розмірами. До таких, в першу чергу, відносяться транспортні машини і гірські машини, що працюють в обмеженому просторі. Реалізація цих жорстких вимог призводить до значного зростання удільної сили навантаженості, а вимога максимізації продуктивності машин призводить до зростання швидкісних характеристик приводу.

Рішення такого завдання в значній мірі визначається рівнем оснащення при інтенсивній і високоякісній обробці відповідальних крупногабаритних зубчастих коліс і зубчастих вінців діаметром до 8500 мм, модулем від 12 мм до 65 мм, рудорозмельних млинів типу ММС 70 23 (рис. 1), роторних дробарок СМД 75а, поворотних платформ екскаваторів, крокуючих екскаваторів,



Рисунок 1 – Рудорозмельний млин типу ММС 70

підйомних шахтних машин (рис. 2), прокатних станів, сталеливарних розливних машин, важконавантажених редукторів.

У важконавантажених машинах в якості приводів використовуються передаточні механізми, що містять зубчасті передачі, ступінь досконалості яких значною мірою визначає вартість і експлуатаційні характеристики промислового обладнання.



Рисунок 2 – Приклади шахтних підйомних машин типу МПБ виробництва ЧАО «НКМЗ, важкі редуктора та екскаватори

Аналіз літературних даних, а також практичної експлуатації відповідальних вузлів машин показують, що найбільш часто і найбільш трудомісткими є поломки і знос зубчастих коліс класифікація яких представлена в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні види зносу крупногабаритних зубчастих коліс

№ п/п	Види зносу	Причина зносу	Частка в зносі для зубчастих передач (%)	
			Закритих	Відкритих
1.	Абразивний знос	Зносостійкість	20	55
2.	Пластичний знос	Тертя	25	25
3.	Заїдання	Адгезія	15	5
4.	Контактна жорсткість	Високе удільне навантаження	30	10
5.	Поломка зубів	Тріщини, відколи	9	2
6.	Корозійний знос	Зовнішнє середовище	1	3

При роботі зубчастої передачі між зубами спряжених зубчастих коліс виникає сила тиску F_n , яка спрямована по лінії зачеплення. Від ковзання зубів між ними утворюється сила тертя і відповідно знос поверхонь, які контактують (рис. 3).

$$F_{тер} = F_n \cdot f, \quad (1)$$

де f – коефіцієнт тертя.

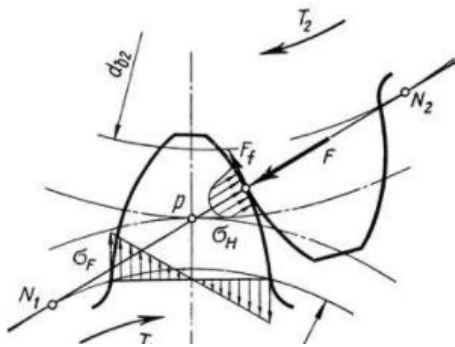


Рисунок 3 – Схема розподілу сил в момент зачеплення

Час дії σ_F і σ_H визначається тривалістю зачеплення при повороті колеса на один окружний крок t_0 з урахуванням накопиченої похибки кроку, радіального биття зубчастого вінця, похибки коливання довжини загальної нормалі. Напруги вигину викликають несправність зубів, а контактні напруги втомне викришування поверхневих шарів зубів. З контактними напруженнями і тертям в зачепленні пов'язані також знос, заїдання та інші види пошкодження поверхонь зубів.

Основні види зносу показані на рис. 4.

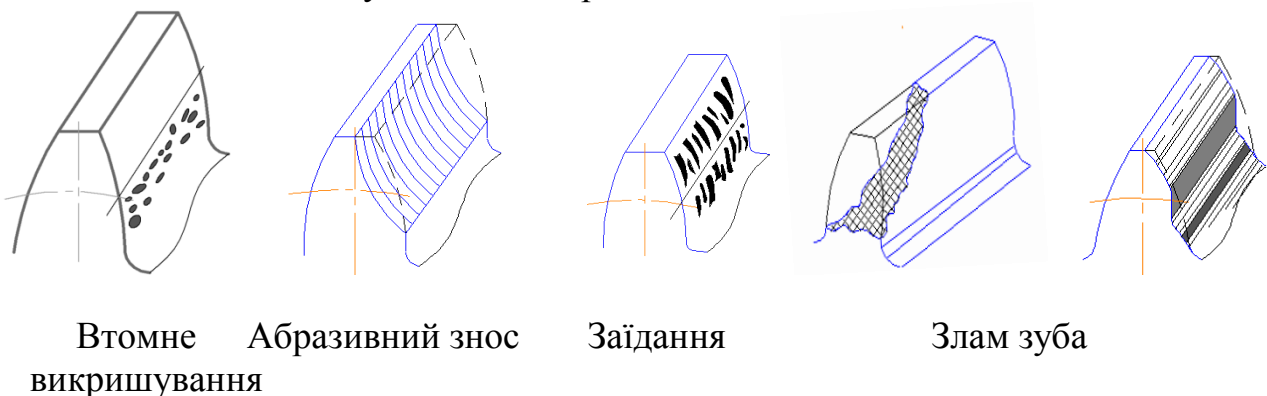


Рисунок 4 – Основні види зносу

Оцінка довговічності крупногабаритних зубчастих передач по початковим параметрам евольвентних профілів зубів без урахування забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчастих коліс і відновлених крупногабаритних зубчастих вінців є вельми наближеною, не відображає того факту, що через знос зубів форма профілю стає відмінною від початкової евольвентної поверхні.

Розробкою і дослідженням процесів відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач займалися вітчизняні та зарубіжні вчені: Вулгаков Е.Б., Гавриленко В.А., Генкін М.Д., Грабченко А.І., Гришко В.А., Данильченко Ю.М., Демкин Н.Б., Заблонський К.І., Кані М.М., Клименко Г.П., Ковальов В.Д., Крагельський І.В., Кривошея О.В., Клочко А.А., Мельник В.Є., Мікіщенко А.А., Мироненко Е.В., Онищенко В.П., Охрименко А.А., Пермяков А.А., Печена В.І., Равська Н.С., Родін П.Р., Розенберг О.А., Рибак В.Я., Рижов Е.В., Суслов А.Г., Сторчак М.В., Федоров В.П., Шаповалов В.Ф. та ін.

Критеріями формування структур поверхневого шару зубчастих коліс є коефіцієнт тертя, який визначає здатність поверхневих шарів циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс до взаємного опору при дії контактних навантажень.

Глибина взаємного упровадження мікронерівностей в період прироблення та періоді нормального зносу визначається пружними контактними деформаціями:

в період прироблення

$$f = \frac{\tau_0}{c \cdot k_1' \cdot \sigma_T} + \beta + \frac{4 \cdot a_r \cdot R_a^{\frac{2}{3}}}{S_m \cdot t_m} \times \sqrt[3]{\frac{60 \cdot \pi}{t_m} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot W_z \cdot H_{\max}}{k_1' \cdot \sigma_T} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot k_1' \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{R_a \cdot E} \right)} + \beta + \frac{48 \cdot \pi \cdot (k_1' \cdot \sigma_T)^{\frac{1}{3}}}{t_m}; \quad (2)$$

при нормальному зношенні

$$f = \frac{\tau_0}{c \cdot k_1' \cdot \sigma_T} \times \sqrt[3]{\frac{30 \cdot (1 - \mu^2) \cdot (2 \cdot \pi \cdot p \cdot R_a \cdot W_z \cdot H_{\max})^{\frac{1}{3}}}{E \cdot S_m \cdot t_m}} \quad (3)$$

Результати експериментального визначення зон тертя, що відповідають різним характеристам процесу тертя, при терті ковзання по шорсткій поверхні представлені на рис. 5. Аналіз результатів цих досліджень показує, що шорсткість поверхні тертя значно впливає на перерозподіл зон тертя.

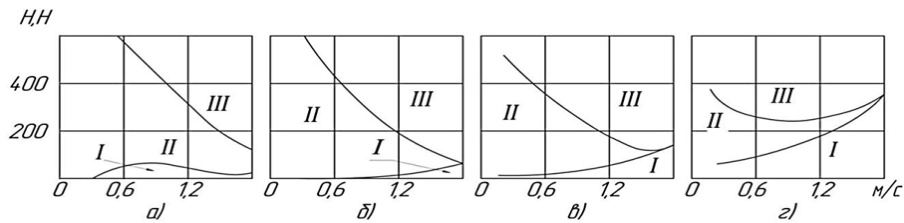


Рисунок 5 – Границі зон тертя:

(а) – $R_a = 0,80$ мкм; (б) – $R_a = 0,16$ мкм; (в) – $R_a = 0,05$ мкм; (г) – $R_a = 0,02$ мкм;
 I – зона рідинного тертя; II – зона граничного тертя; III – зона схоплювання

Процес тертя в значній мірі визначає зносостійкість контактуючих циліндричних зубчастих коліс. Згідно з теорією І.В. Крагельського, інтенсивність зношування деталей розраховується за формулою:

$$I_n = \frac{2,5 \cdot v^{0,5} \cdot R_a^{\frac{2}{3}} \cdot P^{\frac{7}{8}}}{n \cdot \lambda \cdot (v+1) \cdot S_m \cdot t_m^{\frac{3}{2}} \cdot k'_1 \cdot \sigma_T} \times \sqrt{15\pi \cdot (2\pi \cdot W_z \cdot H_{\max})^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + \frac{2\pi \cdot k'_1 \cdot \sigma_T \cdot (1-\mu^2)}{E} \right]}. \quad (4)$$

Отримана формула показує, що зносостійкість контактуючих циліндричних крупномодульних зубчастих коліс характеризується комплексним станом поверхонь тертя.

Аналіз результатів експериментальних досліджень опору втоми циліндричних зубчастих коліс (рис. 6) показує, що границя витривалості циліндричних зубчастих коліс при зменшенні їх шорсткості з $R_a = 0,74$ мкм до

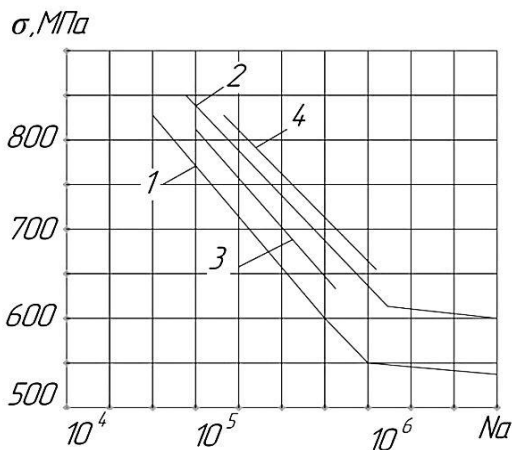


Рисунок 6 – Опір втоми поверхонь контактуючих зношених циліндричних крупномодульних зубчастих коліс від циклічності навантаження:

1 – $R_a = 0,74$ мкм; 2 – $R_a = 0,50$ мкм;
 3 – $R_a = 0,38$ мкм; 4 – $R_a = 0,22$ мкм

$R_a = 0,22$ мкм в середньому збільшується на 14 %, а термін служби – більш ніж в 3 рази. Збільшення глибини рисок на евольвентній поверхні циліндричних зубчастих коліс з $R_{\max} = 1,4$ мкм до $R_{\max} = 3,4$ мкм зменшує границю витривалості циліндричних зубчастих коліс на 4 %.

Таким чином, результати проведених досліджень показують, що опір втоми контактуючих деталей машин залежить від величини і знака поверхневих залишкових напруг або ступеня наклепу, глибини їх залягання і закону розподілу, максимальної висоти нерівностей шорсткості і глибини їх згладжування, середнього кроку нерівностей профілю шорсткості і відносної довжини опорної лінії на рівні середньої.

У другому розділі розроблена формалізація опису процесу відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач. Характерною особливістю такого зачеплення є те, що загальна нормаль до профілів, будучи дотичною до основних окружностей з нерухомими центрами, перетинає лінію центрів в одній і тій же точці (полюсі зачеплення) в будь-який момент часу (рис. 7).

