

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Гасанов Магомедмін Ісамагомедовіч

УДК 621.9

ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти
13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ М.І. Гасанов

Науковий консультант:
Ключко Олександр Олександрович,
доктор технічних наук, професор

Краматорськ – 2019

АНОТАЦІЯ

Гасанов М.І. Основи процесу відновлення точності та якості крпногабаритних зубчатих передач із застосуванням методів імітаційного моделювання. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

Об'єкт дослідження – процеси відновлення крупномодульних зубчастих коліс (КЗК).

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

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.

У першому розділі «Аналіз процесу експлуатації крупногабаритних зубчатих передач і пов'язаних з ним проблем відновлення функціональних властивостей» виконан аналіз експлуатації крупногабаритних зубчастих передач і проблеми відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач.

До важко навантажених зубчастих передач відносяться приводи машин, при проектуванні яких висуваються жорсткі вимоги до мінімізації їх габаритів, маси і вартості. Сюди, в першу чергу, відносяться транспортні машини і гірські машини, що працюють в обмеженому просторі. Реалізація цих жорстких вимог призводить до значного зростання удільної силовий навантаженості, а вимога максимізації продуктивності машин призводить до зростання швидкісних характеристик приводу. До цього слід додати

динамічний характер зовнішнього навантаження і значну забрудненість навколишнього середовища дрібнодисперсними речовинами абразивного характеру. Всі перераховані фактори сприяють зниженню надійності машин і їх приводів, габарити і маса яких в основному визначаються параметрами зубчастих передач.

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. В результаті чого змінюються навантажено-кінематичні параметри контакту, які, в свою чергу, інтенсивно змінюють процес зношування і форму профілів зубів по лінії контакту і в поперечному перерізі.

Розглянуті критерії формування структур і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зубчастих коліс, які зношуються і відновлюватимуться.

У другому розділі «Формалізація опису процесу відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач» розроблен аналіз методів відновлення функціональних характеристик крупномодульних зубчастих передач та особливості відновлення крупномодульних коліс різними методами зубообробки з забезпеченням мінімальних пластичних деформацій зубів відновлених крупномодульних зубчастих коліс.

Комплексне використання запропонованих принципів створює можливість отримання високопродуктивних процесів зубообробки циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс за умови забезпечення необхідних параметрів якості і точності поверхневого шару оброблюваних зубчастих коліс.

Удосканелені схеми різання і обладнання для відновлення коліс з

урахуванням жорсткості динамічної верстатної системи і параметрів шорсткості поверхневого шару. Розроблено оснащення для інтенсивної і високоякісної зубообробки з урахуванням впливу параметрів хвилястості на експлуатаційні властивості відновлених крупногабаритних зубчастих коліс та комплексні параметри оцінки довговічності відновлених крупномодульних зубчастих коліс з критеріями формування якісних характеристик поверхневого шару зубів при чистовий зубообробці відновлених крупномодульних коліс.

Науково-обґрунтований підхід, результати теоретичних досліджень формоутворення параметрів стану поверхневого шару циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс при зубофрезеруванні, швидкісному зубофрезеруванні, ППД обробкою накатними конічними роликками, математичний їх опис, експериментальна перевірка дають можливість управляти параметрами стану поверхневого шару в залежності від виду обробки.

У третьому розділі «Математична модель процесу відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач» розроблено основи прогнозування структури і параметрів систем зубообробки крупномодульних зубчастих коліс після відновлення та моделювання параметрів поверхневого шару з метою зниження утомного викришування і запобігання поломки зубів відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

Задачі моделювання процесів оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки крупногабаритних зубчастих коліс пропонується вирішувати методами впливу з урахуванням специфічних умов формоутворення зубчастих коліс.

Аналіз причин виходу з ладу зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс показав, що в 90 % руйнування крупногабаритних зубчастих коліс починається з поверхневого шару через появу мікротріщин, абразивного зносу, викришування активних поверхонь

зубів, відшаровування поверхневого шару зубів, прогресуючого заїдання, пластичних деформацій зубів.

При зубофрезеруванні евольвентної поверхні зубчастого колеса переміщення ріжучого леза інструмента з початкового положення в кінцеве положення під дією керуючих впливів може бути здійснено за різними траєкторіями в рамках техніко-економічних обмежень. Кожній траєкторії відповідає певне значення критерію оптимальності. Геометрія проектованої передачі визначається параметрами початкового контуру інструмента і його зміщеннями при нарізанні коліс передачі. Тому при проектуванні, перш за все, слід задати початковий виробляючий контур інструменту і вибрати розрахункові зміщення. Якщо циліндричне зубчасте колесо нарізається рейковим інструментом, то верстатне зачеплення розглядають в торцевій площині, перпендикулярній осі зубчастого колеса. Таке зачеплення є зачепленням рейкового початкового виробляючого контуру з колесом, що нарізується.

Розроблені загальні вимоги до вибору і призначенню системи параметрів поверхневого шару відновлених крупногабаритних зубчастих коліс та інформаційне моделювання процесів зубообробки. Утворено моделювання забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь відновлених крупногабаритних зубчастих коліс за допомогою системної оптимізації на основі імітаційного моделювання з урахуванням прогресуючих видів зносу.

У четвертому розділі «Методологія процесу відновлення заданих властивостей крупномодульних зубчастих передач» удосконалена конструкторська і організаційна оптимізація систем відновлення крупномодульних зубчастих передач зовнішнього зачеплення з моделюванням внутрішніх взаємозв'язків процесу зубообробки крупномодульних передач при їх відновленні.

Задачі моделювання процесів оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки зношених і відновлюваних

крупногабаритних зубчастих коліс пропонується вирішувати методами впливу з урахуванням специфічних умов формоутворення зубчастих коліс.

При зубофрезеруванні евольвентної поверхні зубчастого колеса переміщення ріжучого леза інструмента з початкового положення в кінцеве положення під дією керуючих впливів може бути здійснено за різними траєкторіями в рамках техніко-економічних обмежень. Кожній траєкторії відповідає певне значення критерію оптимальності. Геометрія проектованої передачі визначається параметрами початкового контуру інструмента і його зміщеннями при нарізанні коліс передачі. Тому при проектуванні насамперед слід задати початковий контур інструменту, що виробляється і вибрати розрахункові зміщення. Якщо циліндричне зубчасте колесо нарізається рейковим інструментом, то верстатне зачеплення розглядають в торцевій площині, перпендикулярній вісі зубчастого колеса.

Розроблені схеми багатокритеріальної оптимізації процесу відновлення крупномодульних зубчастих коліс та оцінка характеру зміни якісних характеристик зубчастої передачі. Розроблена методика вибору і призначення параметрів процесу відновлення геометрії і фізикомеханічних властивостей відкритих циліндричних крупномодульних зубчастих передач.

У п'ятому розділі «Експериментальні дослідження точності і якості процесу зубофрезерування при відновленні зношених крупногабаритних зубчастих коліс» виконано моделювання процесів формоутворення поверхневого шару зубчастих коліс з урахуванням внутрішніх зв'язків, прогнозування показників якості у взаємозв'язку з комплексним параметром стану поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс розроблен критеріальний метод оцінки впливу теплового балансу на продуктивність, точність і якість формування поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс. Удосконалена методика оцінки впливу вібрацій на процес формоутворення поверхневого шару при зубонарізуванні зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс.

У шостому розділі «Інструментальне оснащення при інтенсивній і високоякісній зубообробці відновлених загартованих крупномодульних зубчастих коліс» розроблен процес оптимізації відновлення крупногабаритних зубчастих вінців підвищеної точності та ремонт і відновлення крупномодульних загартованих зубчастих коліс методом високошвидкісної лезової обробки. Для поліпшення характеристик поверхневого шару зубів відновлених і зношених крупногабаритних зубчастих коліс удосконален методо відновлення накатними роликками. Для підвищення якості відновлення крупномодульних зубчастих коліс впроваджен спосіб спреєрного загартування. Виконані загальні принципи моделювання оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки відновлених і зношених крупногабаритних зубчастих коліс.

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. О повышении эффективности процесса алмазного шлифования / Евсюкова Ф.М., Евсюкова О.В., Еникеев А.Ф., Зыков И.С., Шищенко Л.А., Гасанов М.И. // Вестник Национального политехнического университета «ХПИ». – Харьков: №14, 2001. – С. 202–206. (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. (розроблено алгоритм узагальненої моделі технологічного процесу прецизійного алмазного шліфування).

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. (розроблено алгоритм інтеграції процесу алмазного шліфування за критерієм продуктивності).

4. Набока Е.В. Анализ взаимодействия алмазного круга с обрабатываемым материалом / Е.В. Набока, М.И. Гасанов // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПИ», 2003. – № 16. – С. 45–48. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079–004X. (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. (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. (отримано 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. (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. (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. (отримані математичні залежності для узагальненого опису застосування нейронних мереж при керуванні технологічним устаткуванням) (індексується в наукометричних міжнародних базах даних: Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

10. Степанов М.С. Моделирование теплового режима в технологической системе охлаждения шлифовального верстата / М.С. Степанов, М.И. 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. (запропонував математичні залежності для опису температури змащуючої охолоджуючої рідини при шліфуванні) (індексується в наукометричних міжнародних базах даних: Index Copernicus (Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

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. (розроблено концепцію, структуру і принципи створення і функціонування тертя качення і тертя ковзання в зубчастих передачах) (індексується в наукометричних міжнародних базах даних: Index Copernicus)

(Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

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. (запропонована методика виготовлення нежорстких деталей із застосуванням передових CAD / CAM / CAE систем) (індексується в наукометричних міжнародних базах даних: Index Copernicus (Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

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. (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. (виконан аналіз передових технологій в зубообробки конічних коліс з круговими зубами) (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

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. (розроблен регламент вибору параметрів стану поверхневого

шару загартованих зубчастих коліс) (індексується в наукометричних міжнародних базах даних: Index Copernicus (Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

16. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / О.М. Шелковий, О.О. Ключко, М.І. 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. (отримано математичні залежності моделювання геометричних параметрів процесу зубофрезерування) (індексується в наукометричних міжнародних базах даних: Index Copernicus (Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

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. (отримано математичні залежності для забезпечення експлуатаційних властивостей загартованих зубчастих коліс) (індексується в міжнародних базах даних: РІНЦ (eLIBRARY.RU), Ulrich's Periodicals, ВІНІТІ РАН).

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. (розроблено ряд нових схем формоутворення загартованих шевронних зубчастих коліс).

19. Гасанов М.І., 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. – ISSN 2079–004X. (розроблен регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач) (індексується в наукометричних міжнародних базах даних: Index Copernicus (Польща) і Google Scholar; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

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. (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. (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). – Р. 59–70. (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 неперетачиваємими поворотними пластинками) (індексується в наукометричних міжнародних базах даних: DOAJ (Directory of Open Access Journals), Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, OpenAIRE (Open Access Infrastructure for Research in Europe), Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Google Академія, Directory of Open Access scholarly Resources (ROAD), Eurasian Scientific Journal Index (ESJI), General Impact Factor (GIF), Academic Resource Index (ResearchBib), Scientific Indexing Services (SIS)).

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. (індексується в міжнародних базах даних: Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).

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>. (запропонован аналіз надійності досліджуваної конструкції сепаратора) (індексується в міжнародних базах даних: SCOPUS, Scimago, Google Scholar, ProQuest Engineering Collection, E i Compendex).

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>. (виконан аналіз надійності проекрованої конструкції люнета) (індексується в міжнародних базах даних: SCOPUS, Crossref, IndexCopernicus, EBSCO, BazTech, WorldWideScience.org).

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. – ISBN 987–617–7188–3348. (запропонував методи покриття та відновлення контактуючих прецизійних поверхонь) (навчальний посібник).

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. (розроблено методологію наукового дослідження плоского алмазного електроерозійного шліфування).

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. (отримано математичні залежності для узагальненого опису алмазного шліфування за критерієм продуктивності).

33. Гасанов М.И., Новиков Ф.В., Кривошапка 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. (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. ((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. (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. (розроблена математична модель механіки процесу мікрорізання).

38. Стабілізація трибологічного контактування у зубчастих передачах технологічними методами / О.О. Клочко, 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. Клочко, 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. – ISBN 978–966–383–795–6.

40. Пермяков А.А. Анализ погрешностей технологических процессов обработки отверстий с перекрещивающимися и пересекающимися осями корпусных деталей тяжелых токарных станков / А.А. Премьяков, А.А. Клочко, 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. Клочко, 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. Клочко, 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 «ХПІ», 2017. – С. 48–50. – ISBN 978–617–05–0241.

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

ANNOTATION

Hasanov M.I. Establish the process of accuracy and accuracy of large-sized gears based on methods of simulated modeling. - Kvalifikatsiyna naukova pratsya as a manuscript.

The dissertation at the scientific stage of the doctor of technical sciences for specialty 05.03.01 - the process of mechanical processing, by the way, that instrumentation.

The entry was brought about by obuvtuvnya vibration by those dosdzhennya, formed the meta, zavdannya i methods and doslidzhennya. The scientific novelty and practical meaning of the results are described. It has been given information about the approbation of the materials of the dissertation, the publications, the image of the image, the appearance of the specialties of the health service.

In the first section, "Analysis of the process of operation of large-sized gears and related problems of restoring functional properties" analyzes the operation of large-sized gears and the problem of restoring the functional properties of large-modular gears.

The heavily loaded gears include the drives of machines, the design of which imposes strict requirements on minimizing their size, mass and cost. This, first of all, includes transport vehicles and mining machines operating in a limited space. The implementation of these stringent requirements leads to a significant increase in the specific power load, and the requirement to maximize the performance of machines leads to an increase in the speed characteristics of the drive. To this should be added the dynamic nature of the external load and the considerable contamination of the environment with finely dispersed substances of an abrasive nature. All of these factors contribute to reducing the reliability of machines and their drives, the dimensions and mass of which are mainly determined by the parameters of gears.

The durability assessment of large gears on the initial parameters of involute tooth profiles without taking into account the state parameters of the surface layer of gear wheels and the restored large gear crowns is very approximate, does not reflect the fact that the profile shape differs from the initial involute surface due to wear of teeth. As a result, the loaded-kinematic parameters of the contact change, which, in turn, actively change the wear process and the shape of the tooth profiles along the contact line and in cross section.

Perform criteria for the formation of structures and parameters of processing systems that provide the specified performance properties of gear wheels, which wear out and recover.

In another section “Formalization of the description of the process of restoring the functional properties of coarse-grained gears” has developed an analysis of methods for restoring the functional characteristics of coarse-toothed gears and peculiarities of the restoration of coarse-grained wheels by various methods of tooth processing with minimal plastic deformations of the teeth of the restored coarse-modular gears.

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.

Completion of the cutting scheme and equipment for the restoration of the wheels, taking into account the rigidity of the dynamic machine tool and the roughness parameters of the surface layer. Equipment has been developed for intensive and high-quality dental processing taking into account the influence of wavy parameters on the performance properties of restored large gears and complex parameters for assessing the durability of reconstructed large-modular gears with the criteria for the formation of quality characteristics of the surface layer of teeth during finishing *zubrobrobtsi* restored coarse-modular wheels.

A scientifically based approach, the results of theoretical studies of shaping the state parameters of the surface layer of cylindrical worn and restored large

gears during gear milling, high-speed gear milling, PPD processing by rolling knurl tapered rollers, their mathematical description, experimental verification make it possible to control the state parameters of the surface layer depending on the type of treatment.

In the third section, “Formalization of the description of the process of restoring the functional properties of coarse-grained gears” has developed an analysis of methods for restoring the functional characteristics of coarse-toothed gears and peculiarities of the restoration of coarse-grained wheels by various methods of tooth processing with minimal plastic deformations of the teeth of the restored coarse-modular gears.

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.

Completion of the cutting scheme and equipment for the restoration of the wheels, taking into account the rigidity of the dynamic machine tool and the roughness parameters of the surface layer. Equipment has been developed for intensive and high-quality dental processing taking into account the influence of wavy parameters on the performance properties of restored large gears and complex parameters for assessing the durability of reconstructed large-modular gears with the criteria for the formation of quality characteristics of the surface layer of teeth during finishing *zubroobrotsi* restored coarse-modular wheels.

A scientifically based approach, the results of theoretical studies of shaping the state parameters of the surface layer of cylindrical worn and restored large gears during gear milling, high-speed gear milling, PPD processing by rolling knurl tapered rollers, their mathematical description, experimental verification make it possible to control the state parameters of the surface layer depending on the type of treatment.

In the fourth section "The methodology of the process of restoring the specified properties of coarse-grained gears" improved design and organizational

optimization of systems for recovering coarse-grained gears of external gearing with modeling the internal relationships of the tooth processing process of coarse-grained gears during their restoration.

The tasks of modeling the processes of optimal control of the parameters of accuracy, quality and productivity of the 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.

In the case of gear milling of the involute gear surface, the movement of the cutting blade of the tool from the initial position to the final position under the action of control actions can be carried out along different trajectories within the framework of technical and economic limitations. Each trajectory corresponds to a certain value of the optimality criterion. The geometry of the designed gear is determined by the parameters of the initial contour of the instrument and its displacements when cutting the gear wheels. Therefore, when designing, first of all, you should specify the initial contour of the tool products and select the calculated offsets. If the cylindrical gear wheel is cut by a rail tool, then the machine gearing is considered in the end plane perpendicular to the axis of the gear wheel.

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 physico-mechanical properties of open cylindrical coarse-grained gears has been described.

In the fifth section "Eksperimentalni doslidzhennya tochnosti i yakosti Process zubofrezeruvannya at vidnovlenni znoshenih Oversized zubchastih kolis" vikonano modelyuvannya protsesiv formoutvorenniya poverhnevogo ball zubchastih kolis of urahuvanniam vnutrishnih zv'yazkiv, prognozuvannya pokaznikiv yakosti in vzaemozv'yazku of complex parameters will poverhnevogo ball zagartovanih coarse-grained zypchasti kol_sta rozriblelen kterialny method otsinki vplivu heat balance for productiveness, exactness and ikist form over the

top coarse-grained ball zagartovanih zubchastih kolis. The method of calculating the results of the process on the shape of the surface ball in the case of gear and gear and large tooth parts

In the sixth section, "Instrumental equipment for intensive and high-quality forging of restored hardened large-toothed gear wheels", a process of optimization of the reconstruction of large-sized gears of high precision and the repair and restoration of large-modular hardened gear wheels by the method of high-speed blade processing has been developed. To improve the characteristics of the surface layer of teeth of restored and worn large-sized gear wheels, the method of recovery with roller rollers has been improved. In order to improve the quality of restoration of large-modular gear wheels, a spray-quenching method is introduced. The general principles of modeling of optimal control of the parameters of accuracy, quality and productivity of the rational treatment of restored and worn large-sized gear wheels have been fulfilled.