Вибір методу відновлення функціональних характеристик крупномодульних зубчастих коліс при регламентації комплексного параметра рівноважного стану евольвентних поверхонь зубчастих коліс C_x здійснюється за допомогою математичного апарату відповідностей

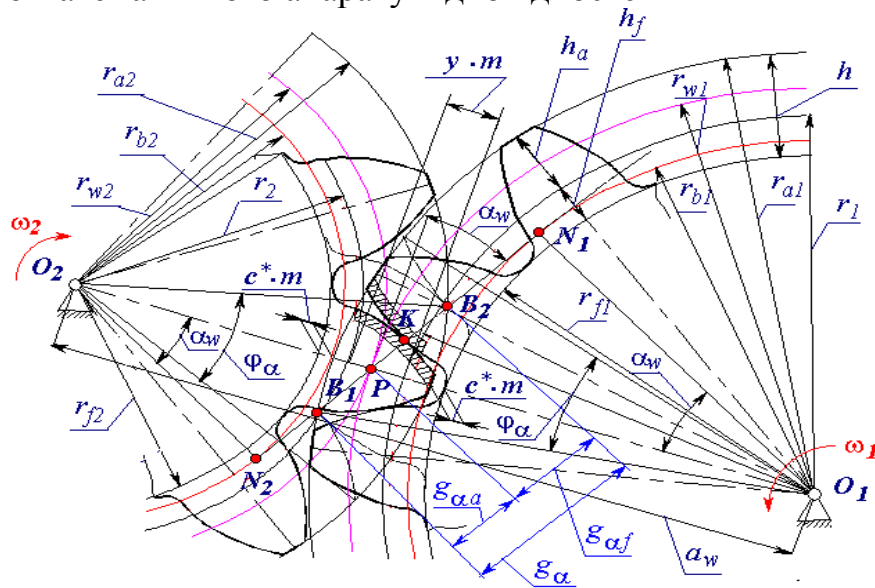


Рисунок 7 – Схема зачеплення циліндричних зубчастих коліс

Діапазон параметрів C_x (комплексного параметра рівноважного стану поверхонь тертя) для різних методів зубообробки наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Діапазон комплексного параметра стану поверхонь C_x для різних методів чистової зубообробки зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс

№ області прибуття Y	Вид механічної обробки відновлених після зносу крупногабаритних зубчастих коліс	Діапазон комплексного параметра C_x	Позначення множини C_i
1	Чистове зубофрезерування твердосплавними черв'ячними фрезами	1,25–2,80	C_1
2	Схема різання спареними фрезами	0,95–2,25	C_2
3	Схема швидкісного зубофрезерування, де в якості верстатної лінії зачеплення пар інструмент – деталь використовується нормаль до евольвент, яка розташована горизонтально	0,65–1,45	C_3
4	Схема різання передбачає одночасну зубообробку обох бічних поверхонь зубів колеса з використанням двох дискових фрез, розташованих з нахилом на кут в 20°	0,45–1,25	C_4

Відповідність у вигляді графіка (графа) задана на рис. 8. Множина можливих значень області відправлення задана відрізками (діапазонами) параметра C_x . Множинами області відправлення є множини I–VII. Множина параметрів відрізка (діапазону) C_x визначається за допомогою операцій над множинами – їх перетину (\cap) або віднімання (різниці) (\setminus).

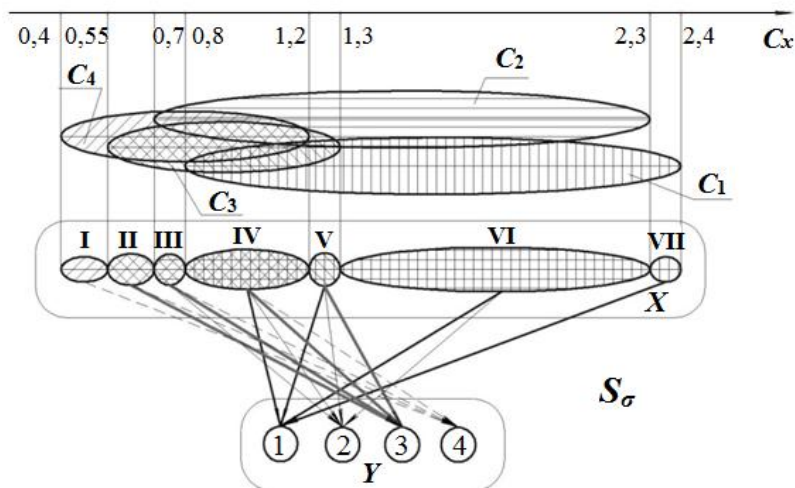


Рисунок 8 – Графік відповідностей S_σ у вигляді графа: $X = \{I; II; III; IV; V; VI; VII\}$ – область відправлення; $Y = \{1; 2; 3; 4\}$ – область прибуття; $I = C_4 \setminus C_3$; $II = C_3 \cap C_4$; $III = C_2 \cap C_3 \cap C_4$; $IV = C_1 \cap C_2 \cap C_3 \cap C_4$; $V = C_1 \cap C_2 \cap C_3$; $VI = C_2 \cap C_1$; $VII = C_1 \setminus C_2$

У табл. 3 заносяться всі можливі пари елементів області прибуття та відправлення, а викреслюються не реальні пари (не пов'язані області відправлення і прибуття).

Таблиця 3 – Відповідність, задана табличним способом

Область прибуття Y	Область відправлення X						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
1	$\langle I;1 \rangle$	$\langle II;1 \rangle$	$\langle III;1 \rangle$	$\langle IV;1 \rangle$	$\langle V;1 \rangle$	$\langle VI;1 \rangle$	$\langle VII;1 \rangle$
2	$\langle I;2 \rangle$	$\langle II;2 \rangle$	$\langle III;2 \rangle$	$\langle IV;2 \rangle$	$\langle V;2 \rangle$	$\langle VI;2 \rangle$	$\langle VII;2 \rangle$
3	$\langle I;3 \rangle$	$\langle II;3 \rangle$	$\langle III;3 \rangle$	$\langle IV;3 \rangle$	$\langle V;3 \rangle$	$\langle VI;3 \rangle$	$\langle VII;3 \rangle$
4	$\langle I;4 \rangle$	$\langle II;4 \rangle$	$\langle III;4 \rangle$	$\langle IV;4 \rangle$	$\langle V;4 \rangle$	$\langle VI;4 \rangle$	$\langle VII;4 \rangle$

Найбільш оптимальною виявилася ортогональна система координат, віссю абсцис якої є вісь симетрії зуба, а вісь ординат проходить через початкову точку O_{ev} евольвенти вихідного, незношеного профілю – XOY (рис. 9).

Така система координат забезпечує можливість порівняння характеристик зачеплення квазіспряжених профілів з їх значеннями для евольвентних профілів, в зв'язку з чим на профілі зазначаються відповідні точки, характерні для евольвентного профілю.

Структурна схема параметрів формоутворення зношеної евольвентної поверхні зубчастого колеса (рис. 10) відповідає графіку відповідностей S_σ у вигляді графа (рис. 8).

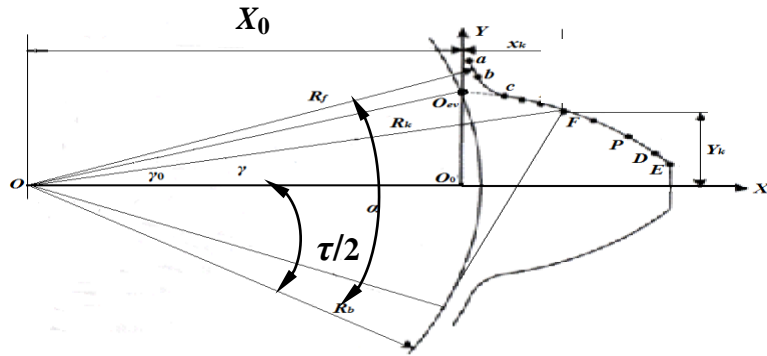


Рисунок 9 – Система координат профілю і розташування характерних точок: ab – дуга окружності впадин; bc – перехідна крива; cE – евольвента; E – вершина зуба; P – полюс зачеплення; HF, DE – зони двохпарного зачеплення зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс



Рисунок 10 – Зношена евольвентна поверхня зубчастого колеса

При швидкісному зубофрезеруванні дисперсія початкового стану поверхневого шару призводить до динамічного зміни радіальної сили, а отже, і до вимушених коливань фрези щодо оброблюваної поверхні заготовки. Коливання фрези можуть бути представлені у вигляді системи з трьома ступенями свободи (поступальний рух уздовж осей x, y і z).

Рівняння для розрахунку інтенсивності зносу і коефіцієнта тертя в період прироблення:

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

$$f_h = \frac{\tau_0}{c K' \sigma_T} + \beta + \frac{4\alpha_f R_a^{\frac{2}{3}}}{S_m t_m} \sqrt{\frac{60\pi}{t_m} \left(\frac{2\pi P W_z H_{\max}}{K' \sigma_T}\right)^{\frac{1}{3}} \left(1 + \frac{2\pi K' \sigma_T (1-\mu^2)}{R_a E}\right)}. \quad (6)$$

Рівняння для розрахунку інтенсивності зносу і коефіцієнта тертя в період нормального зносу:

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

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

де ν – параметр опорної кривої профілю; n – число циклів впливу; λ – коефіцієнт, що враховує вплив поверхневих залишкових напружень на число циклів навантаження; σ_T – межа плинності матеріалу; τ_0 – питома зсувна міцність молекулярних зв'язків; α_{Γ} – коефіцієнт гістерезисних втрат при ковзанні; β – коефіцієнт зміцнення молекулярних зв'язків під дією стискаючих напруг; E – модуль пружності матеріалу.

Різноманіття механічних методів зубообробки зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс, надає можливість розробити наукові напрямки по підвищенню продуктивності, точності і якості зубообробки відновлених крупногабаритних зубчастих коліс із забезпеченням необхідних параметрів поверхневого шару оброблюваних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості.

Отже, досягнення рівноважного стану поверхневого шару зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс, що знаходяться в зачепленні, можливо при реалізації пружного контакту взаємодіючих тіл.

Рівноважний стан поверхонь тертя зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з урахуванням необхідної зносостійкості характеризується параметром

$$C_x = \frac{H_p \cdot W_p \cdot (0,75 \cdot R_z)^4}{S_m^6 \cdot k^{-12}}, \quad (9)$$

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

Значення комплексного параметра, що забезпечує необхідну зносостійкість зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

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

де σ_{τ} – напруга плинності; E – модуль пружності, %; μ – коефіцієнт Пуассона; n – число циклів впливу, яке призводить до руйнування поверхні зубчастих коліс; I – інтенсивність зносу зубчастих коліс в період нормального зносу; χ – коефіцієнт, що враховує параметри опорної кривої; p – питома навантаження, що припадає на геометричну площу контакту.

Одним з напрямків оснащення процесу обробки зубчастих зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс є розробка і створення нових процесів відновлення формоутворення і інструментального оснащення.

У **третьому розділі** розроблен математична модель прогнозування структури і параметрів систем зубообробки крупномодульних зубчастих коліс після відновлення.

Для управління параметрами зубообробки зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з урахуванням режимів різання, розрахункових параметрів ріжучого леза, радіуса округлення різальної крайки, розрахункових параметрів коефіцієнта усадки стружки основними показниками оцінки режимів різання є забезпечення точності обробки та якості поверхневого шару, як критерій оцінки процесу використовують коефіцієнт функціонального формування поверхневого шару – K_ρ (рис.11).

Період стійкості (T) інструменту визначається глибиною різання t , подачею S_0 , швидкістю V і радіусом округлення різальної крайки зубів фрези ρ , тобто параметрами режиму різання і умовами формування з урахуванням параметра функціонального формування поверхневого шару при зубофрезеруванні $K_\rho = f\left(\frac{a}{\rho}, R_z, t_m(k), H, \mu_0, \sigma_0, h, H, \mu\right)$ і оброблюваності матеріалу C_v .

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють визначити оптимальні кути ковзання $\Psi_{ков}$, при яких забезпечуються стабільність процесу зубофрезерування, необхідні умови по стійкості інструмента і якість оброблюваної поверхні по відношенню до найбільшого куту контакту зуба фрези Ψ_{max} з оброблюваним зубчастими виробом при найвищій продуктивності.

Співвідношення між кутом ковзання $\Psi_{ков}$ і найбільшим кутом контакту зуба фрези Ψ_{max} з оброблюваною поверхнею дозволяє встановити ефективність процесу зубообробки через коефіцієнт функціонального формування поверхневого шару K_ρ .

$$K_\rho = \frac{\sin \psi_{max} - \sin \psi_{ков}}{\sin \psi_{max}} \cdot 100\% \quad (11)$$

Підставляючи в (11) параметри обробки, отримуємо зручний для теоретичних і експериментальних досліджень вираз коефіцієнта ефективності функціонального формування поверхневого шару K_ρ .

$$K_\rho = \left[1 - \frac{\arcsin \left(K_{MOP} \cdot \frac{\rho_i \cdot z \cdot 10^3 \cdot V}{S_m \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \varphi} \right)}{\arcsin \frac{2 \cdot \sqrt{H \cdot (D - H)}}{D}} \right] \cdot 100\% , \quad (12)$$

де $K_{MOP} = 0,5$ при обробці без MOP, $K_{MOP} = 0,31$ при обробці з MOP.

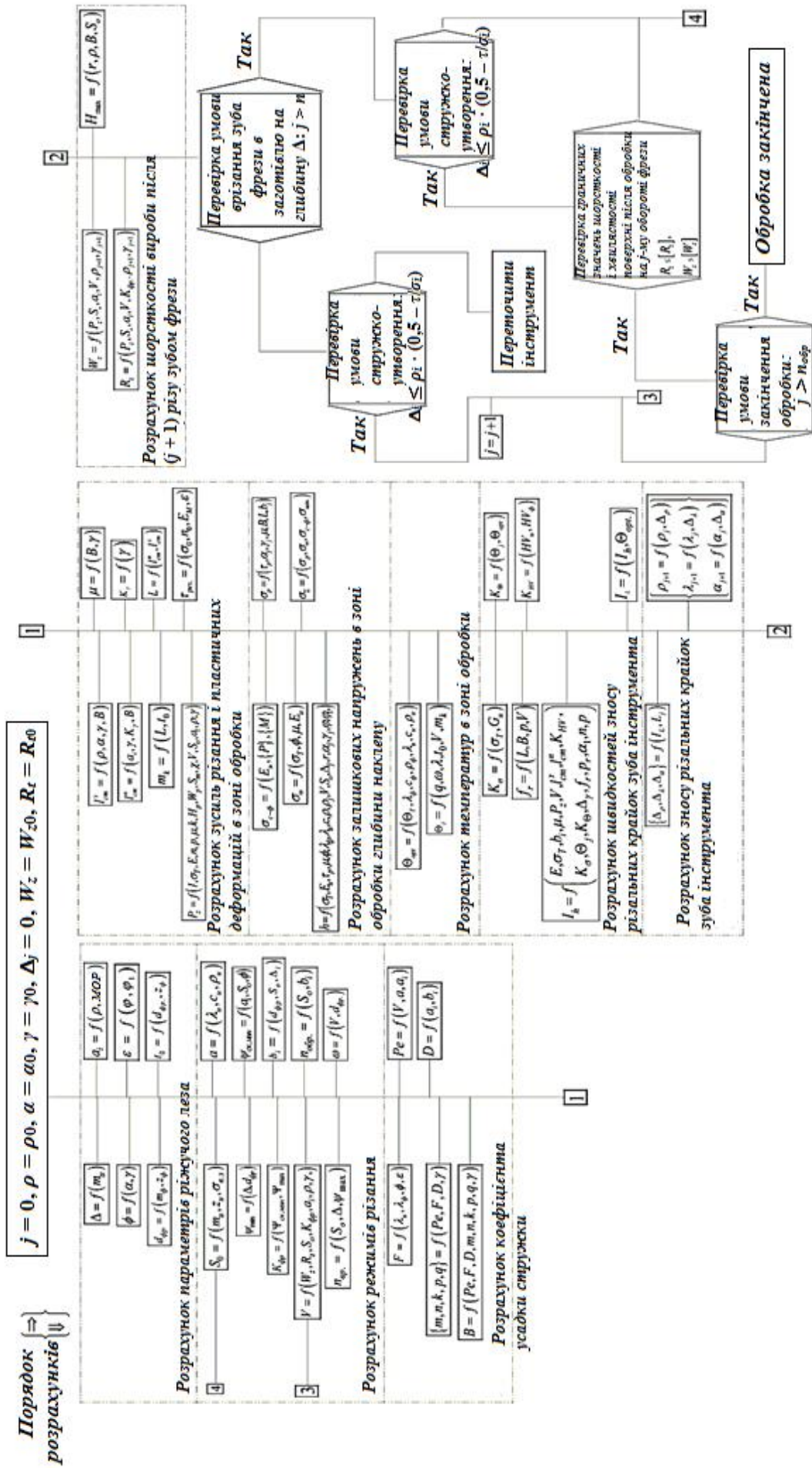


Рисунок 11 – Блок-схема управління процесом формування після наплавки зубів

Для прогнозування показників якості поверхневого шару розроблена математична модель з урахуванням геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей, за умови переходу пластичного відтискування матеріалу з оброблюваної поверхні відновлених крупногабаритних зубчастих коліс у взаємозв'язок з комплексним параметром стану поверхневого шару, вираженим через параметр шорсткості R_z .

$$R_z = 5 \cdot R_a = \frac{P_z \cdot S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \gamma^{0,41} \cdot K_\rho^{0,24}} = \dots$$

$$10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot S_m^{\frac{3}{2}} \cdot k^{-3}$$

$$\dots = \frac{\dots}{H_p^{\frac{1}{4}} \cdot W_p^{\frac{1}{4}}} \quad (13)$$

Моделювання параметрів поверхневого шару з метою зниження утомного викришування і запобігання поломки зубів відновлених крупногабаритних зубчастих коліс поверхні зубів одночасно обкатуються і ковзають один по одному (рис. 12, а, в), вектори окружних швидкостей змінюються. У полюсі зачеплення (рис. б) відносно ковзання профілів відсутнє. Різниця окружних швидкостей викликає відносно ковзання профілів зубів шестерні і колеса (рис. 12, а, в). Відносно ковзання поверхонь зубів викликає появу сили тертя.

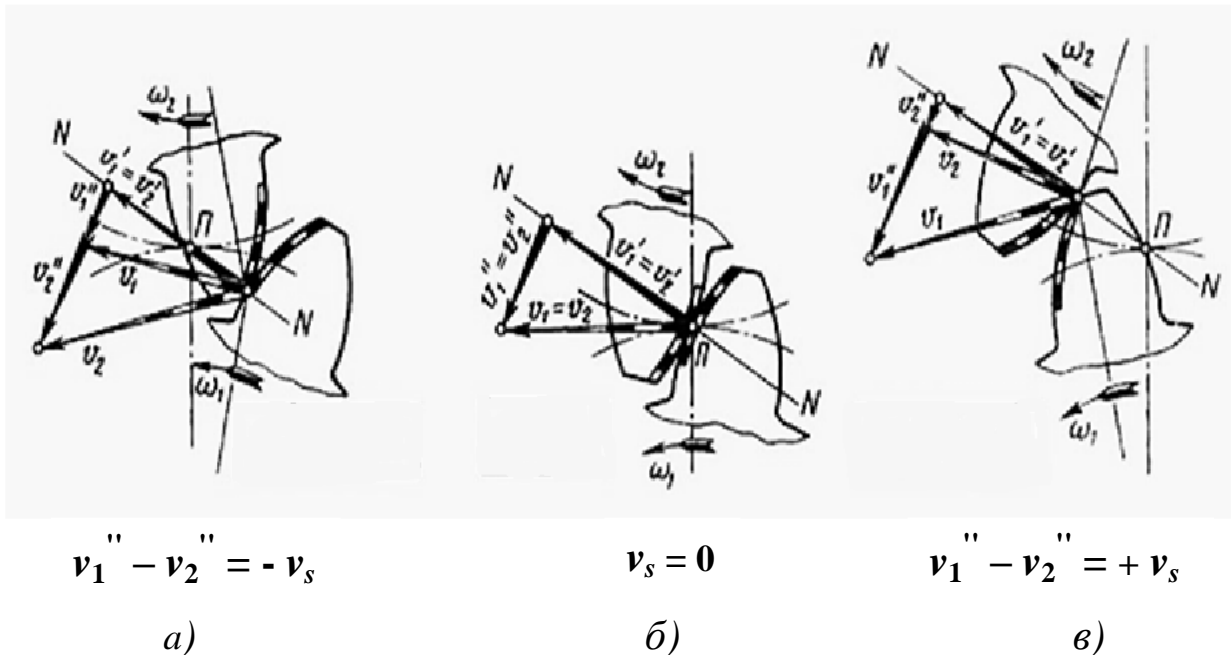


Рисунок 12 – Ковзання зубів в процесі роботи передачі:

а – різниця окружних швидкостей при вході в зачеплення у ніжки зуба шестерні; б – контакт у полюсу зачеплення, відносно ковзання профілів відсутнє; в – різниця окружних швидкостей при виході із зачеплення на вершині зуба шестерні

Утомне викришування позначається на точності роботи зубчастих коліс, на верстатах, на точності обробки. З фізичної картини контактної взаємодії

деталей машин впливає, що навантаження, яке припадає на окремий виступ контактуючих поверхонь

$$P_i = c' \cdot \sigma_T \cdot A_{ri}, \quad (14)$$

де A_{ri} – площа контакту одиничного виступу.

Підставляючи вираз A_{ri} в формулу (14), отримаємо

$$Y_{i_{nl}} = \frac{P_i}{c' \cdot \sigma_T \cdot \left(\frac{\pi \cdot t_m \cdot S_m \cdot t_{m_{nod}} \cdot S_{m_{nod}}}{4 \cdot 10^4 \cdot R_{\rho}^{n_{non}} \cdot R_{\rho_{nod}}^{n_{nod}}} \right)^{\frac{n_{non} \cdot n_{nod}}{n_{non} + n_{nod}}}}. \quad (15)$$

Процеси відновлення крупногабаритних зубчастих коліс розроблені на основі імітаційного моделювання з урахуванням прогресуючих видів зносу.

Групові маршрутні процеси відновлення крупногабаритних зубчастих коліс розроблені на основі відбору крупногабаритних коліс за вхідними параметрами для вторинного використання з подальшим постійним контролем і регулюванням рівня напружень методом вібростабілізації на різних резонансних частотах з використанням рентгенографічного аналізу.

Крупногабаритне зубчасте колесо або окремі секції встановлюються на 3-х або 4-х віброопорах з технічної гуми (рис. 13).

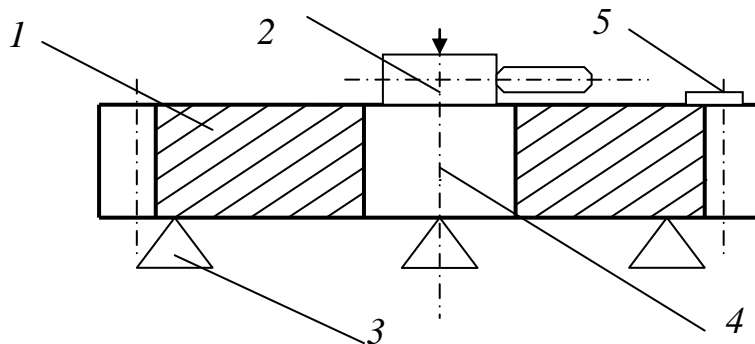


Рисунок 13 – Схема установки крупногабаритного зубчастого колеса:

- 1 – крупногабаритне зубчасте колесо; 2 – віброкомплекс;
- 3 – віброізолюючі опори з технічної гуми; 4 – вісь зубчастого колеса;
- 5 – вібродатчик

При віброобробці обидві половинки були зібрані в кільце (діаметр – 5400 мм, маса – 14000 кг) на стягуваннях. Місце кріплення вібростанду зазвичай здійснюється в районі центру ваги виробу. При віброобробці зібране зубчасте колесо мало ряд добре виражених резонансних частот. Віброобробка проводилася на частотах від 60 до 145 Гц.

У четвертому розділі розроблена методологія процесу відновлення заданих властивостей крупномодульних зубчастих передач. Ця методика дозволяє призначити режими різання виходячи з необхідної величини шорсткості, глибини наклепу, рівня залишкових напружень. Розрахунок залишкових напружень, обумовлених структурними і фазовими

перетвореннями ґрунтується на розрахунку температурних залишкових напруг і залишкових напружень, обумовлених силовим впливом на поверхневий шар.

У формулах (16)–(19) наведено розрахунок для визначення температурних залишкових напруг при обробці циліндричних крупномодульних зубчастих коліс черв'ячними модульними і спеціальними немодульними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні.

При $y = y_{0н}$; $\sigma_{0max} < 2\sigma_T \Rightarrow$

$$\sigma_{зал. T} = -\sigma_T + \frac{\beta_D \cdot A_1 \cdot E_D}{1 - \mu} \cdot \left\{ \left(\frac{H - y + a_1}{a_1} \right)^{x_1} - \frac{a_1^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} \cdot (1 + x_2) \cdot H} \right\}; \quad (16)$$

При $y < y_{0н}$; $\sigma_{0max} = 2\sigma_T$ або $y = y_{0н}$; $\sigma_{0max} = 2\sigma_T \Rightarrow$

$$\sigma_{зал. T} = \frac{\beta_D \cdot A_1 \cdot E_D}{1 - \mu} \times \left\{ \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y_{0н})^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] + (1 - \mu) \sigma_T (H - y_{0н})}{E_D \cdot y_{0н}} + \frac{a_1^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} \cdot (1 + x_2) \cdot H} \right\} \quad (17)$$

При $y_{0ox} > y \geq y_{0н}$; $\sigma_{0max} = 2\sigma_T \Rightarrow$

$$\sigma_{зал. T} = \sigma_T + \frac{\beta_D \cdot A_1 \cdot E_D}{1 - \mu} \cdot \left\{ \left(\frac{H - y + a_1}{a_1} \right)^{x_2} + \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y_{0ox})^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] + 2(1 - \mu) \sigma_T (H - y_{0ox})}{E_D \cdot y_{0ox}} \right\}; \quad (18)$$

При $y < y_{0ox}$; $\sigma_{0max} = 2\sigma_T \Rightarrow$

$$\sigma_{зал. T} = \frac{\beta_D \cdot A_1 \cdot E_D}{1 - \mu} \times \left\{ \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y_{0ox})^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] + 2(1 - \mu) \sigma_T (H - y_{0ox})}{E_D \cdot y_{0ox}} - \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H - a_1 - y_{0н})^{1+x_2} - (H - a_1)^{1+x_2} \right] + (1 - \mu) \sigma_T (H - y_{0н})}{E_D \cdot y_{0н}} \right\}, \quad (19)$$

При аналізі шорсткості обробленої поверхні на формування нерівностей обробленої поверхні при зустрічному фрезеруванні впливають: радіус округлення різальної крайки зубів фрези; параметри інструменту; змінна в часі геометрія перетину зрізу; обсяг і швидкість пластичного деформування металу, які обумовлені комплексом температурно-силових явищ, що виникають в зоні різання (рис. 14).