Key words: base process, precision, accuracy, large-size gear wheels, modulation model, parametrized ball, interfacing and productivity, productivity, performance.

REFERENCES

1. O povyishenii effektivnosti protsessa almaznogo shlifovaniya / Evsyukova F.M., Evsyukova O.V., Enikeev A.F., Zyikov I.S., Shishenko L.A., Gasanov M.I. // Vestnik Natsionalnogo politehnicheskogo universiteta «HPI». – Harkov: #14, 2001. – S. 202–206.
2. Analiz obobschennoy modeli tehnologicheskogo protsessa pretsizionnogo almaznogo shlifovaniya / Evsyukova F.M., Enikeev A.F., Zyikov I.S., Shishenko L.A., Gasanov M.I. // Vestnik inzhenernoy akademii. – K.: #3, 2001. – S. 585–592.
3. Optimizatsiya protsessa almaznogo shlifovaniya po kriteriyu proizvoditelnosti / Evsyukova F.M., Enikeev A.F., Gasanov M.I., Zyikov I.S., Shishenko L.A. // Vestnik NTU «HPI». – Harkov: # 9, 2002. T. 10 – S. 52–56.

4. Naboka E.V. Analiz vzaimodeystviya almaznogo kruga s obrabatyivaemyim materialom / E.V. Naboka, M.I. Gasanov // Visnik NTU «HPI». SerIya: TehnologIYi u mashinobuduvanni. – HarkIv : NTU «HPI», 2003. – # 16. – S. 45–48. – Bibliogr.: 4 nazv. – ISSN 2079–004H.
5. Novikov F.V. Usloviya snizheniya energoemkosti i povyisheniya proizvoditelnosti obrabotki pri almaznom shlifovanii tverdyyih splavov / F.V. Novikov, M.I. Gasanov // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. – Harkov: NTU «HPI», 2004. – Vyip.67. S. 57–64.
6. Novikov F.V. Fizicheskie zakonomernosti protsessa rezaniya pri almaznom shlifovanii / F.V. Novikov, M.I. Gasanov // Visnik HarkIvskogo derzhavnogo tehnIchnogo unIversitetu sIlskogo gospodarstva. – «TehnIchniy servIs APK, tehnIka ta tehnologIYi u sIlskogospodarskomu mashinobuduvanni». – 2004. – Vip. 26. – S. 31–40.
7. Novikov F.V. Proizvoditelnost i kachestvo obrabotki pri almaznom shlifovanii tverdyyih splavov s uvelichennyimi glubinami rezaniya / F.V. Novikov M.I. Gasanov // Visnik HarkIvskogo natsIonalnogo tehnIchnogo unIversitetu sIlskogo gospodarstva. – «TehnIchniy servIs APK, tehnIka ta tehnologIYi u sIlskogospodarskomu mashinobuduvanni». – 2005. – Vip. 33. – S. 23–26.
8. Gasanov M.I. Opredelenie usloviy povyisheniya effektivnosti protsessa shlifovaniya / M.I. Gasanov, V.V. Nezhebovskiy, A.V. Chernenko // Visnik NatsIonalnogo tehnIchnogo unIversitetu «HPI» – HarkIv, 2008. – # 22. S. 8–12.
9. Gasanov M.I. Do pitannya zastosuvannya neyronnih merezh pri keruvanni tehnologIchnim ustatkuvannyam / M.I. Gasanov, O.Yu. Prihodko, S.E. SIIpchenko // Visnik NatsIonalnogo tehnIchnogo unIversitetu «HPI» – HarkIv, 2010. – # 24. S. 26–32.
10. Stepanov M.S. Modelyuvannya teplovogo rezhimu v tehnologIchnIy sistemI oholodzhennya shIlfuvalnogo verstatu / M.S. Stepanov, M.I. Gasanov, I.V. VoloshkIna // Visnik Nats. tehn. un-tu «HPI» : zb. nauk. pr. Temat. vip. : Matematichne modelyuvannya v tehnItsI ta tehnologIyah. – HarkIv : NTU «HPI». – 2014. – # 6 (1049). – S. 185–191.

11. Klochko A.A. Tehnologicheskoe obespechenie treniya kacheniya i treniya skolzheniya v zubchatyih peredachah / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova // Visnik NTU «HPI». SerIya: TehnologIYi v mashinobuduvanni. – H.: NTU «HPI», 2015. – # 40 (1149). S. 102–107.
12. Opyit sozdaniya sovremennyih tehnologiy izgotovleniya nezhestkih detaley s primeneniem peredovyih CAD/CAM/CAE sistem / S.S. Dobrotvorskiy, E.V. Basova, M.I. Gasanov, R.V. Golovatyiy, S.A. Gakov, S.S. Gnuchih // Visnik NTU «HPI». ZbIrnik naukovih prats. Tematichniy vipusk: TehnologIYi v mashinobuduvanni – HarkIv: NTU «HPI», 2015. – #. 4(1113). – S. 37–40.
13. Litvinov V.M. Tehnologicheskie osobennosti spreernoy zakalki krupnogabaritnyih zubchatyih koles v tyazhelom mashinostroenii / V.M. Litvinov, E.V. Mironenko, A.N. Shelkovoy, M.I. Gasanov, A.A. Klochko // Nadezhnost instrumenta i optimizatsiya tehnologicheskikh sistem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2016. – Vyip. 38. – S. 51–59.
14. Dobrotvorskiy S.S. Perspektivy primeneniya peredovyih tehnologiy v zuboobrabotke konicheskikh koles s krugovyimi zubyami / S.S. Dobrotvorskiy, E.V. Basova, A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.E. Tonkoshkur // Avtomatizirovannyye tehnologi i proizvodstva. – 2016. – # 2 (12). – S. 10–14.
15. Klochko A.A., Gasanov M.I., Basova E.V. Reglament vyibora i naznacheniya parametrov sostoyaniya poverhnostnogo sloya zakalennyih zubchatyih koles. Visnik NTU «HPI». SerIya: TehnologIYi u mashinobuduvanni. – HarkIv: NTU «HPI», 2016. – # 33 (1205). – S. 145–157. – Bibliogr.: 7 nazv. – ISSN 2079–004H.
16. Funktsionalnyie aspektyi imitatsionnogo matematicheskogo modelirovaniya geometricheskikh parametrov protsessa zubofrezerovaniya / O.M. Shelkoviy, O.O. Klochko, M.I. Gasanov, D.O. Kravchenko, O.O. Antsiferova // Visnik NTU «HPI». SerIya: TehnologIYi u mashinobuduvanni. – HarkIv : NTU «HPI», 2017. – # 26 (1248). – S. 66–74.
17. Shelkovoy A.N. Obespechenie ekspluatatsionnyih svoystv zakalennyih zubchatyih koles / A.N. Shelkovoy, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Vestnik

sovremennyih tehnologiy: sb. nauch. tr. – Sevastopol : FGAOU VO «Sevastopolskiy gosudarstvennyiy universitet», 2017. – Vyip. 8. – S. 61–70.

18. Issledovanie protsessov zubofrezerovaniya zakalennyih shevronnyih zubchatyih koles / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova, S.Yu. Palashek, A.L. Nevmerzhitskiy // NadlynIst Instrumentu ta optimIzatsIya tehnologIchnih sistem: zb. nauk. pr. – Kramatorsk : DDMA, 2017. – Vip. 40. – S. 90–101.

19. Gasanov M.I., Klochko O.O., Zakovorotniy O.Yu., PermInov E.V. TehnologIchniy reglament optimIzatsIYi sistem vIdnovlennya funktsIonalnih vlastivostey velikogabaritnih vIdkritih zubchatih peredach // VIsnik NatsIonalnogo tehnIchnogo unIversitetu «HPI». SerIya: TehnologIYi v mashinobuduvanni – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Techniques in a machine industry: zb. nauk. pr. / NatsIonalniy tehnIchniy unIversitet «HarkIvskiy polltehnIchniy Institut». – HarkIv : NTU «HPI», 2018. – # 6 (1282) 2018. – S. 107–112.

20. Gasanov M.I., Klochko A.A., Cherkashina G.I., Perminov E.I. Gruppyvie marshrutnyie tehnologicheskie protsessyi vosstanovleniya krupnogabaritnyih zubchatyih koles na osnove imitatsionogo modelirovaniya s uchetom progressiruyuschih vidov iznosa // NadlynIst Instrumentu ta optimIzatsIya tehnologIchnih sistem: zb.nauk. pr. – Kramatorsk : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 28–36.

21. Shapovalov V.F., Pechenyiy V.I., Klochko A.A., Permyakov A.A., Shelkovoy A.N., Gasanov M.I., Antsyiferova O.A. Povyishenie kachestva poverhnostnogo sloya zubev iznoshennyih i vosstanavlivaemyih krupnogabaritnyih zubchatyih koles poverhnostnyim plasticheskim deformirovaniem // NadlynIst Instrumentu ta optimIzatsIya tehnologIchnih sistem: zb.nauk. pr. – Kramatorsk : DDMA, 2018. – Vip. 42. – S. 91–102.

22. Shapovalov V., Klochko A., Gasanov M., Antsyiferova 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). – R. 59–70.

23. Gasanov M.I. Tverdosplavnyie chervyachnyie frezyi poslealmaznoy zatochki dlya vosstanovleniya krupnogabaritnykh zubchatykh kolez. Rezirovaniye i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemakh // Mezhdunarodnyiy nauchno-tekhnicheskiiy sbornik / redkol.: A.I. Grabchenko (otv. red.). – Harkov : NTU «HPI», 2018. – Vyip. 88. – S. 32–42. (Indeksuetsiya v mIzhnarodnykh bazakh danih: Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)).
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>.
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>. (
26. Pat. na vinahId 114964 UA, MPK V60K 23/02, F16D 13/38. PristrIy dlya keruvannya dvopotokovoyu muftoyu zcheplennya transportnogo zasobu / S.A. Mikolayovich, M.E. SergIEnko, O.I. HudolIy, M.A. Tkachuk, M.I. Gasanov, N.M. Pavlova, O.O. Tkachenko. – # a2015 10416; zayavl. 26.10.2015; opubl. 28.08.2017, Byul. # 16. – 4 s. : il.
27. Pat. na izobretenie 2622438 RU, MPK V60K 23/02. Ustroystvo upravleniya dvuhpotochnoy muftoy stsepleniya transportnogo sredstva / A.N. Sergienko, N.E. Sergienko, A.I. HudolIy, N.A. Tkachuk, M.I. Gasanov, N.N. Sergienko. – # 2015141398; zayavl. 29.09.2015; opubl. 15.06.2017, Byul. # 17. – 4 s. : il.
28. Pat. na vinahId UkraYini #117049, B60K 17/348, B60S 23/00, B60G 17/0195, B60G 17/04. Transportniy zasIb/ SergIEnko M.E.,SergIEnko A.M., HudolIy O.I., Gasanov M.I., Tkachuk M.A., MedvedEv M.G.,Pavlova N.M. Zayavka a2016 08218. Zayavl. 25.07.2016. Opubl. 11.06.2018, Byul. #11.
29. Pat. na korisnu model u 2018 02191 UA, MPK F16H 5i9/04 (2016.01). SposIb zabezpechennya kontaktuvannya zubIv veduchoYi shesternI z zubami vedenogo koleza / V.D. Kovalov, O.O. Klochko, D.O. Kravchenko, O.M. Shelkoviy, O.A.

Permyakov, M.I. Gasanov, A.O. SkorkIn, O.L. Kondratyuk. Zayavka u2018 02191. Zayavl. 02.03.2018. Opubl. 10.10.2018, Byul. #19.

30. Stepanov M.S. Vvedenie v sovremennuyu tehnologiyu turbo i gidromashinostroeniya: ucheb. posob. / M.S. Stepanov, M.I. Gas 31. Gasanov M.I. Issledovanie ploskogo almaznogo elektroerozionnogo shlifovaniya izdeliy iz tverdyih splavov / M.I. Gasanov // Trudy Gosud. Aerokosmicheskogo univ. im. N.E. Zhukovskogo. «Aviatsionno – kosmicheskaya tehnika i tehnologiya» – Harkov: GAU «HAI», 2000. Vyip. 14. S. 343–345.

32. Statischeckaya optimizatsiya protsessa almaznogo shlifovaniya po kriteriyu proizvoditelnosti / Evsyukova F.M., Enikeev A.F., Zyikov I.S., Shishenko L.A., Gasanov M.I. // V sbornike «InformatsIynI tehnologIYi: nauka, tehnIka, tehnologIya, osvIta, zdorov`ya». – Harkov: Chast 2, 2002. – S. 230–236.

33. Gasanov M.I., Novikov F.V., Krivoshapka Yu.N., Tkachenko V.P., Novikov G.V., Ditinenko S.A. Povyishenie proizvoditelnosti almaznogo shlifovaniya izdeliy iz tverdyih splavov // InformatsIynI tehnologIYi: nauka, tehnIka, tehnologIya, osvIta, zdorov`ya: AnotatsIYi dopovIdey mIzhnarodnoYi naukovotehnIchnoYi konferentsIYi 16–17 travnya 2002 r., HarkIv. – S. 94.

anov // – H.: OOO «Schedraya usadba plyus». – 2014. – 460 s. – ISBN 987–617–7188–3348.

34. Gasanov M.I. Povyishenie effektivnosti protsessa kruglogo vnutrennego almaznogo shlifovaniya tverdospIavnyih vstavok / M.I. Gasanov, F.V. Novikov // Fizicheskie i kompyuternye tehnologii: trudy 13 Mezhdunarodnoy nauchnotehnicheskoy konferentsii, 19–20 aprelya 2007 g., Harkov. – Harkov: HNPk «FED», 2007.

35. Novikov F.V. Razrabotka modulya imitatsionnogo modelirovaniya tehnologicheskoy sistemy «mnogotselevoy sistemy – stanok s ChPU» / F.V. Novikov, M.I. Gasanov, V.V. Frolov // VIsnik NatsIonalnogo tehnIchnogo unIversitetu «HPI» – HarkIv, 2007. – # 17. S. 105–111.

36. Gasanov M.I. Opredelenie tehnologicheskikh vozmozhnostey almaznogo shlifovaniya tverdospIavnyih izdeliy / M.I. Gasanov, V.V. Nezhebovskiy //

Fizicheskie i kompyuternye tehnologii: trudy 14 Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, 24–25 sentyabrya 2008 g., Harkov. – Harkov: HNPK «FED», 2008.

37. Novikov F.V., Gasanov M.I. Matematicheskaya model mehaniki protsessa mikrorezaniya pri almaznom shlifovanii // Fizicheskie i kompyuternye tehnologii: Trudy 15-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, 2–3 dekabrya 2009 g., Harkov. – Harkov: HNPK «FED», 2009.

38. Stabillizatsiya tribologichnogo kontaktuvannya u zubchastih peredach tehnologichnimi metodami / O.O. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova, D.O. Kravchenko // Zbirnik naukovih prats. Progresivni tehnologiyi v mashinobuduvanni: Tezi dokladiv V VseukraYinskoYi naukovo-tehnichnoYi konferentsiyi, 8–12 lyutogo 2016 r. – Natsionalniy unIversitet «LvIvska polItehnIka». – LvIv, 2016. – S. 50–51.

39. Osobennosti ekspluatatsii abrazivnyih krugov pri zuboshlifovanii / F.V. Novikov, A.A. Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Basova, A.N. Lishenko // Fizicheskie i kompyuternye tehnologii. Trudy 22-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 7–9 dekabrya 2016 g., Harkov. – D.: Lira, 2016. –S. 110–112. – ISBN 978–966–383–795–6.

40. Permyakov A.A. Analiz pogreshnostey tehnologicheskikh protsessov obrabotki otverstiy s perekreschivayuschimisya i peresekayuschimisya osyami korpusnyih detaley tyazhelyih tokarnyih stankov / A.A. Premyakov, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Obladnannya I tehnologiyi suchasnogo mashinobuduvannya: materIali VseukraYinkoYi naukovo praktichnoYi konferentsiyi, UkraYina, m.TernopIl, 11–12 travnya 2017 r. TernopIl: TernopIlskiy natsionalniy tehnIchniy unIversitet ImenI Ivana Pulyuya, 2017. – S. 188.

41. Tsilindricheskie zubchatyie peredach s nenyutonovskim sostoyaniem rabochey zhidkosti / V.D. Kovalev, A.A. Klochko, D.A. Kravchenko, M.I. Gasanov // Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku: materialy HV Mizhnarodniy naukovo-praktichniy konferentsiyi, 30 travnya –1 chervnya 2017 r. / Pid zag. red. V.D. Kovalova. – Kramatorsk : DDMA, 2017. – S. 40.