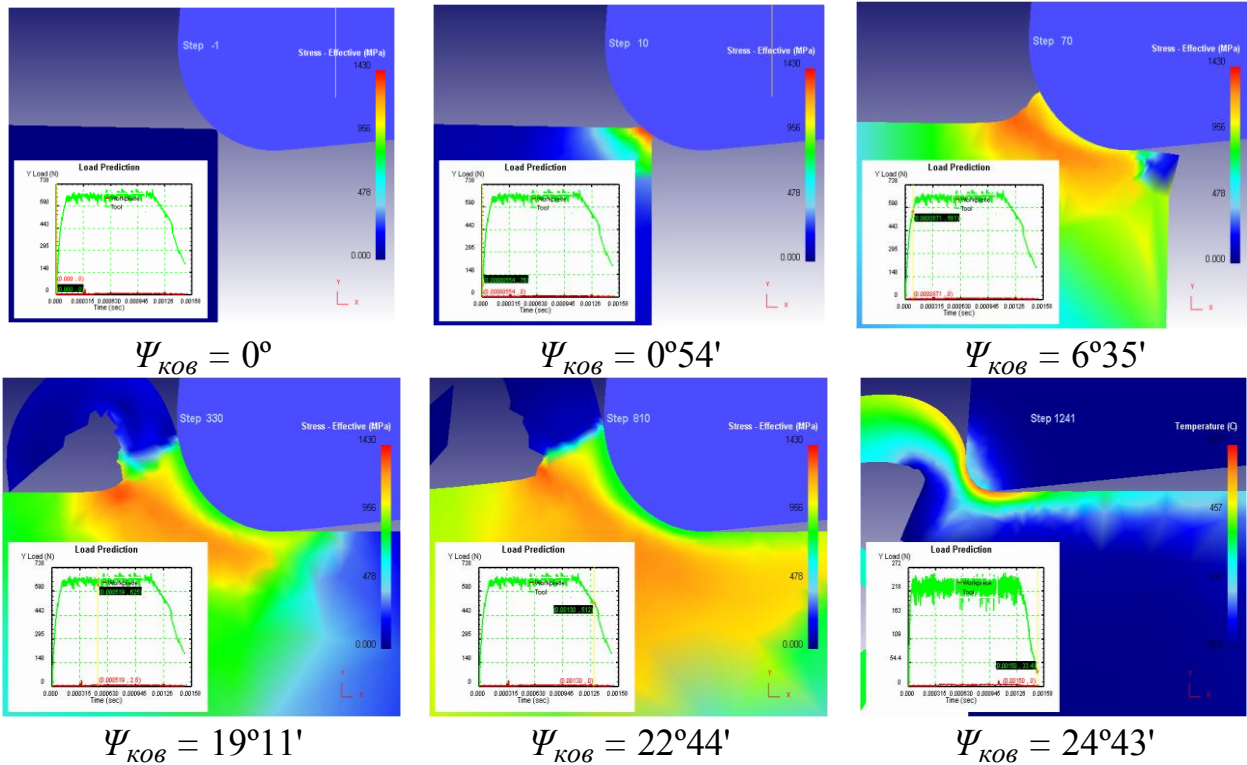


Рисунок 14 – Послідовність моделювання формоутворення глибини залягання залишкових напруг поверхневого шару ($h_{ш}$) і сходу стружки при швидкісному зубофрезеруванні при значеннях радіуса округлення різальної крайки зубів фрези $\rho = 0; 300$ мм в залежності від кута ковзання (Ψ_{KOV})

Моделювання процесів обробки зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс полягає в розробці оптимізованої математичної моделі об'єкта управління. В основі аналізу оптимізації процесу як об'єкта управління і вибору класу математичної моделі лежать закономірності протікаючих в ньому явищ, а також завжди апріорна інформація про процеси в подібних об'єктах.

З урахуванням зовнішніх керуючих і збуджуючих впливів на пружну верстатну систему, а також зворотної дії пружної системи на робочі процеси, узагальнена схема процесу різання може бути представлена у вигляді, показаному на рис. 15.

Залежно від характеру вирішуваних задач і конкретного виду обробки узагальнена схема може спрощуватися шляхом виключення несуттєвих зв'язків.

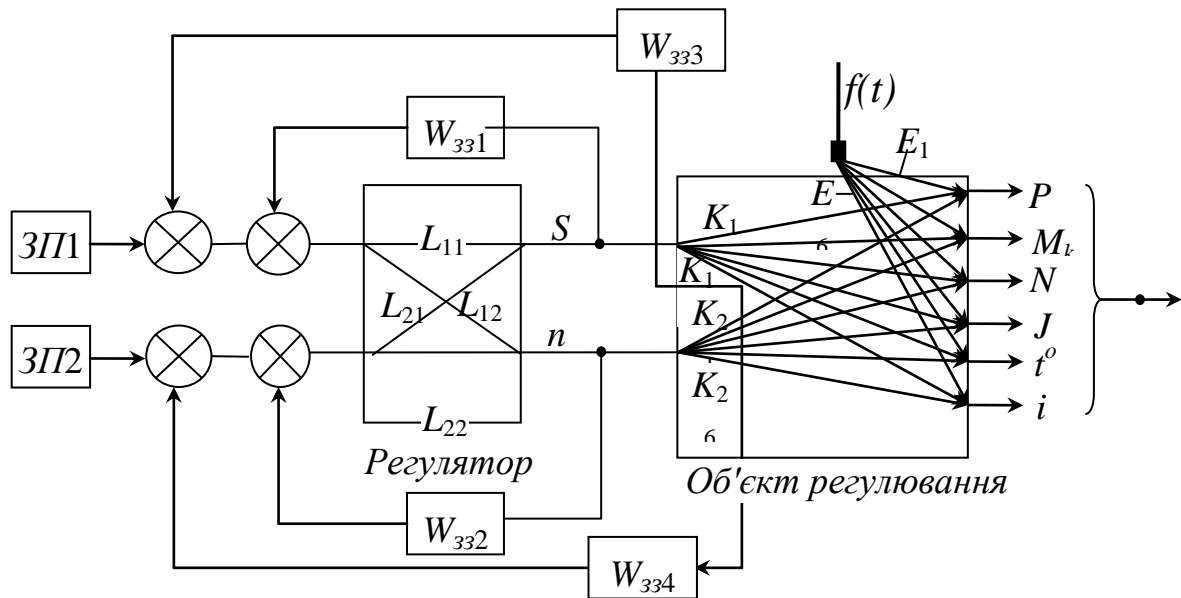


Рисунок 15 – Узагальнена схема процесу формоутворення циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс: ЗП1, ЗП2 – задаючі пристрої каналів подачі S і швидкості V ; W_{331} , W_{332} , W_{333} , W_{334} – передатні функції ланцюгів зворотних зв'язків; $f(t)$ – збурюючий вплив на процес формування поверхневого шару зубчастих коліс; $K_{11} - K_{16}$ – передатні функції об'єкта управління по керуючому впливу першого каналу; $K_{21} - K_{26}$ – передатні функції об'єкта управління по керуючому впливу другого каналу; $L_{11}, L_{12}, L_{21}, L_{22}$ – передатні функції перехресних зв'язків в регуляторі; $E_1 - E_6$ – передатні функції по збуренню

Розглянуті області оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки відновлених крупномодульних зубчастих коліс при реалізації показників максимальної продуктивності і постановки задачі оптимізації забезпечення заданої точності обробки при максимально досяжній при цьому продуктивності за формулою економічного критерію за продуктивністю (J_Q) з рахунком наплавленого шару зубів

$$J_Q = \frac{v \cdot S \cdot K_\rho \cdot t}{T + \tau_{cm}} \quad (20)$$

Зазвичай при визначенні максимуму виразу (20) розглядають J_Q і T як функції від (v, S, t) , що призводить до нерозв'язності системи рівнянь для різних значень показників (x, y, m) , наприклад, при знаходженні екстремуму економічного критерію (J_Q) з використанням множників Лагранжа.

Функції (20) для різних S і різних v представлені на рис. 16.

Перетворимо вираження (20) до виду:

$$J_Q(S)_{\max} = A \cdot F_1, \quad (21)$$

$$J_Q(v)_{\max} = A \cdot F_2, \quad (22)$$

$$\text{де } A = \frac{m^m \cdot c_v \cdot t^{1-x} \cdot S^{1-y}}{\tau_{cm}^m}; F_1 = \frac{(y-m)^{1-m}}{y}; F_2 = (1-m)^{1-m}.$$

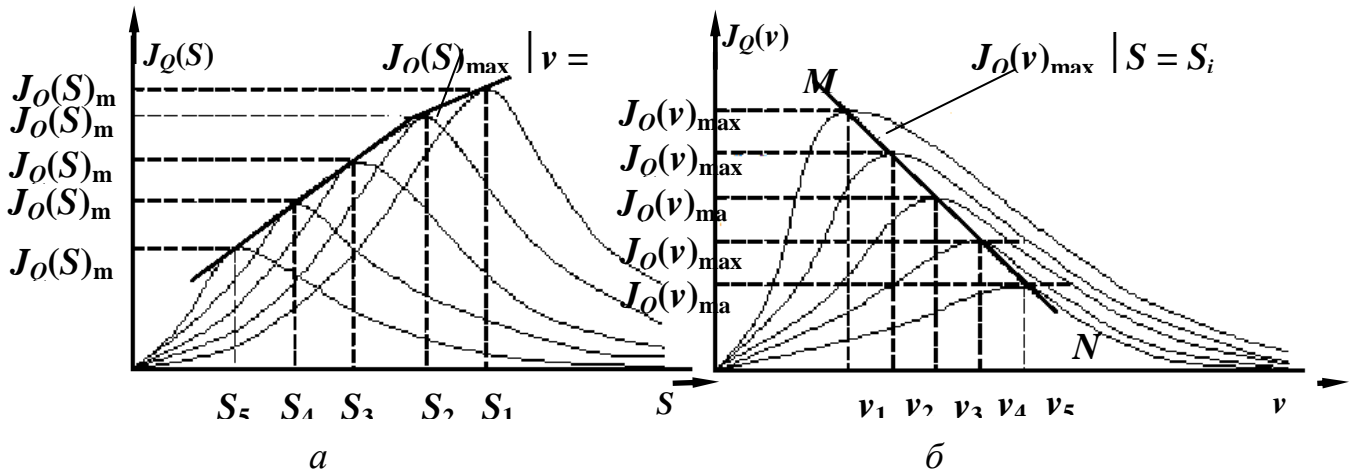


Рисунок 16 – Зміна показника якості процесу обробки: *a* – при зміні S і фіксованих значеннях v ; *б* – при зміні v і фіксованих значеннях S

Аналіз функцій F_1 і F_2 показує, що при $y \rightarrow 1$ значення $F_1 \rightarrow F_2$; при $y \rightarrow m$ значення $F_1 \rightarrow 0$, причому максимальне значення F_1 як функції від y визначається диференціюванням $\frac{\partial F_1}{\partial y} = 0$.

У п'ятому розділі виконані експериментальні дослідження точності і якості процесу зубофрезерування при відновленні зношених великогабаритних зубчастих колес. Моделювання процесів формоутворення поверхневого шару зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих колес пов'язана з урахуванням властивим цим процесам внутрішніх зв'язків за допомогою wavlet-аналізу.

Застосувавши вейвлет-перетворення і вибравши значення параметра S таким, що вплив сусідніх резонансних частот буде незначним, отримаємо

$$\psi(t) = \omega_k t + \varphi_k = \angle[W(S, \tau)] / \tau. \quad (23)$$

Продифференціював повну фазу $\psi(t)$ за часом, знаходимо частоту ω_k в вираженні (23).

Процес зубофрезерування через різної кількості одночасно беруть участь в процесі різання зубів фрези нерівномірний. На рис. 17 показана схема верстатного зачеплення правого корпусу фрези і оброблюваного колеса. Аналіз експериментальних досліджень підтвердив адекватність теоретичних висновків (рис. 18.)

Для визначення динамічних характеристик балки скористаємося диференціальним рівнянням руху для згинальних коливань. Диференціальне рівняння руху балки:

$$\frac{d^4 u}{dz^4} - \alpha^4 u = 0$$

$$\left[\alpha^4 = \frac{\omega^2 m_0}{EJ} \right]. \quad (24)$$

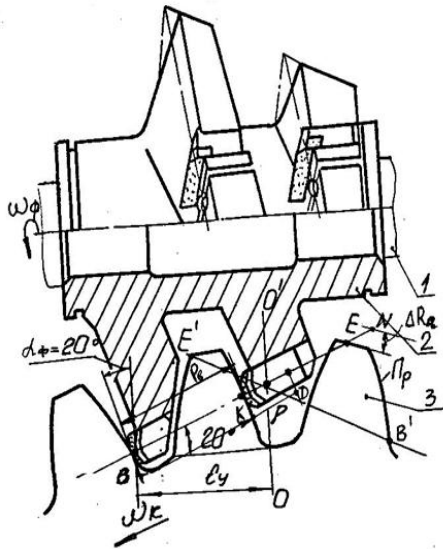


Рисунок 17 – Схема верстатного зачеплення правого корпусу фрези і оброблюваного колеса

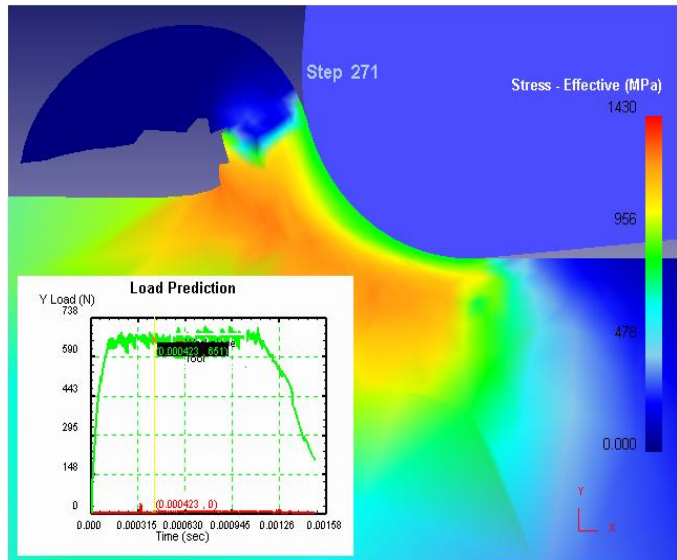


Рисунок 18 – Зміна макронапружень поверхневого шару при впровадженні ріжучого клина в оброблюючу поверхню зубчастого колеса

Граничні умови для закріпленої балки (25):

$$u_{z=0} = 0, \left(\frac{du}{dz}\right)_{z=0} = 0, \left(\frac{d^2u}{dz^2}\right)_{z=1} = 0, \left(\frac{d^3u}{dz^3}\right)_{z=1} = 0 \dots \dots \dots (25)$$

Тоді частотне рівняння, записане через функції Крілова, матиме вигляд:

$$K_1^2(\lambda) - K_2(\lambda)K_4(\lambda) = 0. \quad (26)$$

Наведемо до виду

$$\cos\lambda = -\frac{1}{ch\lambda}, \text{ де } \lambda = \alpha \cdot l. \quad (27)$$

Графічне рішення цього рівняння показано на рис. 19. Корінь рівняння для нашого випадку ($k = 1$) $\lambda l = 1.875$.

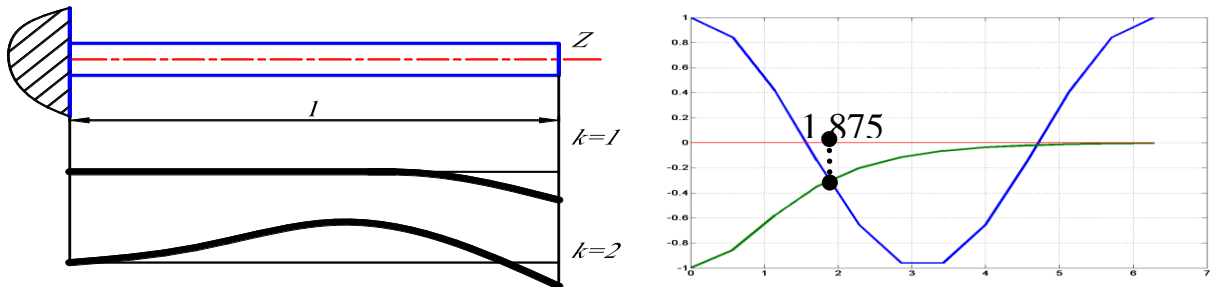


Рисунок 19 – Графічне рішення частотного рівняння

Методика подальшої обробки профілограм і волнограмм полягає в визначенні максимальної висоти виступів R_z

$$R_z = \frac{(\sum_{i=1}^5 h_i + \sum_{i=1}^5 h_i') \cdot 200}{\gamma_B}, \quad (28)$$

де γ_B – вертикальне збільшення записи профілограм або волнограмм;
визначають відносну довжину опорної лінії профілю шорсткості на рівні середньої лінії

$$t_m = \frac{\sum_{i=1}^n \eta m t}{l} \cdot 100\%; \quad (29)$$

визначають середній крок нерівностей профілю шорсткості по середньої лінії

$$S_m = \frac{\sum_{i=1}^N S m t}{N} = \frac{2l}{n \gamma_r} \quad (30)$$

де n – число пересічний профілю шорсткості з середньою лінією на базовому ділянці l ; γ_r – горизонтальне масштабування записи профілограм;

визначають середній крок нерівностей профілю по вершинах локальних виступів

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N S}{N} = \frac{l}{N \gamma_r}, \quad (31)$$

де N – число локальних виступів на базовій довжині l .

При зубофрезеруванні циліндричних зношених і відновлюваних зубчастих коліс спостерігається чотири основні типи вібрації (коливань): вільна вібрація (власні коливання); вимушені коливання, порушені від стороннього джерела, а не від процесу різання; вимушені коливання, порушені під час процесу зустрічного зубофрезерування; самозбуджуема вібрація (руйнує). Типи вібрацій досліджений в системі з одним ступенем свободи при масі $m=M$ на пружному елементі з жорсткістю k і з зусиллям демпфірування g .

Верстат може бути представлений системою великої кількості пружин, кожна з яких має жорсткість k_i , демпфірування g_i , власну частоту Ω_i , і нахил під кутом γ_i до нормалі вектора швидкості різання (рис. 20, б) (ε – кут між вектором сили різання і перпендикуляром).

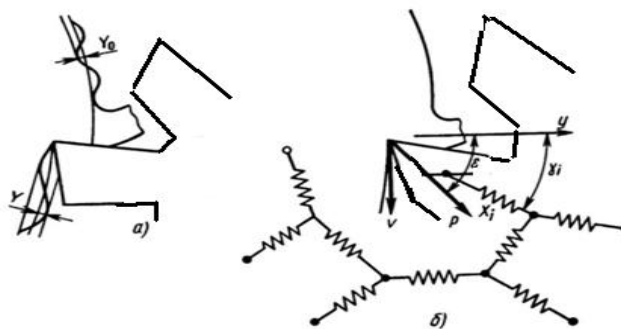


Рисунок 20 – Модель вібрації з багатьма ступенями свободи:

a – зміна товщини зрізу; b – модель пружної системи верстата при зубообробки зношених і відновлюваних зубчастих коліс

Змінюється сила різання з амплітудою P і частотою ω створює вібрацію в напрямку за допомогою складової $P \cos(\gamma_i - \varepsilon)$, так що амплітуда вібрації X_i дорівнює

$$X_i = P \cos(\gamma_i - \varepsilon) \frac{1}{k_i} \frac{\Omega_i^2}{\Omega_i^2 - \omega^2 + 2jg_i\omega}, \quad (32)$$

де $j = \sqrt{-1}$.

Отримана амплітуда в напрямку u представляє суму цих величин, т. е.

$$Y = \sum_{i=1}^n Y_i = P \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{k_i} \frac{\Omega_i^2}{\Omega_i^2 - \omega^2 + 2jg_i\omega} = PF, \quad (33)$$

де

$$F(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{k_i} \frac{\Omega_i^2}{\Omega_i^2 - \omega^2 + 2jg_i\omega}. \quad (34)$$

Для визначення критерію стабільності можна записати приватна з (32):

$$q = \frac{Y}{Y_0} = \frac{F(\omega)}{F(\omega) + 1/r}, \quad (35)$$

Повне уявлення про динаміку процесу різання можна отримати за допомогою контуру-аналога. Процес різання безпосередньо пов'язаний з динамічною піддатливістю. Внаслідок зміни товщини зрізу, що виникає в результаті вібраційних явищ, процес різання характеризується наявністю негативного зворотного зв'язку. Крім того, є позитивний зворотний зв'язок з запізненням, показана на блок-схемі (рис. 21) у вигляді допоміжного контуру.

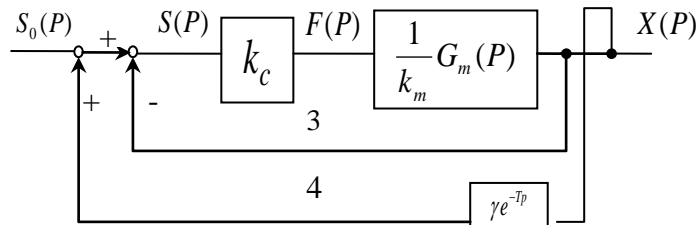


Рисунок 21 – Контур-аналог динамічного процесу різання:

1 – динаміка процесу різання; 2 – динаміка структури; 3 – первинна зворотний зв'язок; 4 – регенеративна зворотний зв'язок

Передавальна функція від $S_0(p)$ до $s(p)$ визначається безпосередньо з контуру-аналога динамічного процесу різання (рис. 21). Таким чином:

$$\frac{x(p)}{x_0(p)} = \frac{1}{1 + (1 - \nu \cdot e^{-r/p}) \cdot (k_c / k_m) \cdot G_m(p)}. \quad (36)$$

Аналіз розглянутого контуру (будь-яким з відомих в теорії автоматичного регулювання методом) дозволяє зробити висновки про динаміку процесу зубофрезерування в реальних умовах.

У шостому розділі розроблено інструментальне оснащення при інтенсивної і високоякісної зубообробки встановлених загортованих крупномодульних зубчастих коліс.

При відновленні зношених зубів наплавленням у зубчастих коліс великого діаметра до 8,5м і модулі 10-65мм наплавляють зношену сторону кожного зуба (рис. 22).

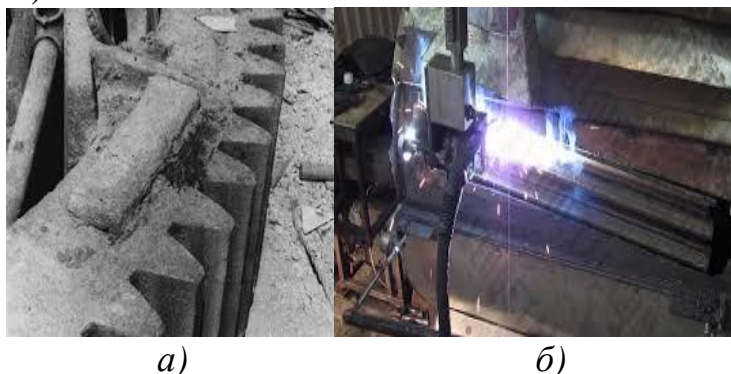


Рисунок 22 – Зношені великогабаритні зубчасті колеса: *a* - ізнощеное циліндричне зубчасте колесо; *б* - наплавлення ізнощеного циліндричного зубчастого колеса

При експлуатації великогабаритних циліндричних зубчастих передач виникають наступні види руйнування зубів: утомлююча викришування робочих поверхонь зубів, поломка зубів, ізнашування, заїдання, смятие робочих поверхонь зубів.