42. Reglament vyibora i naznacheniya parametrov obrabotki pri skorostnom lezviynom zubofrezerovanii / N.S. Ravskaya, A.A. Ohrimenko, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // XVIII Mizhnarodna naukovo-tehnlchna konferentsIya «Progresivna tehnlka, tehnologIya ta Inzhenerna osvIta», 29 chervnya – 01 lipnya 2017 r., NatsIonalniy tehnlchniy unIversitet UkraYini «KiYivskiy poliItehnlchniy Institut ImenI Igorya Sikorskogo». – KiYiv: NTUU «KPI», 2017. – T. 4. – S. 350–353.
43. Permyakov A.A. Ekonomiya elektroenergii i eYo normirovanie v mehanoobrabotke / A.A. Permyakov, M.I. Gasanov, V.I. Gorbulik // VseukraYinska naukova konferentsIya «Rozvitok prikladnoYi nauki, osvIti ta studentskogo samovryaduvannya na BukovinI» (26–27 travnya 2017 p., m.ChernIvtsI) : materIali konferentsIYi – HarkIv: NTU «HPI», 2017. – S. 48–50. – ISBN 978–617–05–0241.
44. Klochko A.A. Novyye sposobyi vyisokoskorostnoy obrabotki zakalennyih tsilindricheskikh zubchatyih koles abrazivnyim instrumentom / A.A. Klochko, M.I. Gasanov, O.A. Antsyiferova // Informatika, upravlnnnya ta shtuchniy Intelekt. MaterIali IV mIzhnarodnoYi naukovo-tehnlchnoYi konferentsIYi studentIv, magIstrIv ta aspIrantIv. – HarkIv: NTU «HPI», 2017. – S. 54–55.
45. Pogreshnosti tehnologicheskikh protsessov obrabotki otverstiy korpusnyih detaley tyazhelyih tokarnyih stankov s ChPU / A.A. Permyakov, A.N. Shelkovoy, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // MaterIali mIzhnarodnoYi naukovo-praktichnoYi konferentsIYi «Suchasnl tehnologIYi promislovogo kompleksu». Vipusk 3. – Herson: HNTU, 2017. – S. 32–33.
46. Tribologicheskyy metod vyibora tehnologicheskogo reglamenta pri skorostnom lezviynom zubofrezerovanii / N.S. Ravskaya, A.A. Ohrimenko, A.A. Klochko, M.I. Gasanov // Trudy XXVII mezhdunarodnoy konferentsii «Novyye tehnologii v mashinostroenii» (3–8 sentyabrya 2017 g., Koblevo). – Harkov: NAKU «HAI». – 2017. – S. 19–20.
47. Tehnologicheskoe osobennosti obespecheniya tochnosti izgotovleniya korpusov krupnogabaritnyih reduktorov / A.A. Permyakov, A.N. Shelkovoy, A.A.

Klochko, M.I. Gasanov, E.V. Naboka // *Novyye i netraditsionnyye tehnologii v resurso- i energosberezhenii: Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, 20–22 sentyabrya 2017 g., Harkov. – Odessa: ONPU, 2017. – S. 108–109.

48. Aktualnost differentsirovannogo i kompleksnogo prognozirovaniya v usloviyah imitatsionnogo modelirovaniya tehnologicheskogo obespecheniya ekspluatatsionnykh svoystv krupnomodulnykh zubchatykh koles / A.A. Permyakov, A.N. Shelkovoy, A.A. Klochko, A.A. Ohrimenko, M.I. Gasanov // *Zbİrnik naukovih prats. Progresivni tehnologiyi v mashinobuduvanni: Tezi dokladiv VII VseukraYinskoYi naukovo-tehnIchnoYi konferentsiyi*, 5–9 lyutogo 2018 r. – Natsİonalniy unİversitet «Lvİvska polİtehnİka». – Lvİv, 2018. – S. 127–129.

49. Gasanov M.I. Optimizatsiya tehnologicheskogo protsessa vosstanovleniya krupnomodulnykh zubchatykh koles // *Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materiali MizhnarodnoYi naukovo-tehnIchnoYi konferentsiyi 29 – 31 travnya 2018 roku* / Pid zag. red. V.D. Kovalova. – Kramatorsk: DDMA, 2018. – S. 17.

50. Gasanov M.I., Shelkoviy O.M., Klochko O.O., Antsiferova O.O. Imitatsionnoe modelirovanie tehnologicheskikh protsessov vosstanovleniya krupnogabaritnykh zubchatykh koles s uchetom progressiruyuschih vidov iznosa // *Vazhke mashinobuduvannya. Problemi ta perspektivi rozvitku. Materiali MizhnarodnoYi naukovo-tehnIchnoYi konferentsiyi 29–31 travnya 2018 roku* / Pid zag. red. V.D. Kovalova. – Kramatorsk: DDMA, 2018. – S. 18.

51. Permyakov A.A., Klochko A.A., Gasanov M.I. Matematicheskaya model sinteza tehnologicheskogo reglamenta vosstanovleniya funktsionalnykh svoystv krupnomodulnykh zubchatykh peredach. *XIİH Mizhnarodna naukovo-tehnIchna konferentsIya „Progresivna tehnİka, tehnologIya ta Inzhenerna osvİta”*, 29 chervnya

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, вимірювання, скорочень	
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. Аналіз процесу експлуатації крупногабаритних зубчатих передач і пов'язаних з ним проблем відновлення функціональних властивостей	16
1.1 Функціональний аналіз експлуатації крупногабаритних зубчастих передач і проблеми їх відновлення	16
1.2 Аналіз літературних даних з проблеми відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач	24
1.2.1 Методи відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач	35
1.2.2 Критерії формування структур і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зубчастих коліс, які зношуються і відновлюватимуться	46
Висновки, мета і задачі	55
РОЗДІЛ 2. Формалізація опису процесу відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач	58
2.1 Аналіз методів відновлення функціональних характеристик крупномодульних зубчастих передач	59
2.1.1 Особливості відновлення крупномодульних коліс різними методами зубообробки	67
2.1.2 Методи забезпечення мінімальних пластичних деформацій зубів відновлених крупномодульних зубчастих коліс	70
2.1.3 Аналіз схем різання і обладнання для відновлення коліс з урахуванням жорсткості динамічної верстатної системи і параметрів шорсткості поверхневого шару	74
2.2 Організаційні і технічні обмеження, що накладаються на область формування математичної моделі розрахунків при формуванні регламенту відновлення функціональних характеристик крупномодульних зубчастих	77

передач	
2.2.1 Оснащення для інтенсивної і високоякісної зубообробки з урахуванням впливу параметрів хвилястості на експлуатаційні властивості відновлених крупногабаритних зубчастих коліс	77
2.2.2 Вибір критеріїв оцінки методів відновлення функціональних характеристик крупномодульних зубчастих передач при теоретичному визначенні ступеня зміцнення циліндричних зубчастих коліс	85
2.2.3 Комплексні параметри оцінки довговічності відновлених крупномодульних зубчастих коліс	94
2.2.4 Комплексні параметри оцінки стану поверхонь відновлених крупномодульних зубчастих коліс	99
2.2.5 Критерії формування якісних характеристик поверхневого шару зубів при чистовий зубообробці відновлених крупномодульних коліс	104
Висновки	106
РОЗДІЛ 3. Математична імітаційна модель процесу відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач....	108
3.1 Математична модель прогнозування структури і параметрів систем зубообробки крупномодульних зубчастих коліс після відновлення	108
3.1.1 Моделювання параметрів поверхневого шару з метою зниження утомного викришування і запобігання поломки зубів відновлених крупногабаритних зубчастих коліс	117
3.1.2 Математична модель параметрів поверхневого шару з метою зниження пластичних деформацій і абразивного зносу відновлених крупногабаритних зубчастих коліс	122
3.1.3 Математичне моделювання достовірності виникнення заїдання зубів шляхом формування технологічних параметрів поверхневого шару крупногабаритних зубчастих коліс після відновлення	129
3.1.4 Загальні вимоги до вибору і призначенню системи параметрів поверхневого шару відновлених крупногабаритних зубчастих коліс	132
3.2 Інформаційне моделювання процесів зубообробки відновлених	

крупномодульних зубчастих коліс	136
3.3 Моделювання забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь відновлених крупногабаритних зубчастих коліс за допомогою системної оптимізації	139
3.4 Процеси відновлення крупногабаритних зубчастих коліс на основі імітаційного моделювання з урахуванням прогресуючих видів зносу	142
Висновки	150
РОЗДІЛ 4. Методологія процесу відновлення заданих властивостей крупномодульних зубчастих передач	151
4.1 Конструкторська і організаційна оптимізація систем відновлення крупномодульних зубчастих передач зовнішнього зачеплення	151
4.1.1 Моделювання внутрішніх взаємозв'язків процесу зубообробки крупномодульних передач при їх відновленні	157
4.1.2 Области оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки відновлених крупномодульних зубчастих коліс	162
4.1.3 Схема багатокритеріальній оптимізації процесу відновлення крупномодульних зубчастих коліс після наплавки	169
4.2 Оцінка характеру зміни якісних характеристик зубчастої передачі в результаті відновлення зношених крупногабаритних зубчастих коліс	174
4.3 Методика вибору і призначення параметрів процесу відновлення геометрії і фізикомеханічних властивостей відкритих циліндричних крупномодульних зубчастих передач	178
4.4 Вибір і призначення системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості	189
Висновки	196
РОЗДІЛ 5. Експериментальні дослідження точності і якості процесу зубофрезерування при відновленні зношених крупногабаритних зубчастих коліс	198

5.1 Моделювання процесів формоутворення поверхневого шару зубчастих коліс з урахуванням внутрішніх зв'язків	198
5.2 Модель прогнозування показників якості у взаємозв'язку з комплексним параметром стану поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс	205
5.3 Критеріальний метод оцінки впливу теплового балансу на продуктивність, точність і якість формування поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс	221
5.4 Методика оцінки впливу вібрацій на процес формоутворення поверхневого шару при зубонарізуванні зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс	232
Висновки	242
РОЗДІЛ 6. Інструментальне оснащення при інтенсивній і високоякісній зубообробці відновлених загартованих крупномодульних зубчастих коліс	244
6.1 Оптимізація відновлення крупногабаритних зубчастих вінців підвищеної точності	244
6.2 Ремонт і відновлення крупномодульних загартованих зубчастих коліс методом високошвидкісної лезової обробки	259
6.3 Поліпшення характеристик поверхневого шару зубів відновлених і зношених крупногабаритних зубчастих коліс методом відновлення накатними роликками	270
6.4 Особливості підвищення якості відновлення крупномодульних зубчастих коліс спреєрним загартуванням	276
6.5 Загальні принципи моделювання оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки відновлених і зношених крупногабаритних зубчастих коліс	285
Висновки	295
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	297
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	299
ДОДАТКИ	335

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ, СКОРОЧЕНЬ

f – коефіцієнт тертя;

F_n – сила ти, н;

HB – твердість;

I_h – інтенсивність зношування (безрозмірна характеристика, що представляє собою похідну глибини зносу по шляху ковзання, яка визначається розрахунковим шляхом або експериментально);

$I_{h_{1,2}}$ – інтенсивність зношування;

σ_H – контактне напруження в розглянутій точці лінії зачеплення (МПа);

$v_{ков}$ – швидкість ковзання (м/сек);

$v_{ty_{1,2}}$ – швидкості переміщення точки контакту (м/сек);

$n_{1,2}$ – частота обертання (об/мин);

$T_{1,2}$ – час роботи передачі (рік);

K_1, K_2 – критерії зносу зубів шестерні і колеса;

ЭС – експлуатаційні властивості

КПП – комплексний параметр рівноважного стану поверхонь тертя

СХ – комплексний параметр в умовах тертя і зносу

П – комплексний параметр в умовах реверсивного виконання

Д – комплексний параметр в умовах циклічного навантаження

Н – комплексний параметр при підвищеній шорсткості зубів

H_{max} – максимальна висота макроотклоненія, мкм

H_p – висота згладжування макроотклоненія, мкм

Wa – середнє арифметичне відхилення профілю волнистости, мкм

W_p – висота згладжування профілю волнистости, мкм

W_z – висота хвилястості по десяти точках, мкм

S_{mw} – середній крок волнистости, мкм

Ra – середнє арифметичне відхилення профілю, мкм

- R_p – відстань від лінії виступів до середньої лінії, мкм
 R_{max} – найбільша висота нерівностей профілю, мкм
 R_z – висота нерівностей профілю по десяти точках, мкм
 tm – відносна опорна довжина нерівностей на рівні середньої лінії, %
 Sm – середній крок нерівностей, мкм
 S – середній крок нерівностей по вершинах локальних виступів, мкм
 tr – відносна опорна довжина профілю на рівні p , %
 $H\mu_0$ – поверхнева мікротвердість, МПа
 σ_0 – величина залишкових напруг на поверхні, МПа
 σ_t – напруга плинності, МПа
 $hH\mu$ – глибина залягання зміцненого шару, мм
 $h\sigma_0$ – глибина залягання залишкових напруг поверхні, мм
 j_{TCC} – жорсткість технологічної верстатної системи, Н/мм
 $\Psi_{ск}$ – кут ковзання, град
 Ψ_{max} – найбільший кут контакту зуба фрези при зубофрезерування, град
 I – інтенсивність зносу зубчастих коліс
 V – швидкість різання, м/с
 S_m – хвилинна подача, мм/хв
 S_z – подача на зуб, мм/зуб
 t – глибина різання, мм
 ρ – радіус округлення різальної крайки фрези, мм
 a_i – товщина шару, що зрізається, мм
 φ – кут профілю зуба фрези в нормальному перетині, град
 P_z, P_x, P_y – складові сили різання, Н
 $\sigma_B, \sigma_{сж}, \sigma_u$ – межа міцності при розтягуванні, стисненні, вигині, Мпа

СКОРОЧЕННЯ

- КЗК – крупногабаритное зубчасте колесо;
 КЗП – крупногабаритна зубчаста передача;
 ДСС – динамическая станочная система;
 МОР – мастильно-охлаждувальна рідина;

ВСТУП

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 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 крупногабаритних зубчастих коліс.

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 (2019-2020рр.) «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 функціональний аналіз процесу експлуатації крупногабаритних зубчастих коліс і пов'язаними з ними проблем відновлення функціональних властивостей за даними літературних джерел з проблеми

ремонту крупногабаритних зубчастих коліс, сформулювати критерії формування структури і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зношених крупногабаритних зубчастих коліс, і оцінити ефективність існуючих методів відновлення.

2. На основі аналізу методів відновлення функціональних властивостей крупногабаритних зубчастих коліс, організаційних і технічних обмежень, що накладаються на область формування математичної моделі регламенту відновлення функціональних характеристик крупногабаритних зубчастих коліс, 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 крупногабаритних зубчастих коліс у вигляді інформаційних, організаційних та функціональних моделей системи обробки.

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

5. Здійснити експериментальну перевірку математичних моделей і методик проектування при відновленні крупногабаритних зубчастих коліс.

6. Розробити технологічне і інструментальне оснащення процесів високоефективної обробки загартованих крупногабаритних зубчастих коліс.

Об'єкт дослідження – процеси відновлення крупномодульних зубчастих коліс.

Предмет дослідження – закономірності процесів відновлення функціональних властивостей крупногабаритних зубчастих коліс 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 крупногабаритних зубчастих коліс, вимог до важконавантажених і відповідальних зубчастих передач вперше сформульовані і реалізовані принципи відновлення функціональних властивостей крупногабаритних зубчастих коліс 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 крупногабаритних зубчастих коліс і на їх основі розроблено методику систематизації дефектів і методів їх усунення;

– розроблено методологію відновлення крупногабаритних зубчастих коліс 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 471 сторінках друкованого тексту, складається зі анотації двома мовами, вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 287 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 34 таблицями та 106 рисунками. Список використаних джерел містить 284 найменування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КРУПНОГАБАРИТНИХ ЗУБЧАТИХ ПЕРЕДАЧ І ПОВ'ЯЗАНИХ З НИМ ПРОБЛЕМ ВІДНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

1.1 Функціональний аналіз експлуатації крупногабаритних зубчастих передач і проблеми їх відновлення

До важко навантажених зубчастих передач відносяться приводи машин, при проектуванні яких висуваються жорсткі вимоги до мінімізації їх габаритів, маси і вартості. Сюди, в першу чергу, відносяться транспортні машини і гірські машини, що працюють в обмеженому просторі. Реалізація цих жорстких вимог призводить до значного зростання удільної силовий навантаженості, а вимога максимізації продуктивності машин призводить до зростання швидкісних характеристик приводу. До цього слід додати динамічний характер зовнішнього навантаження і значну забрудненість навколишнього середовища дрібнодисперсними речовинами абразивного характеру [1, 17, 21, 40]. Всі перераховані фактори сприяють зниженню надійності машин і їх приводів, габарити і маса яких в основному визначаються параметрами зубчастих передач.

Рішення такого завдання в значній мірі визначається рівнем оснащення при інтенсивній і високоякісній обробці відповідальних крупногабаритних зубчастих коліс і зубчастих вінців діаметром до 15000 мм, модулем від 12 мм до 65 мм, рудорозмельних млинів типу ММС 70 23 (рис. 1.1), роторних дробарок СМД 75а, поворотних платформ екскаваторів, крокуючих екскаваторів, підйомних шахтних машин (рис. 1.2), прокатних станів, сталеливарних розливних машин, важконавантажених редукторів.



Рисунок 1.1 – Рудорозмельний млин типу MMC 70 23

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 1.2 – Приклади шахтних підйомних машин типу МПБ з одним циліндровим нерозрізаним барабаном виробництва ЧАО «НКМЗ», важкі екскаватори та редуктори

Велика частина важконавантажених машин: гірські, транспортні, металургійні, шахтні працюють при високих навантаженнях і в умовах значного запилення навколишнього середовища і, в тому числі, з використанням відкритих крупномодульних зубчастих передач. Важкі умови роботи, динамічний, вібраційний характер навантаження цих машин знижують міцність і час експлуатації зубчастих передач і їх приводів [3, 41, 46, 50]. Основні види зносу визначаються виходячи з умов експлуатації крупногабаритних зубчастих коліс, режимів навантаження, матеріалу виготовлених коліс, твердістю і станом поверхневого шару зубів коліс, наявності мастила, характеру зачеплення з урахуванням приробляння всіх зубів (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – 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. 1.3).

$$F_{тер} = F_n \cdot f, \quad (1.1)$$

де f – коефіцієнт тертя.

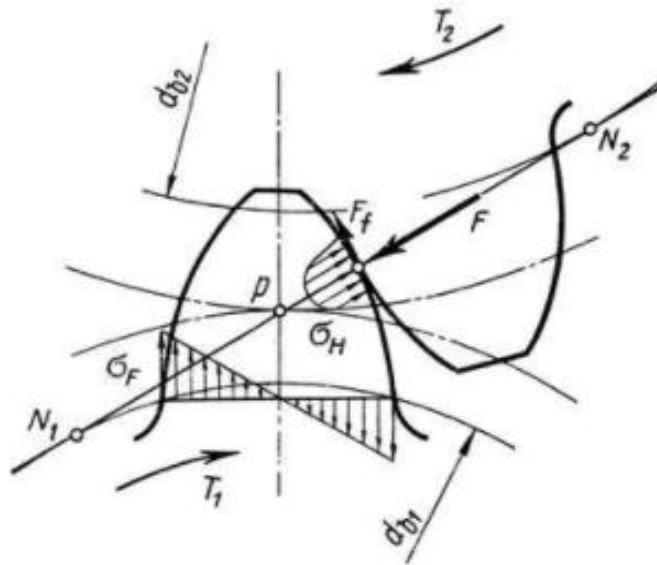


Рисунок 1.3 – Схема розподілу сил в момент зачеплення

Приймають, що сила F_n спрямована по нормалі до їх профілів.

Під дією сили F_n і $F_{тер}$ зуби знаходяться в складному напруженому стані. Виникають напруги вигину σ_F в поперечних перетинах зубів і контактні напруги σ_n в поверхневих шарах зубів. Обидві ці напруги, які змінні в часі, і є причиною втомного руйнування зубів або їх робочих поверхонь. Час дії σ_F і σ_n 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.

Втомне викришування (рис. 1.4) від контактних напружень є основним видом руйнування поверхні зубів при мастилi передачі. Зуби розділені тонким шаром масла, яке усуває металевий контакт. При цьому знос зубів малий. Передача працює тривалий час до появи втоми в поверхневих шарах зубів. На поверхні з'являються невеликі поглиблення, що нагадують оспинки, які потім ростуть і перетворюються в раковини. Викришування починається поблизу полюсної лінії на ніжках зубів там, де навантаження передається однією парою зубів, а ковзання і перекочування зубів спрямовані так, що масло запресовується в тріщини і сприяє викришуванню. При цьому порушуються умови утворення масляної плівки, з'являється металевий контакт з наступним швидким зносом або задиром поверхні. У відкритих передачах викришування не спостерігається, тому що поверхневі шари стираються раніше, ніж з'являються тріщини втоми. Основні заходи попередження викришування: підвищення твердості матеріалу шляхом термообробки, підвищення ступеня точності виготовлення зубчастих коліс

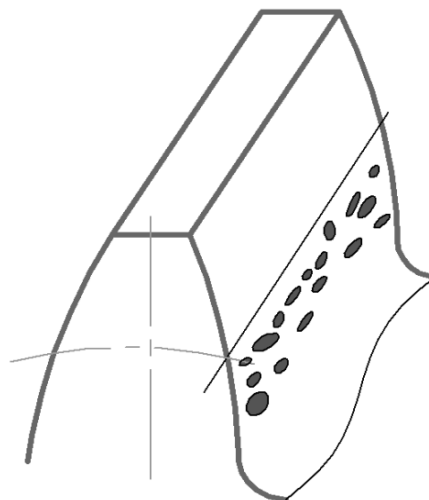


Рисунок 1.4 – Втомне викришування

Абразивний знос (рис. 1.5) є основним видом руйнування зубчастих передач при поганій мастилі [40, 48, 51, 53, 56, 57, 59]. Сюди відносять відкриті передачі, а також закриті, але недостатньо захищені від забруднення абразивними частинками. У зношеній передачі збільшуються зазори в зачепленні, з'являється шум. Зростають динамічні навантаження. Міцність зуба знижується в слідстві зменшення його поперечного перерізу. Це призводить до поломки зубів. Основні заходи попередження зносу, це:

- підвищення твердості і чистоти поверхні зубів;
- захист від абразивних часток;
- застосування масел з хімічно активними домішками.

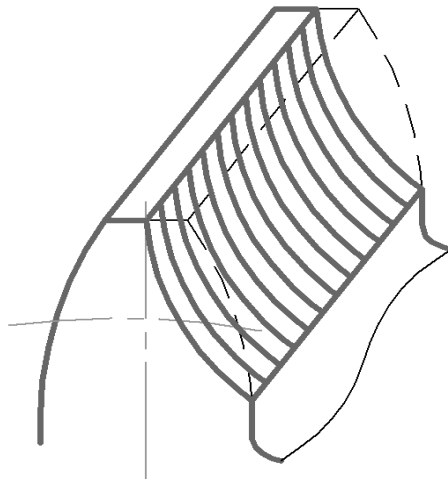


Рисунок 1.5 – Абразивний знос

Заїдання (рис. 1.6) спостерігається переважно у високонавантажених і високошвидкісних передачах. У місці контакту зубів передач розвивається висока температура, що сприяє розриву масляної плівки і утворення металевих контактів. Тут відбувається як би зварювання часток металу з подальшим відривом їх від однієї з поверхонь. Нарости, що утворилися, задирають робочі поверхні зубів в напрямку ковзання.

Заходи попередження заїдання ті ж, що і проти зносу: інтенсивне охолодження мастила, застосування спеціальних протизадирних масел.

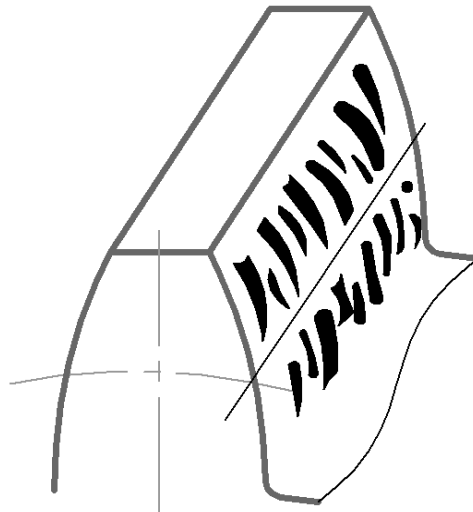


Рисунок 1.6 – Зайдання

Пластичні зрушення (деформації) спостерігаються у важконавантажених тихохідних зубчастих коліс, виконаних з м'якої сталі. При навантаженнях на м'якій поверхні зубів з'являються пластичні деформації з наступним зсувом в напрямку ковзання. У полюсній лінії зубів веденого колеса утворюється хребет, а у ведучого – відповідна канавка. Утворення хребта порушує правильність зачеплення і призводить до руйнування зубів. Пластичні зрушення можна усунути підвищенням твердості матеріалу зубів.

Злам зуба (рис. 1.7) викликаний напругами вигину, які також мають отнульовий (пульсуючий) характер. Злам обумовлений об'ємною міцністю зубів. Для попередження зламу проводиться розрахунок зуба по напруженням вигину. Такий розрахунок для закритих передач виконується в якості перевірного після розрахунку на контактні напруги. Для відкритих передач, де висока ймовірність випадкових перевантажень, цей розрахунок виконується як проектний.

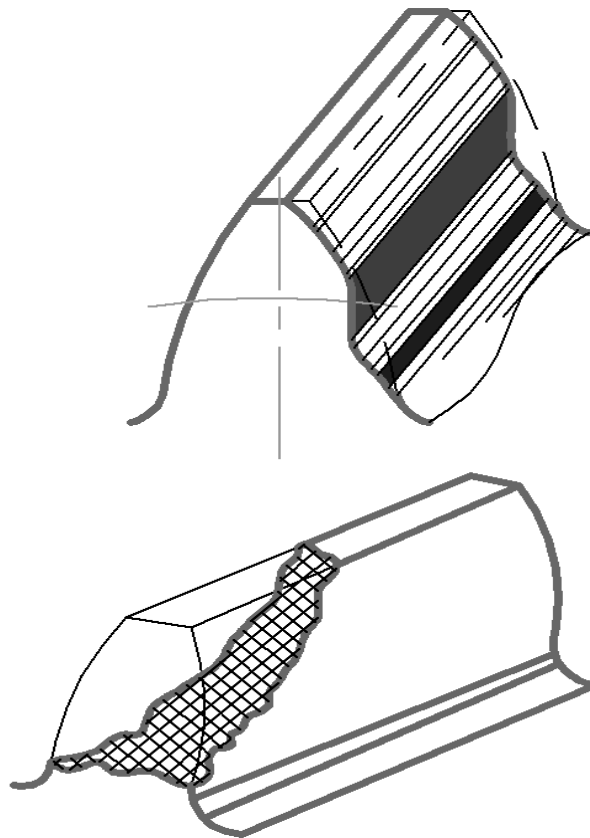


Рисунок 1.7 – Злам зуба

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. В результаті чого змінюються навантажено-кінематичні параметри контакту, які, в свою чергу, інтенсивно змінюють процес зношування і форму профілів зубів по лінії контакту і в поперечному перерізі [16, 19, 26, 27, 28, 43].

Загальна імітаційна модель формування та прогнозування інтермітентції в результаті зносу форми робочої поверхні зубів спрямована на розробку засобів диференційованого і комплексного забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь крупномодульних зубчастих коліс

за допомогою системної оптимізації та дозволяє науково обґрунтувати зміни якісних характеристик крупногабаритних зубчастих передач в залежності від часу їх експлуатації, є актуальною і відповідає вимогам науково-технічного прогресу сучасного машинобудування.

Новий підхід прогнозування похибок механічної обробки зубчастих коліс, що базується на принципах суперпозиції, векторному характері складових похибки і методі статистичного математичного моделювання ґрунтується на методі Монте – Карло.

Відмінністю реального формоутворення від номінального (ідеального) є наявність відхилень параметрів стану поверхневого шару крупногабаритних зубчастих коліс реальних профілів від номінальних. Основними кінцевими задачами, які повинні бути вирішені при дослідженні закономірностей реального формоутворення, є задачі імітаційного моделювання прогнозування з заданою вірогідністю похибок, які виникають, а також задачі управління, в тому числі оптимального, цими похибками.

1.2 Аналіз літературних даних з проблеми відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач

Аналіз механізмів формування похибок крупногабаритних зубчастих коліс свідчить про те, що елементарні похибки систем операцій зубообробки характеризуються випадковими числовими характеристиками, які визначають величину і характер входження у відповідні комплексні складові, які, в свою чергу, взаємодіючи між собою, визначають досліджувані похибки крупногабаритних зубчастих коліс [14, 22, 24, 44, 64, 72, 73].

У зв'язку з тим, що досліджувані похибки обробки виникають в результаті впливу ряду випадкових факторів, характеристики яких, в залежності від рівня складності структурної будови похибок, є величинами або функціями, що носять випадковий характер прояви, їх визначення можливо з використанням методів теорії ймовірностей.

Сучасні тенденції розвитку машинобудування призводять до ще більшого посилення вимог до параметрів якості передач при їх проектуванні внаслідок:

- збільшення об'ємних і контактних напружень при значній нерівномірності їх розподілу;
- збільшення швидкостей ковзання і температур внаслідок зростання продуктивності машин;
- підвищення ймовірності відмов через ускладнення конструкцій машин і збільшення економічних втрат за час усунення відмов (втрачена вигода);
- розширення області експлуатації машин (агресивні середовища, вакуум, вібрація, різні види випромінювань, що вимагають нових підходів до оцінки працездатності і нових критеріїв граничних станів).

Підвищення довговічності приводів машин є одним з найважливіших (поряд з підвищенням продуктивності і зниженням собівартості) вимог до проектування машин, яке в значній мірі забезпечується за рахунок збільшення ресурсу основних деталей приводу і, в першу чергу, за рахунок підвищення зносостійкості їх контактних поверхонь. При цьому слід мати на увазі, що забезпечення високої зносостійкості (особливо вищих кінематичних пар, наприклад, зубчастих коліс) необхідно не тільки, щоб запобігти поломки через зменшення робочого перетину деталей внаслідок їх зносу, а й для зменшення впливу зносу на параметри якості машин – рівень шуму, точність позиціонування робототехнічних систем, точність виготовленої продукції (прокатні стани) і т.д. [15, 23, 42, 52, 58, 60, 63].

Несуча здатність і зносостійкість зубчастих передач приводу визначається рівнем конструктивних рішень щодо забезпечення оптимальних умов роботи передач, якістю їх виготовлення і ступенем відповідності умов експлуатації режимів, прийнятих при їх проектуванні.

Конструктивні рішення щодо забезпечення необхідної несучої здатності зубів зубчастих передач зазвичай базуються на виконанні умов

запобігання двох основних видів пошкоджень – поломок зубів (статичних і втомних) і контактного утомного викришування (піттінг) робочих поверхонь.

Методи розрахунку згинальної і контактної витривалості досить добре розроблені, пройшли багаторічну експлуатаційну перевірку і є основними методами розрахунку зубчастих передач на міцність, що знайшло своє відображення в стандартах Міжнародного Комітету по Нормалізації ISO/DIS 6336 / III (згинальна витривалість) і ISO/DIS (контактна витривалість), а також в стандарті ГОСТ 21354-87 [2, 8. 11, 47, 61, 71, 129].

Зносостійкість визначається як властивість матеріалу чинити опір зношуванню в певних умовах тертя. Відповідно, зношування являє собою процес поступової зміни розмірів тіла при терті, що виявляється у відділенні з поверхні тертя матеріалу і (або) його залишкової деформації [9, 25, 45, 62].

У зубчастих передачах важконавантажених машин має місце граничне тертя кочення з проковзуванням. При цьому основним видом зношування є абразивно-втомне механічне зношування, а в разі настання заїдання – молекулярно-механічне.

Абразивно-втомне механічне зношування (надалі – зношування) призводить до поступової зміни форми і розмірів тіл, що труться. Незважаючи на чіткість таких поширених понять, як тертя, зношування і зносостійкість, визначення чисельних значень цих величин для конкретних умов експлуатації представляє значні труднощі. Це пояснюється складністю фізичних, хімічних і механічних явищ, що мають місце в зоні контакту тіл, і величезною кількістю факторів, що взаємно впливають, і визначають кінцевий результат зношування.

Складність і неоднозначність чисельної оцінки процесу зношування підтверджується великою кількістю публікацій, присвячених цій темі. Так, наприклад, в роботі [69] наводиться бібліографічний список робіт по темі розрахунків на тертя і знос, що нараховує 737 найменувань. Найбільш чіткий, системний підхід до розробки методів розрахунку на знос надано Ю.М.Дроздовим в роботі [57].

Однак труднощі отримання інформації про чисельні значення трибологічних факторів і їх зміни в конкретній контактній зоні не дозволяють реалізувати підхід Дроздова в інженерних розрахунках зносостійкості контактних поверхонь. Так, наприклад, в роботі [80] навіть стверджується, що довговічність знов проектованої передачі, схильної до не втомних руйнувань, можна оцінити в якійсь мірі лише на підставі досвіду експлуатації аналогічних передач, що працюють в умовах, близьких до тих, в яких буде працювати проектована.

При всьому різноманітті розрахункових залежностей з оцінки зносостійкості фрикційного контакту існує порівняно небагато формул, що дозволяють безпосередньо обчислити товщину зношеного шару поверхонь, що труться.

Перша спроба пов'язати знос з механічними властивостями матеріалів належить Топну, яким встановлено лінійну залежність відносини зносу поверхонь, що труться (зразок / еталон) і твердістю матеріалу [109]. Пізніше Хольм [265], пояснюючи знос атомарною взаємодією двох поверхонь, запропонував наступну залежність між зносом і параметрами контакту:

$$\omega = z \cdot \frac{P}{HB}, \quad (1.2)$$

де ω – кількість зношеного матеріалу, що припадає на одиницю шляху ковзання;

z – ймовірність видалення атома з поверхні зразка при зустрічі його з контртілом;

P – навантаження;

HB – твердість.

За Арчадом [108] знос ω на одиницю шляху в функції навантаження і механічних властивостей матеріалів визначається наступною залежністю:

$$\omega = k \cdot \frac{P}{3\sigma_S}, \quad (1.3)$$

де k – коефіцієнт пропорційності ($k = 10^{-2}$ – 10^{-7}), що представляє собою ймовірність відділення частинки зносу з плями контакту;

σ_S – межа текучості.

Недосконалість цих формул є очевидною, бо вони не відображають впливу багатьох параметрів контакту на зносостійкість матеріалів. Реальна внутрішня структура матеріалів, що труться, структура їх поверхонь, структурні і фазові перетворення, що виникають при роботі деталей, в наведених формулах не враховуються.

Дроздовим Ю.М. розроблена порівняно проста схема розрахунку зносу поверхонь зубів зубчастих коліс, що дозволяє враховувати значну кількість факторів, що впливають на знос [57].

$$h = I_h \cdot S, \quad (1.4)$$

де h – товщина зношеного шару;

I_h – інтенсивність зношування (безрозмірна характеристика, що представляє собою похідну глибини зносу по шляху ковзання, яка визначається розрахунковим шляхом або експериментально);

S – шлях тертя ковзання.

Стосовно до розрахунку зносу зубів важконавантажених зубчастих передач формула (1.4) перетворюється до наступного вигляду:

$$h_{1,2} = 0,135 \cdot 10^{-6} \cdot I_{h_{1,2}} \cdot \sigma_H \cdot \frac{v_{ков}}{v_{\Omega_{1,2}}} \cdot n_{1,2} \cdot i_{1,2} \cdot T_{1,2}, \quad (1.5)$$

де $I_{h_{1,2}}$ – інтенсивність зношування;

σ_H – контактне напруження в розглянутій точці лінії зачеплення (МПа);

$v_{ков}$ – швидкість ковзання (м/сек);

$v_{ty,1,2}$ – швидкості переміщення точки контакту (м/сек);

$n_{1,2}$ – частота обертання (об/мин);

$i_{1,2}$ – кількість зубчастих коліс, які зачіпляються з розглядуваним;

$T_{1,2}$ – час роботи передачі (год).

Необхідно відзначити, що індекси 1 і 2 у формулі (1.5) відносяться, відповідно, до відстаючої (ніжка) і випереджаючої (головка) контактних поверхонь зубів.

Інтенсивність зношування I_h залежить від великої кількості факторів: фізичних, хімічних і механічних властивостей самого матеріалу, характеристик мастила, агресивності середовища, умов навантаження, температури, топографії контактуючих поверхонь і ін. [110, 221, 222, 226]. Тому теоретичний розрахунок цієї величини вельми скрутний і виходить задовільним тільки в деяких випадках, в зв'язку з чим Дроздов Ю.М. рекомендує використовувати експериментально визначену інтенсивність зношування в режимах тертя, максимально близьким до умов роботи реальної передачі [57].

Однак результати експериментів по оцінці зносостійкості загартованих зубчастих коліс одного класу (модуль 1,5–4 мм), які наведені Алісінім В.В в роботі [94, 96, 99, 100], показали великий розкид значень інтенсивності зношування: від $I_h = 5,1 \cdot 10^{-10}$ до $I_h = 3000 \cdot 10^{-10}$. Причому інтенсивність зношування зубів ведених зубчастих коліс на порядок більше інтенсивності зношування зубів ведучих коліс. Таким чином можна говорити про передчасність широкого застосування розглянутої методики розрахунку зубів на знос.