Відновлення точних великогабаритних циліндричних зубчастих вінців під загартування і остаточну лезову швидкісну зубообробки застосовують первинні чорнові фрази з модифікованим профілем головки зуба з «протуберанцем» (рис. 23, *a*, *б*)

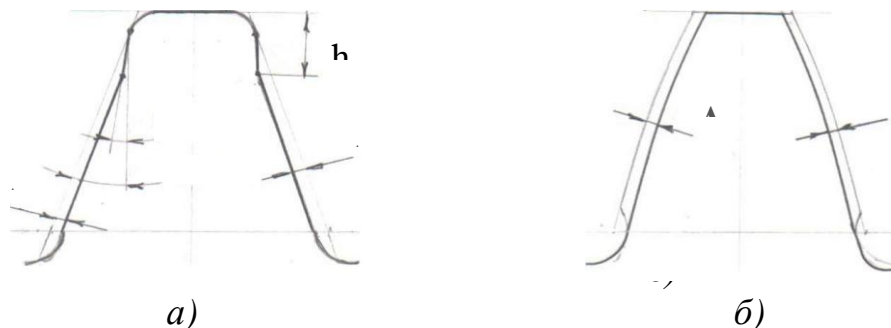


Рисунок 23 – Попереднє нарізування зубів колеса: *a* - зуб черв'ячної фрези з «протуберанцем»; *б* - зуб колеса оброблений з припуском - Δ ; h - висота «протуберанця», a_0 - кут вихідного профілю, a_p - кут профілю «протуберанця»

Зубофрезерування здійснювалося на спеціальному важкому вертикально зубофрезерному верстаті мод. КУ-306 (рис. 24), з діаметром робочої планшайби 8000мм.

Режими чорнового нарізування застосовували такі: подача фрези $S_f = 2,5$ мм/об.; частота обертання $n_f = 0,2$ сек⁻¹; напрямок фрезерування зустрічну, МОР «Індустріальне» -20, спеціальні фрези (рис. 5). Машинне час нарізання вінця за один прохід склало 110 годин.

У практиці зубообробки крупномодульних багатозахідних черв'ячних фрез ($m > 12$) стандартного виконання набули поширення через складність

їхнього виготовлення, порівняльного малого числа ріжучих зубів та ін. (рис. 25).

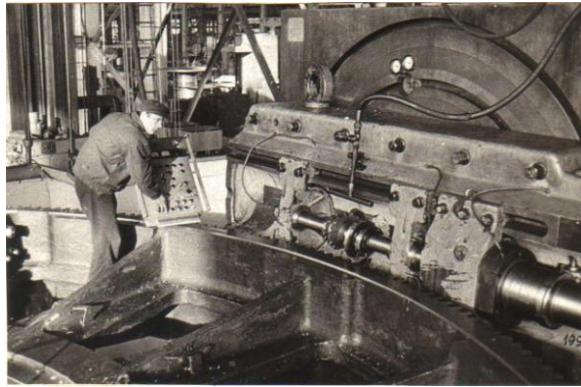


Рисунок 24 – Відновлення зубчатого вінця $m = 28$ мм; $z_k = 284$, $D_a = 8058,4$ мм рудорозмольного млину моделі МБ90х30



Рисунок 25 – Корпус спеціальної твердосплавної фрези $m = 20$ мм, оснащеної твердосплавними непереточувани поворотними пластинками зі сплаву ВК 10-ХОМ

Розроблені конструкції фрез: спеціальна двокорпусна і універсальна однокорпусні (рис. 26).

Відповідно, виходячи з кінематики зачеплення інструменту і деталі, визначимо кути β_k і θ_3 :

$$\beta_k = \sigma_B - (\gamma_2 - \mu_y) = \sigma_B - \left(\frac{360^0}{z_k} - \mu_y \right), \quad (37)$$

де μ_y – кут, відповідний установчого відстані l_y (рис. 6.13).

$$\mu_y = \arcsin \frac{l_y}{r_6}, \quad (38)$$

де r_6 – радіус основного кола зубів колеса.

Виходячи з кінематики верстатного зачеплення двухзаходной фрези кут θ_3 определяється по залежності

$$\theta_3 = \beta_k z_k = \left(\sigma_B - \frac{360^0}{z_k} + \mu_k \right) z_k. \quad (39)$$

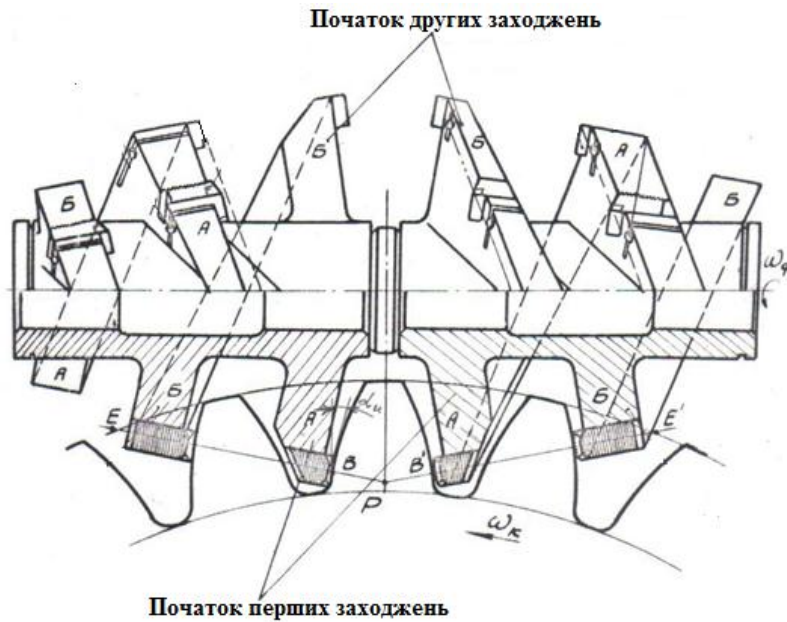


Рисунок 26 – Принципова конструкція двухкорпусной двухзаходной спеціальної фрези ($\alpha_u = 5^\circ - 19^\circ 30'$)

Параметр хвилястості h_g на обробленій поверхні зубів колеса визначимо через координату точки перетину двох проєкцій траєкторій зуба фрези, зміщених одна відносно одної на величину подачі інструменту S . Вихідна залежність для визначення висоти хвилі h_g має вигляд

$$h_g = 2r_k \cos\left(\beta - \frac{\gamma_g}{2}\right) \sin \frac{\gamma_g}{z_k} - r_\phi \sin \gamma_g \sin \beta_y. \quad (40)$$

Для поліпшення характеристик поверхневого шару зубів відновлених і зношених великогабаритних зубчастих коліс удосконалений метод відновлення накатними роликками (рис. 27).



Рисунок 27 – Черв'ячний накатник, $m = 20$ мм, з конічними накатними роликками

Оптимальні режими обкатки в залежності від технічного стану важкого зубофрезерного верстата становлять: подача інструменту $S_o = 7 \dots 8$ мм/об; число оборотів накатника $n = 20 \dots 30$ об / хв; швидкість обкатки $V = 20 \dots 35$ м / хв; зусилля обкатки $P = 800 \dots 1300$ Н.

Удосконалений метод поверхневого гарту зубів великогабаритних коліс із застосуванням пальників, що працюють на природному газі, або пропан - бутанових сумішах. На рис 28 представлено машинне загартування зубів шестерні $m = 25$.

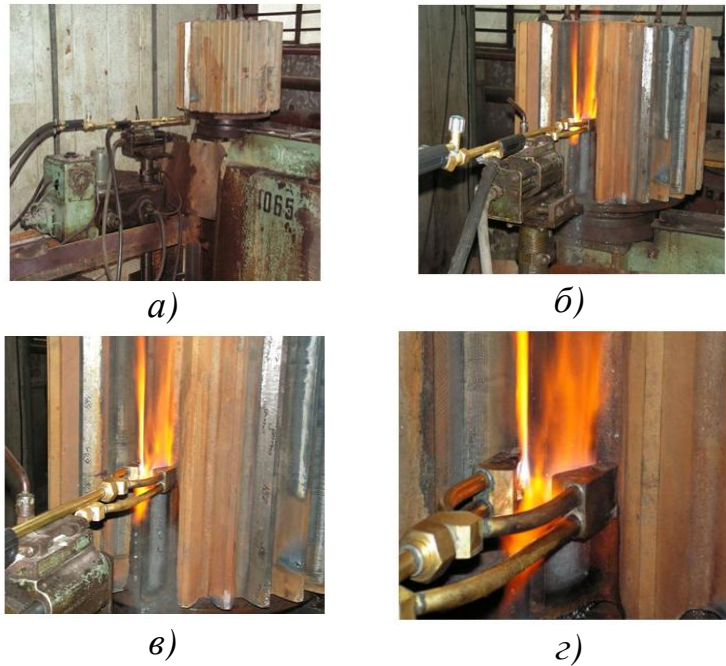


Рисунок 28 – Машинне загартування зубів шестерні $m = 25$: верстат для поверхневого газокисневого загартування (а), процес загартування (б) і два моменти відпрацювання режимів (в, г)

Нижче наведені емпіричні залежності для розрахунку параметрів стану евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс при механічних методах їх обробки.

Зубофрезерування фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки, після спреєрної термообробки (сталь 34ХНМ):

$$R_a = 4830 \cdot \frac{S_z^{1,69} \cdot t^{0,15}}{V^{1,25} \cdot \rho^{0,14} \cdot Z_1^{0,24} \cdot Z_2^{0,28} \cdot (HRC)^{4,02} \cdot t^{0,32} \cdot K_{\phi p}^{1,24}} \cdot \frac{1}{k_m \cdot k_0}; \quad (41)$$

$$R_p = 8730 \cdot \frac{S_z^{1,15}}{V^{1,27} \cdot \rho^{0,24} \cdot Z_1^{0,14} \cdot Z_2^{0,17} \cdot (HRC)^{2,82} \cdot t^{0,26} \cdot K_{\phi p}^{1,24}} \cdot \frac{1}{k_m \cdot k_0}; \quad (42)$$

$$W_z = 5500 \cdot \frac{S_z^{1,01} \cdot t^{0,46} \cdot \rho^{0,16} \cdot \gamma^{0,54}}{V^{1,52} \cdot \rho^{0,24} \cdot Z_1^{0,14} \cdot Z_2^{0,17} \cdot (HRC)^{2,82} \cdot K_{\phi p}^{1,24}}; \quad (43)$$

$$S_m = 17 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(HRC)^{1,58}}{\rho^{0,24} \cdot Z_1^{0,07} \cdot Z_2^{0,11} \cdot V^{2,04}} \cdot \frac{k_0}{k_m}, \quad (44)$$

Для прогнозування показників якості поверхневого шару розроблена математична модель з урахуванням, 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 .

$$R_z = 5 \cdot R_a = \frac{P_z \cdot S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \gamma^{0,41}} \cdot K_\rho =$$

$$10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot S_m^{\frac{3}{2}} \cdot k^{-3}$$

$$= \frac{\quad}{H_p^{\frac{1}{4}} \cdot W_p^{\frac{1}{4}}}, \quad (45)$$

У поверхневому шарі зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс формується поле залишкових напружень, головні осі якого також не збігаються з напрямками формотворчих рухів. В результаті за цими напрямками поряд з нормальними компонентами з'являється і дотична. Дотичні залишкові напруги, як і нормальні (тангенціальні і осьові) можуть бути і позитивними, так і негативними, а їх величина, природно, тим більше, чим більше кут відхилення головних осей від напрямку формотворчих рухів на вугіллі ковзання зуба фрези $\Psi_{ск}$.

ВИСНОВКИ

Вирішена важлива науково-технічна проблема підвищення ефективності ремонту крупногабаритних зубчастих передач діаметром до 8,5 метрів і модулем до 65 мм шляхом вибору раціональної стратегії відновлення їх функціональних параметрів на основі системного аналізу дефектів і методів їх усунення імітаційним моделюванням взаємозв'язків геометричних, кінематичних і динамічних параметрів зачеплення зубів важконавантажених зубчастих коліс.

1. Виконано функціональний аналіз процесу експлуатації КЗК і пов'язану з нею проблему відновлення функціональних властивостей за даними літературних джерел з проблеми ремонту КЗК, сформульовані критерії формування структури і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зношених КЗК, і встановлена ефективність існуючих методів відновлення.

2. Здійснено формалізацію процесу опису системи відновлення поверхонь зубів шляхом формулювання критеріїв та областей існування математичних моделей на основі аналізу методів відновлення функціональних властивостей КЗК, організаційних і технічних обмежень, що накладаються на область формування математичної моделі регламенту відновлення функціональних характеристик КЗК.

3. Розроблена узагальнена математична модель процесу відновлення функціональних властивостей КЗК у вигляді інформаційних, організаційних та функціональних моделей системи обробки.

4. Сформульовано методологію дефектації та відновлення заданих властивостей КЗК, реалізовано використання методик в умовах промислового

виробництва, що забезпечує послідовність ремонту та відновлення з найменшими витратами.

5. Проведені експериментальні випробування математичних моделей і методик проектування при відновленні КЗК, що дало змогу забезпечити якісний ремонт та відновлення зубчастих передач.

6. Розроблено технологічне і інструментальне оснащення процесів високоєфективної обробки загартованих КЗК, що дозволило забезпечити продуктивність зубообробки відновлених зубчастих коліс в 3 – 5 разів.