Як критерій, якому в першому наближенні пропорційна питома інтенсивність зношування Чудаков Є.О. запропонував використовувати питому потужність, затрачену на подолання тертя контактних поверхонь [235].

$$K = f \cdot \sigma_H \cdot v_{ков} , \quad (1.6)$$

де K – критерій зносу ($\text{Вт}/\text{мм}^2$);

f – коефіцієнт тертя.

Аналогічний критерій пропонували [104, 106, 113, 117, 125]. У число основних факторів, що впливають на знос, Крагельський І.В. [109] включив співмножники, що входять в формулу (1.6), що побічно може служити доказом (при показнику кривої утомного зносу $t = 1$) правомірності запропонованого критерію зносу. Залежність об'ємного зносу від роботи сил тертя була також використана при розробці енергетичної теорії зносу [209, 212, 218]. Положення про пропорційність величини зносу роботі сил тертя для розрахунку зносу машин застосовувалося і іншими дослідниками [4, 138, 245, 246, 250, 252, 257].

На базі критерію зносу (1.6) була розроблена методика розрахунку на знос зубів зубчастих коліс, перевірена експериментально для умов роботи важконавантажених приводів машин [69, 75, 77].

В основу цієї методики було покладено припущення, що критерій зносу K пропорційний до сумарного зносу контактуючих тіл, бо фактори, що впливають на знос, є загальними для цих тіл. Але оскільки при однаковій швидкості ковзання $v_{ков}$ шляхи, проходимої точкою контакту по профілям, які зачіпляються, різні, отже, різним буде і знос контактуючих в даній точці зубів зубчастих коліс. Прийнято, що критерій зносу (відповідно і знос) для контактуючих зубів буде прямо пропорційний питомому ковзанню.

$$\left. \begin{aligned} K_1 + K_2 &= K \\ \frac{K_1}{K_2} &= \frac{g_1}{g_2} \end{aligned} \right\} , \quad (1.7)$$

де K_1, K_2 – критерії зносу зубів шестерні і колеса;

$$\left. \begin{aligned} g_1 &= \frac{v_{ty1} - v_{ty2}}{v_{ty1}} \\ g_2 &= \frac{v_{ty1} - v_{ty2}}{v_{ty2}} \end{aligned} \right\} \text{ – питомі ковзання зубів шестерні і колеса;}$$

v_{ty1} – швидкість переміщення зони контакту за профілем зуба шестерні;

v_{ty2} – швидкість переміщення зони контакту за профілем зуба колеса.

Після нескладних перетворень значення критеріїв зносу для шестерні і колеса будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{f \cdot \sigma_H \cdot v_{ков}}{1 + \frac{v_{ty1}}{u \cdot v_{ty1}}} \\ K_2 &= K_1 \cdot \frac{v_{ty1}}{u \cdot v_{ty2}} \end{aligned} \right\}, \quad (1.8)$$

де u – передатне число зубчастої передачі.

Введення в формули (1.8) передатного числа враховує, в першому наближенні, факт більшої частоти фрикційного навантаження поверхні зуба шестерні в порівнянні з поверхнею зуба колеса [79, 85, 87, 119, 140, 147, 255, 262, 271].

Для переходу від критеріїв зносу до чисельних значень зносу в контактних точках зубчастих передач використовувалися результати вимірювання зносу в виробничих умовах, на підставі яких визначалася емпірична функція питомої інтенсивності зношування від значень критерію зносу:

$$i_h = i_h(K). \quad (1.9)$$

Такий підхід дозволяє досить надійно розраховувати на знос зуби зубчастих передач, що працюють в умовах аналогічних тим, для яких була знайдена функція (1.9).

Особливе місце в проблемі зносостійкості зубчастих передач належить заїданню – тобто процесу виникнення і розвитку пошкоджень поверхні тертя внаслідок захоплення і перенесення матеріалу. Залежно від умов тертя заїдання поверхонь не носить катастрофічного характеру і може навіть припинитися («холодне заїдання»), але в екстремальних умовах тертя (при високому рівні температур, навантажень, швидкостей ковзання, наявності агресивних середовищ) процес заїдання контактуючих поверхонь супроводжується утворенням глибоких борозен, виривів, рисок, наростів, оплавлень («гаряче заїдання»). В останньому випадку процес заїдання часто характеризується катастрофічним зношуванням сполучених пар і може привести до повного виходу механізму з ладу в результаті припинення відносного руху в контакт. «Гаряче заїдання» (далі – заїдання) є найнебезпечнішим видом ушкоджень зубів зубчастих коліс [156, 159, 162, 256, 263, 266].

У момент виникнення заїдання зазвичай різко збільшується коефіцієнт тертя ковзання, зростає температура, активізуються динамічні процеси, підвищується вібраційна і акустична активність. На процес заїдання істотний вплив має навантаження, швидкості ковзання та кочення, шорсткість контактуючих поверхонь, матеріал тіл, температура, фізико-хімічні характеристики мастильного матеріалу і навколишнього середовища, вид і якість присадок до основного масла, спосіб змазування і інші фактори.

Виникненню заїдання сприяє збільшення швидкості ковзання і зменшення швидкості кочення. З ростом швидкості ковзання зростає потужність тертя і зменшується товщина мастильного шару внаслідок тепла в контактні робочих тіл, що виділяється і підвищення контактної температури. Збільшення навантаження в контакт сприяє виникненню задиру і руйнування контактних поверхонь.

Для розрахунків на заїдання запропоновано досить багато критеріїв. Найбільш відомими серед них є: критерії Олмена [41, 103, 112, 114, 264], Олмена–Штрауба [205, 217], Петрусевича А.І. [186], Дроздова Ю.М. [59].

Найбільш теоретично обґрунтованим і який пройшов широку експериментальну перевірку в лабораторних умовах є температурний критерій Блоку, заснований на гіпотезі існування критичної температури руйнування масляної плівки, яка є характерною для кожної комбінації матеріалів і масла. Температура в контакті визначається як сума поверхневої температури тіл t_0 перед входом в контакт і миттєвого підвищення температури в контакті в процесі тертя тіл – температурного спалаху θ . Температура t_0 визначається експериментально або розраховується з теплового балансу вузла зубчастої передачі. Температурний спалах для циліндричних тіл, що котяться з ковзанням, знаходиться за формулою Блоку [46, 105]:

$$\theta = \frac{0,83 \cdot f \cdot q \cdot v_{ков}}{\left(\sqrt{\lambda_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot v_{ty1}} + \sqrt{\lambda_2 \cdot \rho_2 \cdot c_2 \cdot v_{ty2}} \right) \cdot \sqrt{bH}}, \quad (1.10)$$

де f – коефіцієнт тертя в контакті;

q – навантаження на одиницю довжини контакту;

λ_1, λ_2 – теплопровідності матеріалів поверхонь;

ρ_1, ρ_2 – щільності матеріалів поверхонь;

c_1, c_2 – питомі теплоємності матеріалів;

v_{ty1}, v_{ty2} – швидкості переміщення зони контакту по профілях зубів;

bH – напівширина герцовської полоски контакту.

Умова відсутності заїдання є нерівність:

$$t_0 + \theta \leq t_s, \quad (1.11)$$

де t_s – сумарна критична температура, при якій відбувається заїдання поверхонь.

На основі температурного критерію Блоку розроблено стандарт ISO/DIS6336/IV для розрахунку на запобігання заїдання контактних

поверхонь зубів. Однак при використанні температурного критерію виникає питання про абсолютні значення t_s і їх інваріантності до зміни основних факторів при терті. Спеціальні дослідження і аналіз експериментальних даних свідчать про непостійність сумарної критичної температури [120, 121, 154, 280]. Тому вдосконалення фізичних моделей, які закладаються в критерії розрахунку на заїдання, триває.

Врахування дискретності контакту в рішенні температурній задачі дозволив поглибити розуміння процесу заїдання і пояснити причинність основних експериментальних факторів. Так, наприклад, на підставі експериментально встановленої, близькою до лінійної, залежності критичного значення температурного спалаху θ_s при заїдання від максимального контактного тиску, Дроздов Ю.М. запропонував дещо інший критеріальний підхід до розрахунку на заїдання [59]. Після приведення цього критерію до більш наочного вигляду умова відсутності заїдання може бути представлена в такий спосіб:

$$\theta \leq \theta_s. \quad (1.12)$$

У свою чергу, критичне значення температурного спалаху визначається за формулою:

$$\theta_s = c_\rho \cdot V_{50^\circ\text{C}}^{0,06} \cdot \sqrt{q}, \quad (1.13)$$

де c_ρ – коефіцієнт, що враховує властивості мастильного масла ($c_\rho = 2,0$ [27]);

$V_{50^\circ\text{C}}$ – кінематична в'язкість масла, (мм²/сек) при 50 °С;

q – погонне навантаження, (н/мм).

Результати експериментального визначення навантаження заїдання, виконані автором цієї дисертаційної роботи для умов експлуатації важконавантажених гірських машин, дозволили уточнити значення коефіцієнта:

- для нелегованих масел – $c_p = 1,7$;
- для масел, легованих протизадирними присадками – $c_p = 2,2$ [53].

Заслужують на увагу уточнений критерій Дроздова Ю.М. для розрахунку на заїдання по граничній товщині мастильного шару [59] і механотермотимчасовій критерій заїдання Журкова С.М. [217].

Проте розрахунки на заїдання не є достатньо надійними і в конструкторській практиці майже не застосовуються (в ГОСТ 21354-87 цей вид розрахунку взагалі не передбачений).

1.2.1 Методи відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач

Неодноразово робилися спроби розробки процесів відновлення зубчастих коліс приводу рудорозмельних млинів. Причиною цього є відносно малий термін служби коліс, які працюють в агресивно абразивному середовищі, висока вартість і трудомісткість їх виготовлення. Теоретично, при такому великому числі зубів (200–220), зношені колеса можна «перенарізати» з негативним зміщенням інструменту не отримавши підрізу зуба [97, 98, 111, 115]. Однак, враховуючи, що при реальній роботі з урахуванням реверсу зуб зношується значно і по обидва боки, зміщення повинно складати близько 40 мм, що неприпустимо зменшить переріз і міцність основи вінця. Відновлення зубів наплавленням під шаром флюсу нетехнологічно через малу довжину наплавлюваних валиків і необхідності після накладання кожного валика ретельної зачистки його від шлаку. Застосування електрошлакового наплавлення зубів з використанням мундштука, що плавиться, за свідченням самих розробників процесів для крупногабаритних коліс проблематично через їх суттєву деформацію. Запропоновано наплавляти зношені зуби в середовищі вуглекислого газу з наступною механічною обробкою. За фактом вінцеві колеса виготовляють з литої середньовуглецевої сталі з вмістом вуглецю (0,4–0,5) %. При такому

вмісті вуглецю через швидке нагрівання і охолодження і неомогенності аустеніту в зоні термічного впливу при накладенні першого валика можлива поява гартівних структур з високою твердістю і низькою пластичністю. При накладенні наступних валиків температура нагріву цієї зони не вище критичної, тому перекристалізації не відбувається, а ефект відпустки проявляється слабо. Дослідження мікроструктури і мікротвердості в процесі експериментального підбору режиму наплавлення підтвердило, що при неоптимальних режимах в зоні термічного впливу можуть з'являтися ділянки товщиною до 0,3 мм і довжиною до 5 мм з твердістю понад 300–500 НВ. Режим наплавлення першого валика і час накладання наступного підбирався так, щоб появу гартівних структур виключити. Забезпечити цю умову можна, якщо перед накладенням другого валика температура ділянки зони термічного впливу поруч з лінією сплаву не буде нижчою температури початку мартенситного перетворення. Нагрівання подальшими валиками забезпечить розпад аустеніту з утворенням феррито-перлітної структури. Наплавлення виробляли напівавтоматом А-537 з джерелом живлення ВДУ-505. Використовувався дріт СВ 08Г2С діаметром 1,6 мм. Режим наплавлення: напруга 26 В; зварювальний струм (250–300) А; швидкість наплавлення близько 230 м/год. Після наплавлення зуби обробляли переносним верстатом, встановлюваному на колесі. За даною процесів було відновлено двадцять дев'ять зубчастих коліс кульових млинів діаметром більше чотирьох метрів. Експлуатація показала, що термін служби відновлених коліс в умовах реального виробництва того ж порядку такий же самий, що і нових.

Термін служби швидкозношуваних деталей визначає рентабельність багатьох машин, які дорого коштують. Часті зупинки обладнання для заміни поламаних деталей новими, призводять до значного зниження продуктивності праці, якості продукції, порушують ритмічність процесу виробництва, викликають невиробничі витрати металу на виготовлення змінних деталей, створюють необхідність в утриманні спеціальних

ремонтних бригад, істотно ускладнюють, а іноді і зовсім виключають можливість механізації і автоматизації виробництва [132, 143, 200, 211, 224, 237]. Все це є причиною колосальних втрат, які несе народне господарство. Сучасні тенденції інтенсифікації виробничих процесів, збільшення робочих тисків, швидкостей, температури призводять до прискорення зношування деталей і, в поєднанні з необхідністю автоматизації виробництва, роблять проблему підвищення довговічності швидкозношуваних вузлів машин ще більш гострою. Основна частка деталей в складі спряжень з іншими деталями досягає граничного стану через зношування. В результаті цього процесу відбуваються руйнування матеріалу, відділення його від поверхні твердого тіла і накопичення його залишкової деформації при терті. Зазначені явища призводять до поступової зміни розмірів і форми деталі. Процеси відновлення деталей і вузлів відносяться до ресурсозберігаючих, тому що в порівнянні з виготовленням нових деталей значно скорочуються витрати на матеріали при виготовленні, зменшується число операцій, знижуються витрати на верстатне обладнання, пристосування, ріжучий і вимірювальний інструмент, оплату праці робітників і ін. Встановлено, що зубчасті колеса при роботі зазнають циклічні і динамічні навантаження, що призводять до руйнування робочих поверхонь. Відомо, що плавна робота зубчастої передачі може бути забезпечена тільки при постійному передатному відношенні, але через похибки виготовлення і похибок, пов'язаних з експлуатацією (наприклад, деформацією зубів), величина передатного числа в кожен момент часу не залишається постійною. Причому негативний вплив роблять додаткові динамічні навантаження – удари. Деформація зубчастих коліс, а так само похибки виготовлення призводять до нерівномірності розподілу навантаження по ширині 2-го зубчастого вінця. При застосуванні навантаження за рахунок деформації деталей осі зубчастих коліс повертаються, утворюючи кут перекосу. В результаті цього рівномірність розподілу навантаження по ширині зубчастого вінця порушується,

інтенсивність руйнувань збільшується з ростом величини напружень в місці зіткнення зубів.

До основних факторів втрати працездатності зубів відносяться [116, 118, 172, 190, 206]:

- поломка зубів внаслідок перевантажень, що виникають при перекосі осей або неточності виготовлення;
- лущення і втомне викришування робочої поверхні зубів, причинами появи яких є втома робочих поверхонь зубів через багаторазове механічне перенапруження металу в зоні початкових кіл, а так само, наприклад, зниженої в'язкості масла;
- заїдання (задір) робочих поверхонь зубів, поступовий знос, який відбувається при попаданні металевих і абразивних частинок, а так само при малій в'язкості масла і недостатньої твердості зубів;
- зношування зубів по товщині і довжині, а також зношування посадочних місць, шліцьових отворів і шпонкових канавок;
- тріщини на ступицях, що виникають в більшості випадків в результаті перевантаження шестерень при порушенні вимог експлуатації машини;
- завал зубів на бік в результаті пластичних деформацій.

Відновлення шестерень в основному проводиться за двома технологіями: виготовлення зубів і ремонт наплавленням зношеної частини профілю зуба.

Зношені зуби відновлюють наступними способами:

- заміна частини деталі (наприклад, при ремонті блоків шестерень).
- При цьому способі перед відновленням зубчасте колесо отжигують для полегшення механічної обробки, зуби колеса обточують, на обточений обід колеса напресовують заготовку вінця, зварюванням з'єднують її по всій торцевій поверхні, обточують до необхідних розмірів, нарізають зуби під заданий розмір і проводять загартування. У випадках, коли кількість зубів, що підлягають ремонту, не більше 8 % від загального їх числа, за місцем попередньо видаленого зуба ввертають і заварюють шпильки або на місці

видаленого зуба обробляють паз, в який вставляють шип, закріплений шпилькою і зварюванням, і обробляють під заданий розмір начерно і начисто. Якщо зубчасте колесо має тонкий обід, застосовують сталеві башмаки з траверсою у вигляді обробленого під заданий розмір зуба або паза. Башмак прикріплюють до обода колеса з торців гвинтами;

- наплавленням можна відновлювати сильно зношені зубчасті колеса, при цьому забезпечується також отримання нових властивостей поверхонь: корозійної, ерозійної, кавітаційної, зносостійкості та ін. Покриття, отримані наплавленням, характеризуються відсутністю пор, високими значеннями модуля пружності і міцності на розрив. Міцність з'єднання цих покриттів з основою співрозмірна з міцністю матеріалу деталі. Способи наплавлення ділять на групи в залежності від видів застосовуваних джерел тепла, характеру легування і способу захисту формованого покриття від впливу кисню та азоту повітря. Найбільшого поширення в ремонті машин отримало електродугове наплавлення, яке дає можливість отримувати шари з високою продуктивністю практично будь-якої товщини, різного хімічного складу і з високими фізико-механічними властивостями: електродугове під шаром флюсу, електродугове в середовищі діоксиду вуглецю, електродугове в середовищі аргону, вібродугове та ін. При відновленні зношених зубів наплавленням, у зубчастих колесах великого діаметра і модуля наплавляють зношену сторону кожного зуба із застосуванням сплавів типів сормайт і сталініт, які наносять на раніше наплавлену за допомогою присадного матеріалу і зачищену поверхню. Після наплавлення сормайтом зуби шліфуються. Процес відновлення ремонтним наплавленням зубів деталі включає три основних етапи: 1 – підготовка під наплавку (зачистка зношеної поверхні зубів); 2, 3 – наплавка і контроль (вимір геометричних параметрів зубів);

- пластичним деформуванням ремонтують зношені зуби [207, 208] на невеликих зубчастих колесах із суцільним диском, для чого їх нагрівають до температури 800–900 °С і здійснюють осадку або роздачу. Вдавлювання

застосовують при ремонті невеликих по ширині циліндричних зубчастих коліс з зношеними за профілем зубами, якщо немає поламаних зубів, тріщин на ободі і ступиці і є запас металу на вінці. Для цього використовують спеціальні штампи для видавлювання металу вінця. Процес ремонту в цьому випадку наступний: зубчасті колеса нагрівають і подають до пресу, спресовують в штампі, обпалюють в печі, остиглі зубчасті колеса миють, здійснюють контроль розмірів, направляють на механічну обробку, термообробляють, гартують, миють, очищають від залишків селітри і окалини. Проводять контроль якості поверхонь, твердості зуба, розмірів, відсутність задирок, биття вінця;

- коригуванням відновлюють зубчасті колеса зі зношеними зубами.

Тріщини на ободі усувають їх заваркою і постановкою стяжних накладок. Для вибору методу відновлення деталі, що має зубчасті поверхні необхідно виявити характер пошкодження, враховуючи при цьому технічні характеристики пошкодженої зубчастої передачі.

Зношування зубчастих коліс в процесі експлуатації відбувається під впливом значних навантажень: згинаючих; зім'яття; ударних при одночасному впливі сторонніх твердих частинок, що потрапляють в зачеплення (джерелом їх утворення є як продукти зносу, так і забруднене навколишнє середовище). Більш інтенсивно зношуються зубчасті колеса, що знаходяться в безпосередньому зачепленні, які використовуються в механізмах коробок швидкостей і подач для зміни частоти обертання шпинделя і швидкості переміщення поступально рухомих виконавчих механізмів. У цих зубчастих коліс переважно зношуються торцеві поверхні зубів.

Дефектами при експлуатації зубчастих коліс є:

- зношування робочого профілю зуба;
- скол частини зуба;
- поломка одного або декількох зубів;
- тріщини в зубчастому вінці, спицях або ступиці зубчастого колеса;

- зношування посадкового отвору, поєднане зі змінанням шпонки або шліців;

- вм'ятини на торцях зубів.

Вибір процесів відновлення зубчастих коліс в першу чергу залежить від матеріалу колеса.

При роботі зубчастих передач найбільш часто зносу піддається робочий профіль зуба. Зубчасте колесо в цьому випадку, як правило, не відновлюють, а замінюють новим. Причому, якщо одне з зубчастих коліс вимагає заміни, то для збереження нормальної роботи передачі необхідно замінити і друге колесо пари, навіть якщо воно не піддалося зносу. Тому дуже важливим є постійний контроль стану зубчастих коліс.

При одночасному навантаженні зуби зубчастого колеса зношуються тільки з одного боку, що робить доцільним при проведенні поточного ремонту не робити заміну такого колеса, його досить повернути таким чином, щоб в новому положенні зубчаста пара передавала навантаження незношеною стороною.

Відновлення зубчастих коліс здійснюється декількома способами в залежності від характеру зношування.

Зубчасті колеса зі зламанім або викришуваним зубом недоцільно залишати в працюючому механізмі, так як це може привести до поломки зубів сполученого колеса і виходу з ладу всього механізму. У відповідальних швидкохідних передачах такі зубчасті колеса підлягають заміні. У тихохідних зубчастих передачах економічно вигідніше направити таке зубчасте колесо на відновлення.

Відновлення зубчастих коліс зі зламанім або викришеним зубом може бути виконано в такий спосіб: наплавленням нового зуба замість зношеного по мідним шаблонами (рис. 1.8, *а*), встановленням вставки, що закріплюється гвинтом (рис. 1.8, *б*), встановленням вставки в паз типу «ластівчин хвіст» з подальшим її закріпленням зварюванням (рис. 1.8, *в*).

Після наплавлення шаблони легко видаляються, так як метал, який наплавляється, не приварюється до мідних шаблонів через високу теплопровідність міді.

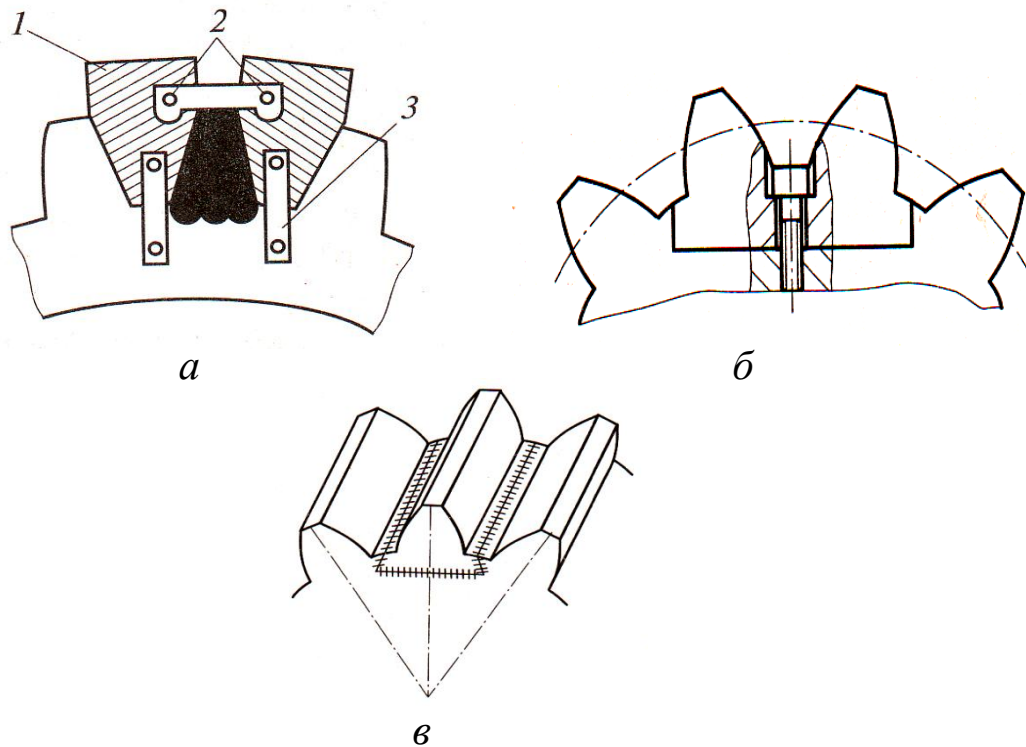


Рисунок 1.8 – Відновлення зубчастих коліс зі зламаним або викришеним зубом:

1 – мідні шаблони, що забезпечують можливість формування бокової поверхні зуба; 2, 3 – планки, що фіксують положення шаблонів на зубчастому вінці

Відновлення зубчастих секторів, подібно відновленню зубчастих коліс, виконується шляхом заміни зубчастого вінця, який виготовляють так само, як зубчастий вінець для коліс, а потім вирізують з нього потрібний за величиною сектор.

Відновлення коліс здійснюється шляхом попереднього наплавлення на зношену поверхню металу, міцнісні характеристики якого повинні відповідати характеристикам тіла відновлюваних зубів колеса. Наплавленню

передують прогрів тіла колеса до заданої температури, яка забезпечує необхідний ступінь адгезії металу колеса з шаром наплавленого металу. Після наплавлення на зубообробному обладнанні відновлюють профіль зубів до проектних розмірів.

Недоліком даного способу є те, що застосування будь-якого виду наплавлення не гарантує формування необхідної кристалічної структури наплавленого металу. Висока температура наплавлення впливає на формування певної кристалічної решітки наплава, яка, як правило, відрізняється від кристалічних решіток тіла колеса, з якого складається зношений зуб колеса. Крім того, при невідповідності температур тіла колеса і наплавленого металу погіршуються умови адгезії, порушується цілісність кристалічних решіток і, відповідно, знижуються міцнісні властивості колеса в цілому.

Виконання ремонту шляхом попереднього наплавлення на зношену поверхню металу не дозволяє значно продовжити термін експлуатації колеса і надалі вимагає повторного виконання відновлювальних робіт або його утилізацію. Це підвищує собівартість металургійної сировини, знижує економічну ефективність гірничо-збагачувального виробництва.

Відновлення великогабаритних коліс здійснюється за рахунок відновлення профілю і параметрів зубів, який досягається формуванням поновлюваного зуба за рахунок видалення його зношеної і деформованої частини і формуванням його нижньої частини за рахунок частини тіла колеса.

Відновлення крупногабаритних коліс полягає в наступному:

- в збереженні параметрів зубів шестерні і їх заданих фізико-механічних властивостей;
- в запобіганні зміни фізико-механічних властивостей відновлених зубів і забезпеченні їх нормального експлуатаційного ресурсу;

- в зниженні експлуатаційних витрат і зменшенні собівартості продукції, яка переробляється, за рахунок повторного використання крупногабаритної шестерні з повним робочим ресурсом.

В процесі експлуатації крупногабаритного гірничо-збагачувального обладнання, наприклад, млинів різного ступеня подрібнення, відбувається природний експлуатаційний знос їх конструктивних елементів. Тіла обертання приводяться в рух за рахунок взаємодії крупногабаритних шестерень, взаємодіючих з приводами. Протягом терміну експлуатації відбувається регламентний знос коліс.

Знос зубів може бути односторонній, якщо обертання колеса відбувається в одному напрямку. Знос зубів може бути двостороннім, якщо передбачається розворот шестерні і стираючі навантаження докладаються на обидва бічних профілю кожного зуба шестерні.

Спосіб відновлення зношеної зубчастої частини крупногабаритної шестерні розглядається на прикладі відновлення шестерні, де знос зубів відбувається з одного боку, тобто при наявності робочого і неробочого профілів кожного зуба.

На рис. 1.9 (а) зображений контур зубчастої частини шестерні в первісному стані, контур зносу зубів, а також контур відновлених зубів. На рис. 1.9 (б) схематично зображено зуб шестерні і її зубчастої частини в первісному стані, контур зносу зуба, а також контур відновлених зубів.

При односторонньому зношенні поверхня профілю робочої частини (1) зуба змінює свою конфігурацію і просторову орієнтацію. Це положення визначається границей зношування (2) робочої частини зуба колеса. При односторонньому зношенні поверхня профілю робочої частини (1) зуба змінює свою конфігурацію і просторову орієнтацію.

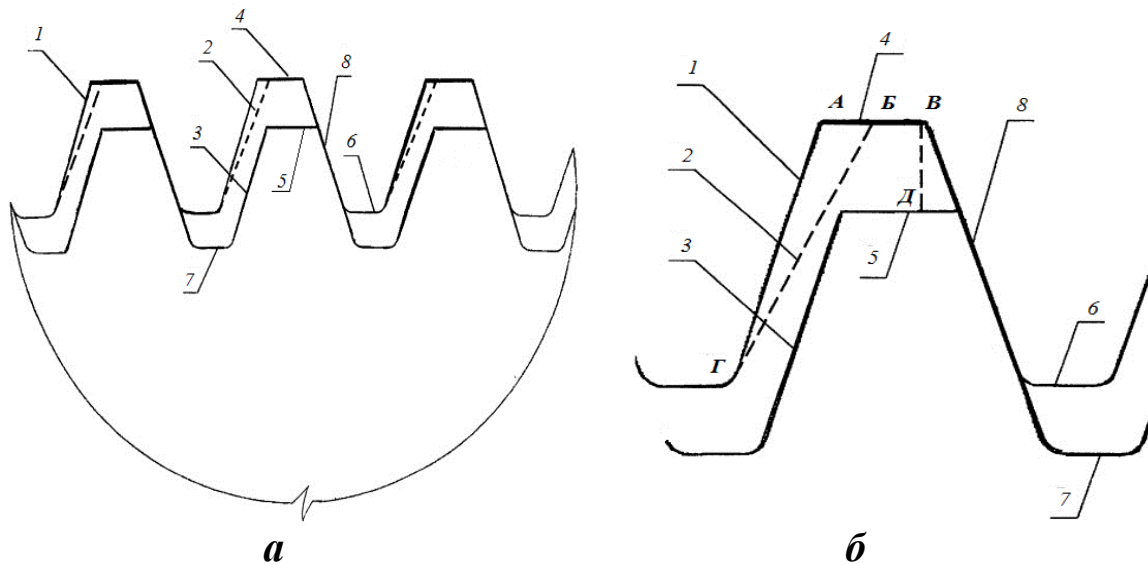


Рисунок 1.9 – Відновлення профілю зношеної зубчасті частини крупногабаритної шестерні:

1 – контур профілю робочої частини зуба шестерні в первісному стані;
 2 – границя зносу профілю робочої частини зуба шестерні, після визначеного терміну експлуатації; 3 – контур профілю робочої частини зуба шестерні у відновленому стані; 4 – поверхня виступу зуба шестерні в первісному стані; 5 – поверхня виступу зуба шестерні у відновленому стані; 6 – поверхня впадини зуба шестерні в первісному стані; 7 – поверхня впадини зуба шестерні у відновленому стані; 8 – контур профілю неробочої частини зуба шестерні в первісному і відновленому станах;

A-Г – границя поверхні профілю зуба шестерні в первісному стані;
Б-Г – границя поверхні профілю зуба шестерні при його зношенні в процесі експлуатації; *A-Б* – зона зношування поверхні виступу зуба шестерні; *В* – зона поверхні виступу зуба шестерні в зношеному вигляді після експлуатації шестерні; *В-Д* – висота зони видалення зношеної частини зуба шестерні

Це положення визначається границей зношування (2) робочої частини зуба колеса. Положення границі зношування (2) визначає характер зачеплення веденої і ведучої шестерень і, відповідно, геометричні параметри поверхні виступів зубів (4). Виходячи зі ступеня зношування зуба в контурах

A-B-Г, поверхня виступів зменшується до величини проекційного відрізка *B*. Зміна положення контуру (1) профілю робочої частини на контур (2) зношування профілю робочої частини зуба, а також утворення зони зношування *A-B* поверхні виступів зуба колеса визначають необхідність відновлення його геометрії до первісного положення. Зовнішній діаметр зубчастого колеса обробляється на висоту зони *B-Д*.

Після цього приступають до відновлення профілю робочої частини (2) зуба, в результаті якого відновлюється кут утворюючої профілю робочої частини, а також її довжина. Це досягається тим, що піддають механічному зрізаючому впливу поверхню профілів робочої частини зубів (2) до їх нового положення (3). Одночасно з цією операцією зрізаючим впливом на тіло шестерні змінюють первісне положення поверхні впадин зубів шестерні (6) до нового положення поверхні впадин (7) зубів, які радіально знаходяться ближче до центру шестерні. В результаті відновлюється первісна висота зубів шестерні, так як поверхню впадин (6) зубів переміщують в тіло шестерні на глибину, яка відповідає висоті віддаленій зношеній верхній частині зубів.

Після повного відновлення параметрів профілів виступів і впадин зубів, а також поверхні профілів їх робочої і неробочої частин, виконують їх обробку до заданих параметрів шорсткості.

1.2.2 Критерії формування структур і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зубчастих коліс, які зношуються і відновлюватимуться

Критеріями формування структур поверхневого шару зубчастих коліс є параметри, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зубчастих передач. Одним з таких параметрів є коефіцієнт тертя, який визначає здатність поверхневих шарів циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс до взаємного опору при дії контактних навантажень.

Коефіцієнт тертя впливає на ККД передачі, надійність, довговічність роботи і міцність зубчастих пар.

Коефіцієнт тертя, згідно молекулярно-механічної теорії тертя, визначається як сума молекулярної і механічної складових [52, 108, 222]:

$$f = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + 0,4 \cdot a_r \cdot \sqrt{\frac{h}{\rho}}, \quad (1.14)$$

де τ_0 – питома зсувна міцність молекулярних зв'язків [109];

p_r – середній контактний тиск;

β – коефіцієнт зміцнення молекулярних зв'язків під дією стискаючих напруг;

a_r – коефіцієнт гістерезисних втрат при ковзанні [108, 109];

h – глибина взаємного упровадження мікронерівностей контактуючих деталей;

ρ – радіус заокруглення вершин мікронерівностей.

У викладеній вище теорії контактної взаємодії було показано, що тиск на фактичних площадках контакту визначається фізико-механічними властивостями поверхневого шару більш пластичного матеріалу:

$$p_r = c \cdot k_1' \cdot \sigma_T. \quad (1.15)$$

Питома зсувна міцність молекулярних зв'язків у відповідності з працями М.М. Міхіна [144] і М.Б. Демкина [52] також визначається фізико-механічними станом поверхневого шару контактуючих зубчастих коліс:

$$\tau_0 = \frac{U_a}{j \cdot N_A} - \frac{k \cdot T}{j} \ln \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}, \quad (1.16)$$

де U_a – енергія активації ($T_{nl} = 226$ °С – при крихкому розриві; $T_{nl} = 166$ °С – при пластичному відтискуванні);

j – активаційний об'єм (10^{-27} м³);

$\varepsilon_0 = 10^{12} - 10^{13}$ – для всіх металів; ε – швидкість деформації ($10^{-4} - 10^{-6}$ с⁻¹);

N_A – число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹); k – стала Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$);

T і T_{nl} – температура в зоні контакту і температура плавлення.

Глибина взаємного упровадження мікронерівностей в період приробляння визначається загальними контактними деформаціями сталі з більш пластичного матеріалу. У період нормального (сталого) зносу величина упровадження визначається пружними контактними деформаціями.

Таким чином, підставляючи (1.15) в (1.14), отримаємо рівняння коефіцієнта тертя для умов приробляння:

$$f = \frac{\tau_0}{c \cdot k_1' \cdot \sigma_T} + \beta + \frac{4 \cdot a_r \cdot R_a^{\frac{2}{3}}}{S_m \cdot t_m} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{60 \cdot \pi}{t_m} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot p \cdot W_z \cdot H_{\max}}{k_1' \cdot \sigma_T} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot \pi \cdot k_1' \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{R_a \cdot E} \right)} +$$

$$+ \beta + \frac{48 \cdot \pi \cdot (k_1' \cdot \sigma_T)^{\frac{1}{3}}}{t_m}; \quad (1.17)$$

при нормальному зношенні:

$$f = \frac{\tau_0}{c \cdot k_1' \cdot \sigma_T} \times \sqrt{\frac{30 \cdot (1 - \mu^2) \cdot (2 \cdot \pi \cdot p \cdot R_a \cdot W_z \cdot H_{\max})^{\frac{1}{3}}}{E \cdot S_m \cdot t_m}}. \quad (1.18)$$

Для умов сухого тертя (1.17) і (1.18) не викликають сумніви, так як вони базуються на молекулярно-механічній теорії тертя І.В. Крагельського, яка показала свою життєздатність [108, 109].