7. Результати роботи впроваджені ДП «Завод ім. В. О. Малишева» (м. Харків), ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О.О. Морозова», ТОВ «Костянтинівський завод механічної обробки» (м. Костянтинівка), ТОВ «Слобожанська промислова компанія» (м. Харків) та у навчальний процес кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХПІ» (м. Харків).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гасанов М.И. О повышении эффективности процесса алмазного шлифования / Ф.М. Евсюкова, О.В. Евсюкова, А.Ф. Еникеев, И.С. Зыков, Л.А. Шищенко, М.И. Гасанов // Вестник Национального политехнического университета «ХПИ». – Харьков: №14, 2001. – С. 202–206.

Здобувачем удосканелені режими різання для дослідження алмазного шлифования.

2. Анализ обобщенной модели технологического процесса прецизионного алмазного шлифования / Евсюкова Ф.М., Еникеев А.Ф., Зыков И.С., Шищенко Л.А., Гасанов М.И. // Вестник инженерной академии. – К.: №3, 2001. – С. 585–592.

Здобувачем розроблено алгоритм узагальненої моделі технологічного процесу прецизійного алмазного шлифування.

3. Оптимизация процесса алмазного шлифования по критерию производительности / Евсюкова Ф.М., Еникеев А.Ф., Гасанов М.И., Зыков И.С., Шищенко Л.А. // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: № 9, 2002. Т. 10 – С. 52–56.

Здобувачем розроблено алгоритм інтеграції процесу алмазного шлифування за критерієм продуктивності.

4. Набока Е.В. Анализ взаимодействия алмазного круга с обрабатываемым материалом / Е.В. Набока, М.И. Гасанов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2003. – № 16. – С. 45–48.

Здобувачем запропоновано алгоритм моделювання взаємодії алмазного круга з оброблюваним матеріалом.

5. Новиков Ф.В. Условия снижения энергоемкости и повышения производительности обработки при алмазном шлифовании твердых сплавов / Ф.В. Новиков, М.И. Гасанов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – Вып.67. С. 57–64.

Здобувачем отримані математичні залежності зниження енергоємності та підвищення продуктивності обробки.

6. Новиков Ф.В. Физические закономерности процесса резания при алмазном шлифовании / Ф.В. Новиков, М.И. Гасанов // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні». – 2004. – Вип. 26. – С. 31–40.

Здобувачем отримані математичні залежності та фізичні закономірності процесу різання.

7. Новиков Ф.В. Производительность и качество обработки при алмазном шлифовании твердых сплавов с увеличенными глубинами резания / Ф.В. Новиков М.И. Гасанов // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – «Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні». – 2005. – Вип. 33. – С. 23–26.

Здобувачем отримані аналітичні залежності якості обробки при шліфуванні з збільшеними глибинами різання.

8. Гасанов М.И. Определение условий повышения эффективности процесса шлифования / М.И. Гасанов, В.В. Нежебовский, А.В. Черненко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – Харків, 2008. – № 22. С. 8–12.

Здобувачем отримані умови підвищення ефективності процесу шліфування.

9. Гасанов М.І. До питання застосування нейронних мереж при керуванні технологічним устаткуванням / М.І. Гасанов, О.Ю. Приходько, С.Є. Сліпченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – Харків, 2010. – № 24. С. 26–32.

Здобувачем отримані математичні залежності для узагальненого опису застосування нейронних мереж при керуванні технологічним устаткуванням.

10. Степанов М.С. Моделирование теплового режима в технологической системе охлаждения шлифовального верстата / М.С. Степанов, М.І. Гасанов, І.В. Волошкіна // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 6 (1049). – С. 185–191.

Здобувачем запропонована математична залежність для опису температури змащуючої охолоджуючої рідини при шліфуванні.

11. Клочко А.А. Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах / А.А. Клочко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 40 (1149). С. 102–107. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079–004X.

Здобувачем розроблена концепція структури і принципи створення і функціонування тертя качення і тертя ковзання в зубчастих передачах.

12. Опыт создания современных технологий изготовления нежестких деталей с применением передовых CAD/CAM/CAE систем / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, М.И. Гасанов, Р.В. Головатый, С.А. Гаков, С.С. Гнучих // Вісник НТУ «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск:

Технології в машинобудуванні – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – №. 4(1113). – С. 37–40.

Здобувачем запропонована методика виготовлення нежорстких деталей із застосуванням передових CAD / CAM / CAE систем.

13. Литвинов В.М. Технологические особенности спрерной закалки крупногабаритных зубчатых колес в тяжелом машиностроении / В.М. Литвинов, Е.В. Мироненко, А.Н. Шелковой, М.И. Гасанов, А.А. Ключко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – Вып. 38. – С. 51–59.

Здобувачем запропонован спосіб спрерного гарту відновлених великогабаритних зубчастих коліс.

14. Добротворский С.С. Перспективы применения передовых технологий в зубообработке конических колес с круговыми зубьями / С.С. Добротворский, Е.В. Басова, А.А. Ключко, М.И. Гасанов, Е.Э. Тонкошкур // Автоматизированные технологии и производства. – 2016. – № 2 (12). – С. 10–14.

Здобувачем виконан аналіз передових технологій в зубообробки конічних коліс з круговими зубами.

15. Ключко А.А., Гасанов М.И., Басова Е.В. Регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079–004X.

Здобувачем розроблен регламент вибору параметрів стану поверхневого шару загартованих зубчастих коліс.

16. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / О.М. Шелковий, О.О. Ключко, М.И. Гасанов, Д.О. Кравченко, О.О. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079–004X.

Здобувачем отримано математичні залежності моделювання геометричних параметрів процесу зубофрезерування.

17. Шелковой А.Н. Обеспечение эксплуатационных свойств закаленных зубчатых колес / А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, М.И. Гасанов // Вестник современных технологий: сб. науч. тр. – Севастополь : ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2017. – Вып. 8. – С. 61–70.

Здобувачем отримано математичні залежності для забезпечення експлуатаційних властивостей загартованих зубчастих коліс.

18. Исследование процессов зубофрезерования закаленных шевронных зубчатых колес / А.А. Ключко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова, С.Ю. Палашек, А.Л. Невмержицкий // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – Вип. 40. – С. 90–101.

Здобувачем розроблено ряд нових схем формоутворення загартованих шевронних зубчастих коліс.

19. Гасанов М.И., Ключко О.О., Заковоротний О.Ю., Пермінов Є.В. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних

властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: зб. наук. пр. / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107–112.

Здобувачем розроблен регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач.

20. Гасанов М.И., Клочко А.А., Черкашина Г.И., Перминов Е.И. Групповые маршрутные технологические процессы восстановления крупногабаритных зубчатых колес на основе имитационного моделирования с учетом прогрессирующих видов износа // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 28–36.

Здобувачем запропонована методика групових процесів відновлення великогабаритних зубчастих коліс на основі імітаційного моделювання з урахуванням прогресуючих видів зносу.

21. Шаповалов В.Ф., Печеный В.И., Клочко А.А., Пермяков А.А., Шелковой А.Н., Гасанов М.И., Анцыферова О.А. Повышение качества поверхностного слоя зубьев изношенных и восстанавливаемых крупногабаритных зубчатых колес поверхностным пластическим деформированием // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб.наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – Вип. 42. – С. 91–102.

Здобувачем запропонован з метою підвищення якості поверхневого шару зубів зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс поверхневе пластичне деформування.

22. Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Antsyferova O., Belovol A. Optimizing the technology of reconditioning large high precision gear rims. The current state of scientific research and technology in the industry. – Kharkiv, 2018. – № 3 (3). – P. 59–70.

Здобувачем розроблен спосіб оптимізації відновлення великогабаритних зубчастих вінців підвищеної точності із застосуванням конструкції спеціальних і універсальних одне - і двухзаходних твердосплавних фрез як з переточуваними ріжучими елементами, так і з неперетачиваемими поворотними пластинками.

23. Гасанов М.И. Твердосплавные червячные фрезы после алмазной заточки для восстановления крупногабаритных зубчатых колес. Резание и инструменты в технологических системах // Международный научно-технический сборник / редкол.: А.И. Грабченко (отв. ред.). – Харьков : НТУ «ХПИ», 2018. – Вып. 88. – С. 32–42.

24. Fesenko, A., Basova, Y., Ivanov, V., Ivanova, M., Yevsiukova, F., Gasanov, M. "Increasing of Equipment Efficiency by Intensification of Technological Processes", Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 2018. <https://doi.org/10.3311/PPme.13198>.

Здобувачем запропонован аналіз надійності досліджуваної конструкції сепаратора.

25. Kotliar A. Ensuring the reliability and performance criterias of crankshafts / A. Kotliar, M. Gasanov, Y. Basova, O. Panamariova, S. Gubskiy – *Diagnostyka*, 2019; 20(1): 23–32. <https://doi.org/10.29354/diag/99605>.

Здобувачем виконан аналіз надійності проекрованої конструкції люнета.

26. Пат. на винахід 114964 UA, МПК В60К 23/02, F16D 13/38. Пристрій для керування двопотоковою муфтою зчеплення транспортного засобу / С.А. Миколайович, М.Є. Сергієнко, О.І. Худолій, М.А. Ткачук, М.І. Гасанов, Н.М. Павлова, О.О. Ткаченко. – № а2015 10416; заявл. 26.10.2015; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. – 4 с. : ил.

27. Пат. на изобретение 2622438 RU, МПК В60К 23/02. Устройство управления двухпоточной муфтой сцепления транспортного средства / А.Н. Сергиенко, Н.Е. Сергиенко, А.И. Худолій, Н.А. Ткачук, М.И. Гасанов, Н.Н. Сергиенко. – № 2015141398; заявл. 29.09.2015; опубл. 15.06.2017, Бюл. № 17. – 4 с. : ил.

28. Пат. на винахід України №117049, В60К 17/348, В60С 23/00, В60G 17/0195, В60G 17/04. Транспортний засіб/ Сергієнко М.Є., Сергієнко А.М., Худолій О.І., Гасанов М.И., Ткачук М.А., Медведєв М.Г., Павлова Н.М. Заявка а2016 08218. Заявл. 25.07.2016. Опубл. 11.06.2018, Бюл. №11.

29. Пат. на корисну модель u 2018 02191 UA, МПК F16H 5i9/04 (2016.01). Спосіб забезпечення контактування зубів ведучої шестерні з зубами веденого колеса / В.Д. Ковальов, О.О. Ключко, Д.О. Кравченко, О.М. Шелковий, О.А. Пермяков, М.І. Гасанов, А.О. Скоркін, О.Л. Кондратюк. Заявка u2018 02191. Заявл. 02.03.2018. Опубл. 10.10.2018, Бюл. №19.

30. Степанов М.С. Введение в современную технологию турбо и гидромашиностроения: учеб. пособ. / М.С. Степанов, М.И. Гасанов. – Х.: ООО «Щедрая усадьба плюс». – 2014. – 460 с.

Здобувачем запропоновани методи покриття та відновлення контактуючих прецизійних поверхонь.

31. Гасанов М.И. Исследование плоского алмазного электроэрозионного шлифования изделий из твердых сплавов / М.И. Гасанов // Труды Госуд. Аэрокосмического унив. им. Н.Е. Жуковского. «Авиационно – космическая техника и технология» – Харьков: ГАУ «ХАИ», 2000. Вып. 14. С. 343–345.

32. Статическая оптимизация процесса алмазного шлифования по критерию производительности / Евсюкова Ф.М., Еникеев А.Ф., Зыков И.С., Шищенко Л.А., Гасанов М.И. // В сборнике «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харьков: Часть 2, 2002. – С. 230–236. *Здобувачем отримано математичні залежності для узагальненого опису алмазного шліфування за критерієм продуктивності.*

33. Гасанов М.И., Новиков Ф.В., Кривошопка Ю.Н., Ткаченко В.П., Новиков Г.В., Дитиненко С.А. Повышение производительности алмазного шлифования изделий из твердых сплавов // Інформаційні технології: наука,

техніка, технологія, освіта, здоров'я: Анотації доповідей міжнародної науково-технічної конференції 16–17 травня 2002 р., Харків. С. 94.

Здобувачем розроблено механізм управління підвищення продуктивності алмазного шліфування виробів з твердих сплавів в інтерактивному режимі.

34. Гасанов М.И. Повышение эффективности процесса круглого внутреннего алмазного шлифования твердосплавных вставок / М.И. Гасанов, Ф.В. Новиков // Физические и компьютерные технологии: труды 13 Международной научно-технической конференции, 19–20 апреля 2007 г., Харьков. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2007. – С. 168–172.

35. Новиков Ф.В. Разработка модуля имитационного моделирования технологической системы «многоцелевой системы – станок с ЧПУ» / Ф.В. Новиков, М.И. Гасанов, В.В. Фролов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – Харків, 2007. – № 17. С. 105–111.

Здобувачем розроблена методика імітаційного моделювання технологічної системи «багатоцільовий системи - верстат з ЧПУ».

36. Гасанов М.И. Определение технологических возможностей алмазного шлифования твердосплавных изделий / М.И. Гасанов, В.В. Нежебовский // Физические и компьютерные технологии: труды 14 Международной научно-технической конференции, 24–25 сентября 2008 г., Харьков. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2008. – С. 122–125.