Зменшення шорсткості у всьому діапазоні зміни швидкості ковзання і навантаження призводить до зниження коефіцієнта тертя.

Велике значення при терті ковзання має вигляд тертя: рідинне, граничне і схоплювання.

Результати експериментального визначення зон тертя, що відповідають різним характеристикам процесу тертя, при терті ковзання по шорсткій поверхні представлені на рис. 1.10. Аналіз результатів цих досліджень показує, що шорсткість поверхні тертя значно впливає на перерозподіл зон тертя.

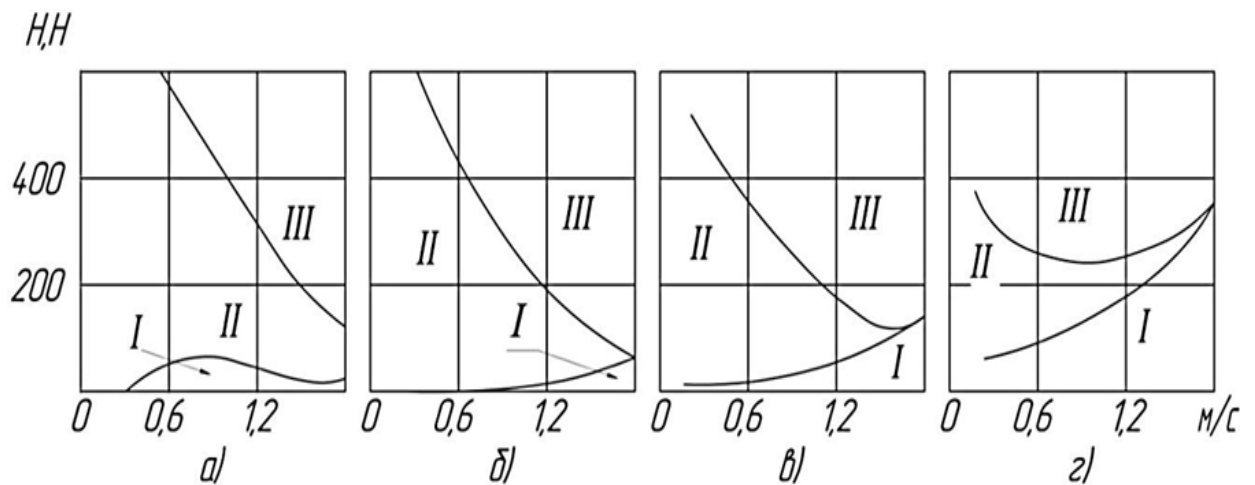


Рисунок 1.10 – Границі зон тертя:

(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. Зносостійкість характеризується здатністю поверхневих шарів циліндричних зубчастих коліс чинити опір руйнуванню при терті ковзання, терті кочення, а також при мікропереміщеннях, обумовлених впливом вібрацій (фреттинг-процес).

Знос циліндричних зубчастих коліс призводить до втрати точності, зниження ККД, зниження міцності, збільшення динамічних навантажень,

збільшення шуму зубчастих передач, які є наслідком збільшення зазорів. Знос є причиною виходу з ладу переважної більшості циліндричних зубчастих коліс.

Згідно з теорією І.В. Крагельського [108], інтенсивність зношування деталей розраховується за формулою:

$$I_n = \frac{\chi}{n \cdot \lambda} \cdot \sqrt{\frac{h}{\rho}} \cdot \frac{A_r}{A}, \quad (1.19)$$

де n – число циклів впливу, яке призводить до руйнування матеріалу.

Поверхневі залишкові напруги σ_τ призводять до відповідної зміни даного числа циклів. Ця зміна враховується за допомогою коефіцієнта λ , що визначається з [202]:

$$\lambda = \left(\frac{\sigma_B - \sigma_\tau}{\sigma_a} \right)^{t_y}, \quad (1.20)$$

де σ_B – тимчасовий опір розриву; σ_τ – поверхневі залишкові напруги;

σ_a – діюча величина амплітудної напруги в робочому шарі;

t_y – параметр фрикційної втоми при пружному контакті.

У формулі (1.19) міститься коефіцієнт χ :

$$\chi = \frac{1}{2(v+1)} \cdot \sqrt{\frac{v}{2\alpha}}, \quad (1.21)$$

де α – коефіцієнт, що враховує відмінність площі перетину виступів на рівні p від величини фактичної площі контакту на тому ж рівні. Відповідно до розробленої теорії контактної взаємодії деталей машин $\alpha = 1$.

Згідно з наведеною вище теорією контактної взаємодії:

$$\frac{A_r}{A} = \frac{P}{A \cdot c \cdot k'_1 \cdot \sigma_T} . \quad (1.22)$$

Підставляючи (1.20), (1.21) в (1.19), отримаємо рівняння для розрахунку інтенсивності зносу циліндричних зубчастих коліс:

$$I_n = \frac{2,5 \cdot \nu^{0,5} \cdot R_a^{\frac{2}{3}} \cdot P^{\frac{7}{8}}}{n \cdot \lambda \cdot (\nu + 1) \cdot S_m \cdot t_m^{\frac{3}{2}} \cdot k'_1 \cdot \sigma_T} \times \\ \times \sqrt{15\pi \cdot (2\pi \cdot W_z \cdot H_{\max})^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + \frac{2\pi \cdot k'_1 \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E} \right]} . \quad (1.23)$$

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

Аналіз результатів досліджень стосовно до реальних циліндричних зубчастих коліс показує, що криві зносу не матимуть явно вираженого переходу від приробляння до нормального зносу.

Вплив же нерівностей поверхні на їх границю витривалості вперше запропонував враховувати Г. Нейбер [50] за допомогою теоретичного коефіцієнта концентрації напружень, який визначається при крученні і зсуві:

$$\alpha_\sigma = 1 + \sqrt{\gamma \frac{t}{\rho}} , \quad (1.24)$$

при розтягуванні і вигині:

$$\alpha_\sigma = 1 + 2 \cdot \sqrt{\gamma \frac{t}{\rho}} , \quad (1.25)$$

де γ – коефіцієнт (за даними роботи [109], після механічних методів обробки $\gamma = 1$); t – висота нерівностей поверхні; ρ – радіус впадин.

І.А. Одінг запропонував оцінювати зміну опору втоми в залежності від шорсткості поверхні за допомогою емпіричного коефіцієнта T [51]:

$$T = 1 + a \cdot \sigma_{-1}, \quad (1.26)$$

де σ_{-1} – границя витривалості при вигині; a – коефіцієнт, що залежить від методу обробки циліндричних зубчастих коліс (при поліруванні $a = 0$; при швидкісному зубофрезеруванні фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки $a = 0,004$; при чистовому зубофрезеруванні фрезами $a = 0,006$; при чорновому зубофрезеруванні фрезами $a = 0,010$).

Результати цих теоретичних і експериментальних досліджень показують, що нерівності, що утворюються на поверхні деталей при їх обробці, є концентраторами напружень і служать однією з причин зниження границі витривалості.

Таким чином, з огляду на дані робіт [208, 209], отримаємо рівняння для розрахунку коефіцієнта концентрації напружень:

$$\alpha_{\sigma} = 1 + \frac{200}{t_m \cdot S_m} \left[2\gamma \cdot R_{\max} \cdot (R_{\max} - R_p) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1.27)$$

Аналіз результатів експериментальних досліджень опору втоми циліндричних зубчастих коліс (рис. 1.11) показує, що границя витривалості циліндричних зубчастих коліс при зменшенні їх шорсткості з $R_a = 0,74$ мкм до $R_a = 0,22$ мкм в середньому збільшується на 14 %, а термін служби – більш ніж в 3 рази.

Збільшення глибини рисок на евольвентної поверхні циліндричних зубчастих коліс з $R_{\max} = 1,4$ мкм до $R_{\max} = 3,4$ мкм зменшує границю витривалості циліндричних зубчастих коліс на 4 %.

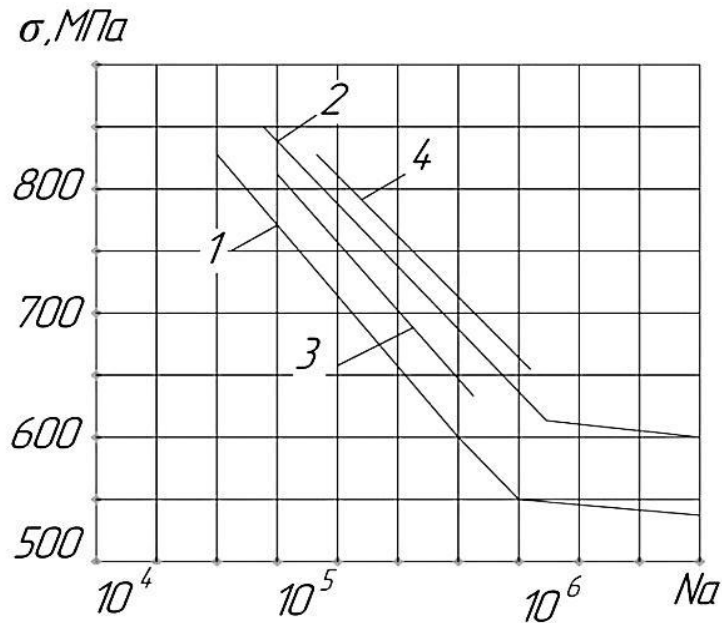


Рисунок 1.11 – Опір втоми поверхонь контактуючих зношених циліндричних крупномодульних зубчастих коліс від циклічності навантаження:

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

Обчислені значення параметрів стану поверхневого шару циліндричних крупномодульних коліс повинні бути перевірені на технологічність: вибирають поєднання, яке технологічно забезпечується за найменшою собівартістю.

Таким чином, результати проведених досліджень, а також дані інших авторів [52, 108, 109] 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 табл. 1.2 наведені оптимальні значення стандартизованих параметрів шорсткості для циліндричних крупномодульних зубчастих коліс, що визначають надійність і довговічність циліндричних зубчастих передач.

Моделюючи умови роботи циліндричних крупномодульних коліс і порівнюючи результати теоретичних досліджень з даними, отриманими на

експериментальних установках і при дослідженні на «робочих осях», з урахуванням масштабного фактора визначаємо оптимальні значення параметрів стану робочих поверхонь циліндричних крупномодульних коліс, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

Таблиця 1.2 – Оптимальні значення стандартизованих параметрів шорсткості для циліндричних крупномодульних зубчастих коліс

Поверхня деталі	R_a , мкм	R_z , мкм	R_{max} , мкм	S_m , мм	t_m , %
Поверхні, що забезпечують явище виборчого переносу	0,25	–	–	0,025	50
Поверхні валів, що працюють на границі витривалості	–	–	1,0	0,08	–
Поверхні посадочних поверхонь зубчастих коліс	0,5–2,0	–	–	–	–
Бічні поверхні: зубів коліс 8В ГОСТ 1643-81	1,5	50–100	–	–	–
Бічні поверхні: зубів коліс 7В ГОСТ 1643-81	1,0–1,25 0,8–1,6	– –	– –	0,08–0,1 0,04–0,1	50 50

Дослідно-статистичний метод базується на визначенні параметрів стану робочих поверхонь деталей існуючих машин або дослідної партії. Так, оптимальні значення параметрів стану поверхневого шару пар тертя можуть бути визначені за допомогою їх вимірювання після прироблення деталей.

Висновки, мета і задачі

1. Основи забезпечення продуктивності, точності та якості ремонту і відновлення крупногабаритних зубчастих коліс з урахуванням основних показників зубчастих передач регламентують їх надійність і ККД, які в значній мірі визначаються експлуатаційними властивостями зубчастих циліндричних коліс (границею витривалості, зносостійкість, коефіцієнтом тертя, контактною жорсткістю, міцністю).

2. Експлуатаційні властивості характеризуються станом поверхневого шару зубчастих коліс, який визначається технологією їх виготовлення. Несуча здатність і контактна взаємодія зубчастих коліс залежать від стану поверхневого шару в цілому (макровідхилення, хвилястості, шорсткості, фізико-хімічних властивостей) і тому в роботі і розглянуто комплексний підхід до вивчення стану поверхневого шару. Вибір системи параметрів поверхневого шару зубчастих коліс одночасно попер визначається можливістю їх і метрологічного забезпечення.

3. Комплексний підхід до вибору, призначенню і технологічного забезпечення системи параметрів поверхневого шару відновлення крупногабаритних зубчастих коліс встановив взаємозв'язок стану поверхневого шару зубчастих відновлених коліс (макровідхилення, хвилястості, шорсткості, фізико-механічних властивостей), забезпечив розвиток наукових методів визначення необхідних параметрів стану робочих поверхонь зубчастих загартованих коліс з метою формування якісних показників стану поверхневого шару.

4. Основними напрямками забезпечення продуктивності параметрів стану поверхневого шару і якості зубообробки, відновлення крупногабаритних зубчастих коліс є розробка і дослідження методів формоутворення поверхневого шару циліндричних відновлених крупногабаритних зубчастих коліс і альтернативних зубошліфуванню технологій, що дозволяють значно підвищити якість поверхневого шару і

точність зубообробки, знизити трудомісткість операцій остаточної обробки зубів.

Ґрунтуючись на вищесказане, метою дисертаційної роботи є розробка наукових основ імітаційного моделювання взаємозв'язків впливу геометричних, кінематичних і динамічних параметрів зачеплення зубів важконавантажених крупногабаритних зубчастих передач і їх відновлення.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити теорію моделювання взаємозв'язків впливу при зубообробці і якості зубчастого зачеплення крупногабаритних модульних коліс в процесі експлуатації при зношуванні.

2. Удосконалити методику вибору і призначення забезпечення системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс з урахуванням комплексної оцінки стану поверхонь відновлених і експлуатованих зубчастих циліндричних коліс.

3. Розширити область застосування комплексного параметра щодо забезпечення довговічності зубчастих коліс, при мінімальних пластичних деформаціях зубів крупногабаритних зубчастих коліс.

4. Встановити залежність впливу питомого зносу зубів в контактній зоні, що залежить від потужності, що витрачається на подолання сил тертя з урахуванням забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубів зношених і відновлених коліс.

5. Визначити сумарний знос в контактній зоні в функції потужності тертя, що залежить від фази зачеплення і часу, і в функції інтенсивності зношування, загальній для контактуючих тіл, з його розподілом між поверхнями, що труться пропорційно шляху ковзання з урахуванням стану поверхневого шару зубів зношених і відновлених коліс.

6. Розробити методику аналітичного представлення зношеного профілю з урахуванням аналізу експериментальних даних дійсної форми профілів зубів після їх зносу в процесі експлуатації.

7. Розробити методику багатокритеріальної оптимізації забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь на основі застосування комплексних параметрів стану поверхневого шару контактируємих зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

8. Удосконалити методику розрахунку складової зносу від зміни миттєвої температури в контакті при моделюванні забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь крупногабаритних зубчастих коліс.

9. Розробити математичну модель прогнозування структури систем параметрів стану поверхневого шару крупногабаритних зубчастих коліс.

10. Розробити загальні принципи оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс моделюванням величиною зносу і припуском при формоутворенні параметрів стану поверхневого шару зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс.

РОЗДІЛ 2
ФОРМАЛІЗАЦІЯ ОПИСУ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ
ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРУПНОМОДУЛЬНИХ
ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Відомі теорії зачеплення описують, як правило, зачеплення спряжених профілів. Спряженими зазвичай називають такі профілі, які забезпечують безперервне зачеплення при заданому, як правило постійному, значенні передатного числа [41, 74, 260, 284]. До спряжених профілів відносяться евольвентні зачеплення. 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. 2.1). Відповідно, лінія зачеплення g_α є прямою лінією.

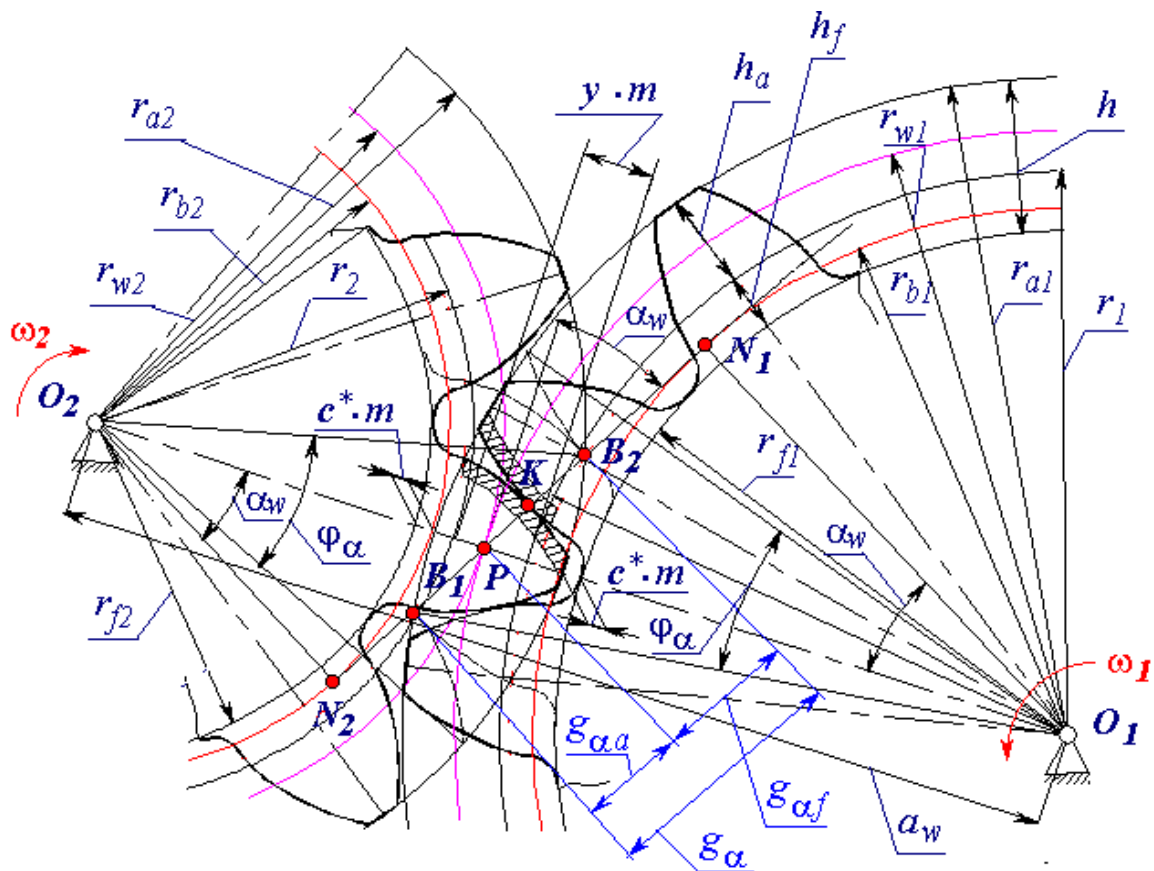


Рисунок 2.1 – Схема зачеплення циліндричних зубчастих коліс

В процесі експлуатації зубчастих передач, внаслідок нерівномірного зносу робочих поверхонь зубів, їх профілі перестають бути евольвентними і загальна нормаль до профілів в чіткій відповідності з основним законом зачеплення перетинає лінію центрів в різних точках (миттєвих центрах швидкостей), що викликає скривлення лінії зачеплення [57, 87, 88, 95, 127].