Здобувачем отримано математичні залежності для узагальненого опису повного профілю зубчастих коліс.

37. Новиков Ф.В., Гасанов М.И. Математическая модель механики процесса микрорезания при алмазном шлифовании // Физические и компьютерные технологии: Труды 15-й Международной научно-технической конференции, 2–3 декабря 2009 г., Харьков. – Харьков: ХНПК «ФЭД», 2009. – С. 214–220.

Здобувачем розроблена математична модель механіки процесу мікрорізання.

38. Стабілізація трибологічного контактування у зубчастих передачах технологічними методами / О.О. Ключко, М.І. Гасанов, Є.В. Басова, Д.О. Кравченко // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів V Всеукраїнської науково-технічної конференції, 8–12 лютого 2016 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2016. – С. 50–51.

39. Особенности эксплуатации абразивных кругов при зубошлифовании / Ф.В. Новиков, А.А. Ключко, М.И. Гасанов, Е.В. Басова, А.Н. Лищенко // Физические и компьютерные технологии. Труды 22-й Международной научно-практической конференции, 7–9 декабря 2016 г., Харьков. – Д.: Лира, 2016. –С. 110–112.

40. Пермяков А.А. Анализ погрешностей технологических процессов обработки отверстий с перекрещивающимися и пересекающимися осями корпусных деталей тяжелых токарных станков / А.А. Премаков, А.А. Ключко, М.И. Гасанов // Обладнання і технології сучасного машинобудування: матеріали Всеукраїнської науково практичної конференції, Україна,

м.Тернопіль, 11–12 травня 2017 р. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. – С. 188.

41. Цилиндрические зубчатые передачи с неньютоновским состоянием рабочей жидкости / В.Д. Ковалев, А.А. Ключко, Д.А. Кравченко, М.И. Гасанов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали XV Міжнародній науково-практичній конференції, 30 травня – 1 червня 2017 р. / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2017. – С. 40.

42. Регламент выбора и назначения параметров обработки при скоростном лезвийном зубофрезеровании / Н.С. Равская, А.А. Охрименко, А.А. Ключко, М.И. Гасанов // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня – 01 липня 2017 р., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2017. – Т. 4. – С. 350–353.

43. Пермяков А.А. Экономия электроэнергии и её нормирование в механообработке / А.А. Пермяков, М.И. Гасанов, В.И. Горбулик // Всеукраїнська наукова конференція «Розвиток прикладної науки, освіти та студентського самоврядування на Буковині» (26–27 травня 2017 р., м. Чернівці): матеріали конференції – Харків: НТУ «ХПИ», 2017. – С. 48–50. – ISBN 978–617–05–0241.

44. Ключко А.А. Новые способы высокоскоростной обработки закаленных цилиндрических зубчатых колес абразивным инструментом / А.А. Ключко, М.И. Гасанов, О.А. Анцыферова // Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції студентів, магістрів та аспірантів. – Харків: НТУ «ХПИ», 2017. – С. 54–55.

45. Погрешности технологических процессов обработки отверстий корпусных деталей тяжелых токарных станков с ЧПУ / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, М.И. Гасанов // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу». Випуск 3. – Херсон: ХНТУ, 2017. – С. 32–33.

46. Трибологический метод выбора технологического регламента при скоростном лезвийном зубофрезеровании / Н.С. Равская, А.А. Охрименко, А.А. Ключко, М.И. Гасанов // Труды XXVII международной конференции «Новые технологии в машиностроении» (3–8 сентября 2017 г., Коблево). – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2017. – С. 19–20.

47. Технологические особенности обеспечения точности изготовления корпусов крупногабаритных редукторов / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, М.И. Гасанов, Е.В. Набока // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-практической конференции, 20–22 сентября 2017 г., Харьков. – Одесса: ОНПУ, 2017. – С. 108–109.

48. Актуальность дифференцированного и комплексного прогнозирования в условиях имитационного моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств крупномодульных зубчатых колес / А.А. Пермяков, А.Н. Шелковой, А.А. Ключко, А.А. Охрименко, М.И. Гасанов //

Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів VII Всеукраїнської науково-технічної конференції, 5–9 лютого 2018 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – С. 127–129.

49. Гасанов М.И. Оптимизация технологического процесса восстановления крупномодульных зубчатых колес // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 29 – 31 травня 2018 року / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 17.

50. Гасанов М.И., Шелковий О.М., Клочко О.О., Анциферова О.О. Имитационное моделирование технологических процессов восстановления крупногабаритных зубчатых колес с учетом прогрессирующих видов износа // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції 29–31 травня 2018 року / Під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2018. – С. 18.

51. Пермяков А.А., Клочко А.А., Гасанов М.И. Математическая модель синтеза технологического регламента восстановления функциональных свойств крупномодульных зубчатых передач. XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня - 01 липня 2018 року в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – Т. 4. – С. 348–350.

АНОТАЦІЇ

Гасанов М.И. Основи процесу відновлення точності та якості крупногабаритних зубчатих передач із застосуванням методів імітаційного моделювання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2019 р.

Дисертацію присвячено вирішенню проблеми підвищення технічного рівня робочих машин, його збереження протягом певного періоду експлуатації, а також відновлення на етапі ремонту і модернізації є актуальними завданнями сучасного машинобудування.

Ефективність виробництва в гірничодобувній і переробній галузях пов'язана з рівнем розвитку машин транспортних і енергетичних систем, приводи яких включають в себе унікальні крупногабаритні зубчасті передачі діаметром до 12 метрів і модулем до 36 мм. Гірські і транспортні машини працюють при високих навантаженнях в екстремальних умовах навколишнього середовища, абразивний знос і вібраційний характер навантаження яких призводить до прискореної втрати функціональних параметрів зубчастих передач, скорочуючи терміни експлуатації приводів. Проблема забезпечення життєвого циклу подібних машин полягає у визначенні доцільності виготовлення нових деталей приводу або відновлення зношених. Для

вирішення проблеми забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих коліс з урахуванням їх несучої здатності і контактної взаємодії, які залежать від стану поверхневого шару в цілому (макровідхилення, хвилястості, шорсткості, фізико-хімічних властивостей), а не тільки від параметрів шорсткості, розроблен комплексний підхід вивчення зміни форми зубів, зносу і подальшого відновлення крупногабаритних зубчастих коліс.

Досліджені та реалізовані вибори стратегії ремонту, заснованому на метрологічній системі контролю параметрів стану поверхневого шару зубчастих коліс, що характеризують їх експлуатаційні властивості. Вивчені закономірності процесів відновлення функціональних параметрів крупномодульних зубчастих коліс, як основи комплексного варіаційного вибору стратегії ремонту.

Ключові слова: основи процесу, відновлення точності, якість, крупногабаритні зубчасті колеса, методи імітаційного моделювання, параметри поверхневого шару, зношені і відновлювані передачі, продуктивність, експлуатаційні характеристики.

Гасанов М.И. Основы процесса восстановления точности и качества крупногабаритных зубчатых передач с применением методов имитационного моделирования. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2019 г.

Диссертация посвящена решению проблемы повышения технического уровня рабочих машин, его сохранение в течение определенного периода эксплуатации, а также восстановления на этапе ремонта и модернизации является актуальными задачами современного машиностроения.

Эффективность производства в горнодобывающей и перерабатывающей отраслях связана с уровнем развития машин транспортных и энергетических систем, приводы которых включают в себя уникальные крупногабаритные зубчатые передачи диаметром до 8,5 метров и модулем до 65 мм. Горные и транспортные машины работают при высоких нагрузках в экстремальных условиях окружающей среды, абразивный износ и вибрационный характер нагрузки которых приводит к ускоренной потере функциональных параметров зубчатых передач, сокращая сроки эксплуатации приводов. Проблема обеспечения жизненного цикла подобных машин заключается в определении целесообразности изготовления новых деталей привода или восстановление изношенных. Для решения проблемы обеспечения эксплуатационных свойств зубчатых колес с учетом их несущей способности и контактного взаимодействия, которые зависят от состояния поверхностного слоя в целом (макровідхилення, волнистості, шерохватості, фізико-хімічних властивостей), а не только от параметров шерохватості, разработан комплексный подход изучения изменения формы зубов, износа и последующего восстановления крупногабаритных зубчатых колес.

Исследованы и реализованы выборы стратегии ремонта, основанном на метрологической системе контроля параметров состояния поверхностного слоя зубчатых колес, характеризующие их эксплуатационные свойства. Изучены закономерности процессов восстановления функциональных параметров крупномодульных зубчатых колес, как основы комплексного вариационного выбора стратегии ремонта.

Ключевые слова: основы процесса, восстановление точности, качество, крупногабаритные зубчатые колеса, методы имитационного моделирования, параметры поверхностного слоя, изношенные и возобновляемые передачи, производительность, эксплуатационные характеристики

Hasanov M.I. The basics of the process of restoring the accuracy and quality of large gear gears using simulation methods. – Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.03.01 - machining processes, machine tools and tools. – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2019.

The thesis is devoted to solving the problem of increasing the technical level of working machines, its preservation during a certain period of operation, as well as restoration at the stage of repair and modernization is the actual tasks of modern engineering.

Production efficiency in the mining and processing industries is associated with the level of development of transport and energy systems, whose drives include unique large-sized gears with a diameter of 8.5 meters and a module of up to 65 mm. Mining and transport vehicles operate at high loads under extreme environmental conditions, the abrasive wear and vibration nature of which leads to an accelerated loss of the functional parameters of gears, reducing the operating life of the drives. The problem of ensuring the life cycle of such machines is to determine the feasibility of manufacturing new drive parts or restoring worn out ones. To solve the problem of ensuring the operational properties of gears, taking into account their bearing capacity and contact interaction, which depend on the state of the surface layer as a whole (macrodiversity, waviness, roughness, physicochemical properties), and not only on the roughness parameters, an integrated approach to studying changes the shape of teeth, wear and subsequent restoration of large gear wheels.

The selections of the repair strategy based on the metrological system for monitoring the parameters of the state of the surface layer of gear wheels, characterizing their operational properties, are investigated and implemented. The regularities of the processes of restoring the functional parameters of coarse-grained gears as the basis of the complex variational choice of the repair strategy are studied. The analysis of methods for restoring the functional characteristics of coarse-toothed gear and the features of restoring coarse-grained wheels with various methods of processing with the provision of minimal plastic deformations of the teeth of restored coarse-grained gears has been developed. The integrated use of the proposed principles makes it possible to obtain highly productive processes for the processing of cylindrical worn and reconstructed large-sized gear wheels, provided that the

required quality parameters and the accuracy of the surface layer of the gear wheels are provided.

The proposed fundamentals of predicting the structure and parameters of the teeth processing systems of coarse-grained gears after restoring and modeling the parameters of the surface layer in order to reduce fatigue chipping and prevent tooth breakage of the restored large gears. The tasks of modeling the processes of optimal control of the parameters of accuracy, quality and productivity of the gear processing of large-sized gear wheels are proposed to be solved using impact methods, taking into account the specific conditions of formation of gear wheels.

Improved design and organizational optimization of the recovery systems for large-module external gears with the modeling of the internal relationships of the gear processing process for large-module transmissions during their restoration.

The tasks of modeling the processes of optimal control of the parameters of accuracy, quality and productivity of gear processing of worn and renewable large-sized gear wheels are proposed to be solved using impact methods, taking into account the specific conditions of the formation of gear wheels. The developed schemes of multi-criteria optimization of the process of restoring coarse-grained gears and the assessment of the nature of changes in the quality characteristics of gears. The method of selecting and assigning parameters for the process of reconstructing geometry and the physicomechanical properties of open cylindrical coarse-grained gears has been rooted

The modeling of the formation of the surface layer of gears with regard to internal relations, prediction of quality indicators in conjunction with the complex parameter of the state of the surface layer of hardened coarse-grained toothed colostas has been developed. An improved method for assessing the influence of vibrations on the process of forming the surface layer during the gear cutting of worn and renewable large-sized gear wheels.

The process of optimizing the restoration of large-sized precision gear rims and the repair and restoration of large-modulated hardened gears by the method of high-speed blade processing has been developed. To improve the characteristics of the surface layer of the teeth of restored and worn large-sized gear wheels, an improved method of restoring by rolling rollers. To improve the quality of restoration of coarse-grained gears, a spray hardening method has been introduced. The general principles of modeling the optimal control of the parameters of accuracy, quality and productivity of gear processing of restored and worn large-sized gears are performed.

Keywords: process fundamentals, restoration of accuracy, quality, large gears, simulation methods, parameters of the surface layer, worn and renewable gears, productivity, operational characteristics.

Підп. до друку 23.05.2019 р. Формат 60x84 1/16. Папір Сору Рарет.
Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 1,9.
Наклад 100 прим.