Непостійність положення миттєвого центру швидкостей призводить до того, що значення передатного числа стає змінним. У той же час середнє значення передатного числа залишається незмінним, рівним відношенню числа зубів що зачіпляються, зубчастих коліс. У зв'язку з цим, а також с тим, що деякі характеристики зачеплення профілів зі зношеними зубами (наприклад, швидкість ковзання) змінюються незначно, зношені профілі можна назвати квазіспряженими.

У зв'язку з тим, що для опису квазіспряжених профілів і визначення характеристик контакту математичний апарат евольвентного зачеплення не може бути застосований в повній мірі, виникає необхідність в розробці нових підходів для аналізу зачеплення зношених профілів зубів [201, 202, 203]. У дисертаційній роботі розглядаються зношені і відновлені крупногабаритні зубчасті колеса.

2.1. Аналіз методів відновлення функціональних характеристик крупномодульних зубчастих передач

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 [221, 222, 227, 231]. Діапазон параметрів C_x (комплексного параметра рівноважного стану поверхонь тертя) для різних методів зубообробки наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – 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. 2.2. Множина можливих значень області відправлення задана відрізками (діапазонами) параметра C_x . Множинами області відправлення [36, 37] є множини I–VII. Множина параметрів відрізка (діапазону) C_x визначається за допомогою операцій над множинами – їх перетину (\cap) або віднімання (різниці) (\setminus).

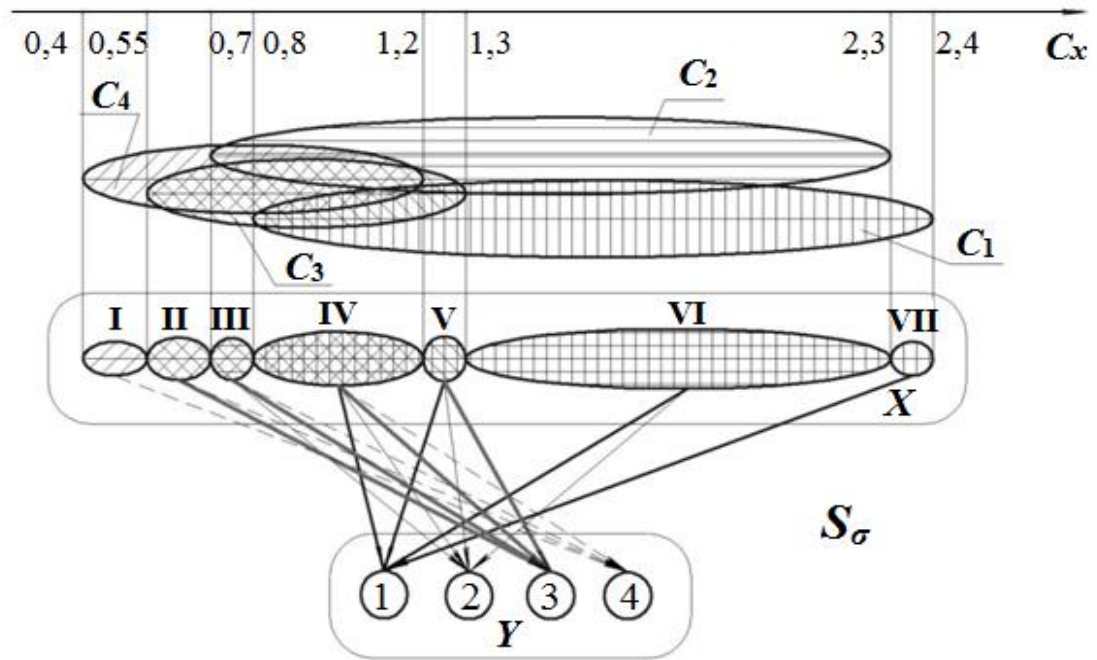


Рисунок 2.2 – Графік відповідностей S_σ у вигляді графа:

$X = \{I; II; III; IV; V; VI; VII\}$ – 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. 2.2 заносяться всі можливі пари елементів області прибуття та відправлення, а викреслюються не реальні пари (не пов'язані області відправлення і прибуття).

Таблиця 2.2 – 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	$\langle I;4 \rangle$	$\langle II;4 \rangle$	$\langle III;4 \rangle$	$\langle IV;4 \rangle$	$\langle V;4 \rangle$	$\langle VI;4 \rangle$	$\langle VII;4 \rangle$

У тому випадку, якщо елемент області відправлення X пов'язаний з елементом області прибуття Y , то в табл. 2.3 ставиться «1», якщо ж він не пов'язаний з ним, то ставиться «0».

Таблиця 2.3 – Відповідність, задана табличним способом

Область прибуття Y	Область відправлення X						
	I	II	III	IV	V	VI	VII
1	0	0	0	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	0
3	0	1	1	1	1	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0

Табл. 2.2 і табл. 2.3 мають різні призначення, тому що відповідність задано у вигляді декартового добутку множин X і Y , де розглядаються впорядковані пари елементів їх множин, виключаючи не реальні їх пари, за якими відбувається перехід до логічних операцій, де йдеться про істинність або хибність операції відповідності.

Вибір методу обробки зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс при регламентації комплексного параметра стану поверхні

можна зробити за графіком відповідностей (рис. 2.2), в якому в заданому діапазоні параметра C_x знаходиться пара елементів множин X і Y , відповідна шуканого методу обробки.

Вибір методу механічної обробки поверхні зношених і наплавлених крупногабаритних зубчастих коліс при регламентації декількох комплексних параметрів стану поверхні (наприклад, Π – контактна жорсткість деталей і C_x) аналогічно проводиться за графіком відповідностей. Відповідність може бути складено, аналогічно рис. 2.2 і табл. 2.3, у вигляді таблиці і графіка, але тоді вона має дві області відправлення X_1, X_2 і одну область прибуття Y .

Вхідним параметром графіка відповідностей є відповідні діапазони комплексних параметрів C_x і Π , вихідним же параметром – метод зубообробки (елементи області прибуття Y). Елементи області відправлення представлені діапазонами значень відповідних комплексних параметрів Π і C_x . Елементи ж області прибуття – це конкретні методи обробки. Пріоритет методу обробки, що знаходиться в області прибуття, в порівнянні з іншими, визначається за кількістю логічних одиниць в області відправлення таблиці відповідності (табл. 2.3).

Якщо ж число логічних одиниць в області прибуття однаково, то слід звернутися до графічного методу системної оптимізації. Для математичного опису профільної кривої при виборі методу відновлення зношених крупногабаритних зубчастих коліс застосовуємо відому полярну [135] і ортогональну [182, 185] системи координат. 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. 2.3).

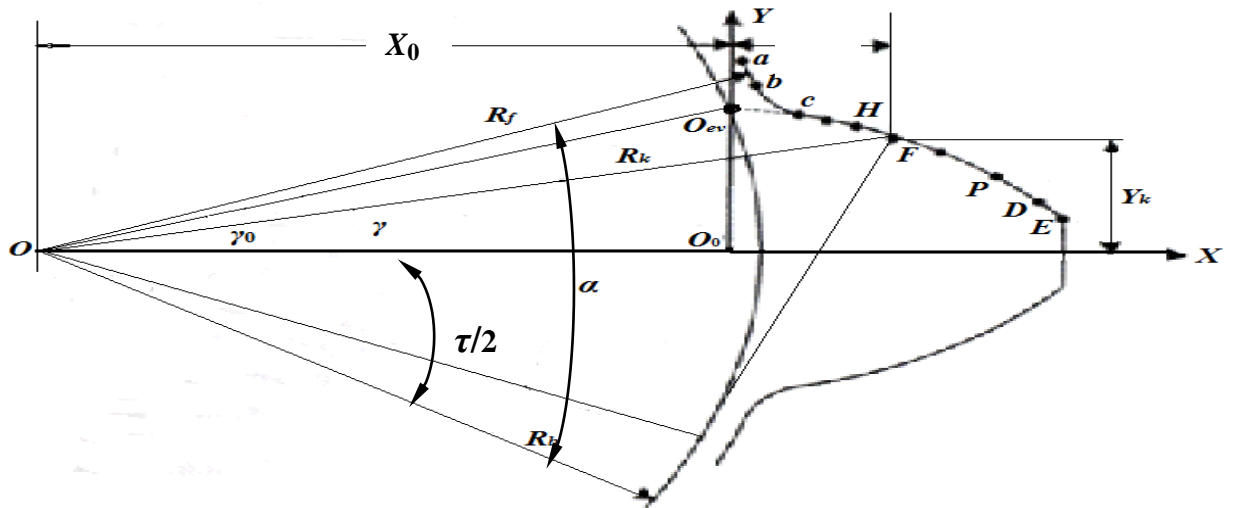


Рисунок 2.3 – Система координат профілю і розташування характерних точок: ab – дуга окружності впадин; bc – перехідна крива; cE – евольвента; E – вершина зуба; P – полюс зачеплення; HF , DE – зони двохпарного зачеплення зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

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.

Профіль зуба описується в межах половини кутового кроку зубів

$$\tau = \frac{2\pi}{z} :$$

- або в функції абсциси X (основний спосіб):

$$Y = Y(X) , \quad (2.1)$$

- або в функції радіуса-вектора R_k :

$$Y = Y(R_k) . \quad (2.2)$$

Крива, що описує профіль складається з трьох спряжених частин:

I частина – дуга окружності впадин від середини впадини до спряження з перехідною кривою ab – описується параметричним рівнянням в функції радіусу окружності впадин кута γ ;

II частина – перехідна крива bc – описується параметричним рівнянням в функції радіуса скруглення вершини зуба вихідного контуру і кута α [184].

Ці дві частини профілю є однаковими для евольвентного та квазіспряженого профілів.

III частина – від перехідної кривої до вершини зуба (cE) і є, власне, робочою частиною профілю зуба, яка описується для евольвентного (незношеного зуба) і квазіспряженого профілів по різному.

Евольвентний профіль описується параметричним рівнянням в функції евольвентного кута α :

$$X_k = \frac{R_b}{\cos \alpha} \cdot \cos(\gamma_0 - \text{tg} \alpha + \alpha) - X_0, \quad (2.3)$$

$$Y_k = \frac{R_b}{\cos \alpha} \cdot \sin(\gamma_0 - \text{tg} \alpha + \alpha), \quad (2.4)$$

$$R_b = 0,5 \cdot m \cdot z \cdot \cos \alpha_b, \quad (2.5)$$

$$X_0 = R_b \cdot \cos \gamma_0, \quad (2.6)$$

$$\gamma_0 = \frac{\pi}{2z} + \frac{2x \cdot \text{tg} \alpha_b}{z} + (\text{tg} \alpha_b - \alpha_b), \quad (2.7)$$

де m – модуль зачеплення; z – число зубів; $\alpha_b = 0,35$ рад (20°) – стандартний кут вихідного контуру; x – коефіцієнт зміщення вихідного контуру; R_b – радіус основної окружності зубчастого колеса; γ_0 – кутова координата початкової точки евольвенти.

Для розгляду параметрів відновлення [38, 39, 53, 54] зношених крупногабаритних зубчастих коліс при формоутворенні евольвентної поверхні за допомогою ортогональної системи координат, віссю абсцис якої є вісь симетрії зуба, а вісь ординат проходить через початкову точку O_{ev} евольвенти вихідного, незношеного профілю – XOY (рис. 2.3), застосовуємо теорію системно-структурного аналізу, що дозволяє не тільки побудувати їх схеми, з виявленням експлуатаційних властивостей зубчастих коліс, а й забезпечити експлуатаційні властивості відповідно до призначення умов експлуатації циліндричної зубчастої пари (рис. 2.4).

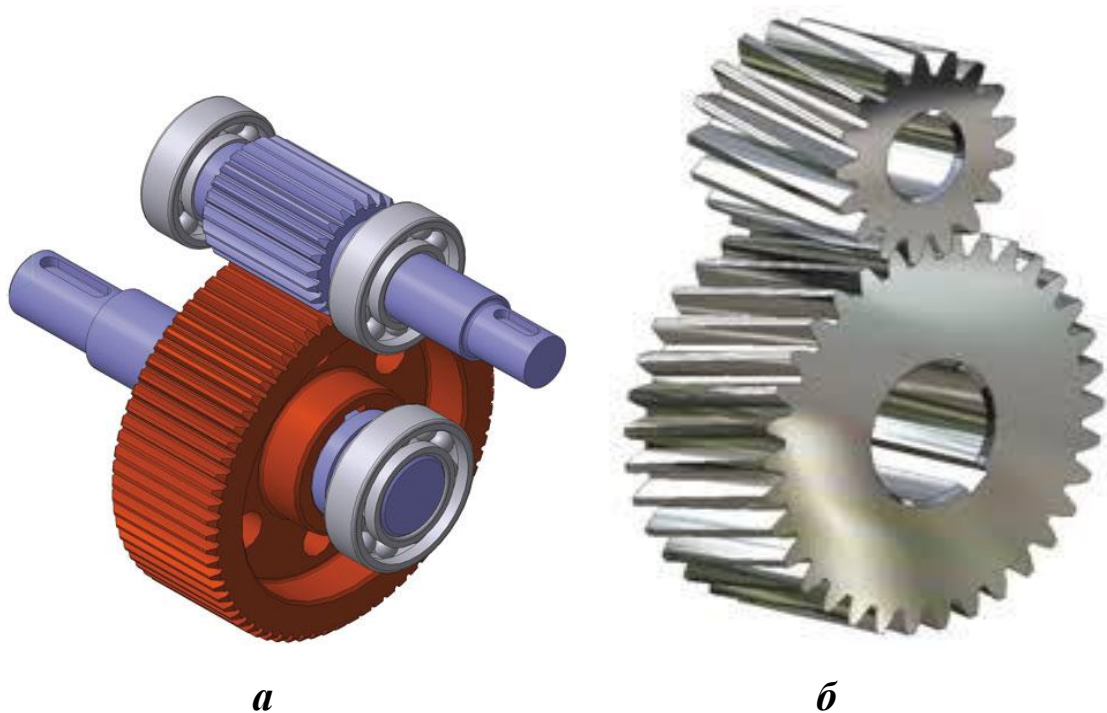


Рисунок 2.4 – Циліндричні зубчасті пари, що сполучаються:

a) – прямозуба пара; *б)* – косозуба пара

Структурна схема параметрів формоутворення зношеної евольвентної поверхні зубчастого колеса (рис. 2.5) відповідає графіку відповідностей S_{σ} у вигляді графа (рис. 2.2).



Рисунок 2.5 – Зношена евольвентна поверхня зубчатого колеса


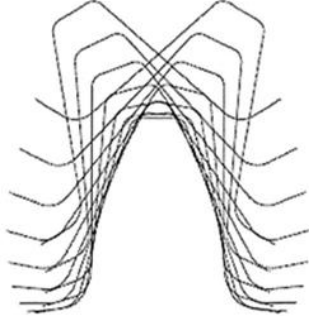
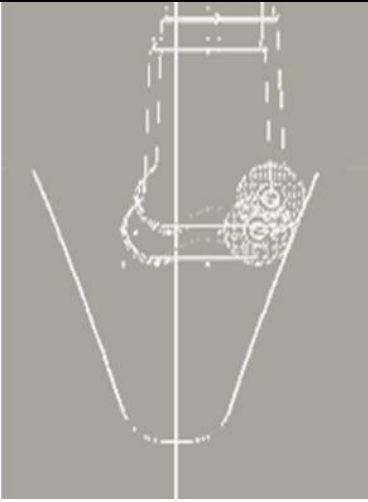
Застосування розглянутих методів моделювання дозволяє виявити умови контактної взаємодії поверхонь відновлених після зносу зубчастих коліс важких токарних верстатів, визначити перелік ЕВ та їх діапазон для поверхонь зубчастих коліс, використовуючи комплексні параметри стану, вибрати метод зубообробки за таблицями і графіками відповідностей [32, 33, 37].

2.1.1 Особливості відновлення крупномодульних коліс різними методами зубообробки

Забезпечення експлуатаційних властивостей (ЕВ) відновлення зношених крупногабаритних зубчастих коліс і їх передач нерозривно пов'язане із забезпеченням параметрів стану поверхневого шару зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс, що визначають їх ЕВ. Для успішного вирішення цієї задачі необхідно розглянути теоретичні аспекти взаємозв'язку параметрів стану поверхневого шару зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з умовами їх обробки [5, 6, 30, 34]. Доцільно розглянути не загальні аспекти зв'язку окремих параметрів стану поверхні зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс (рис. 2.6) з умовами їх обробки, а конкретний взаємозв'язок системи параметрів стану поверхневого шару, що визначають ЕВ зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з умовами їх обробки.

У табл. 2.4 показані напрямки дослідження параметрів формування поверхневого шару при відновленні зношених крупногабаритних зубчастих коліс: геометричній і кінематичної точності, шорсткості, поверхневої твердості, хвилястості, продуктивності при швидкісному зубофрезеруванні.

Таблиця 2.4 – Схеми зубообробки відновлення зношених крупногабаритних зубчастих коліс за інноваційними технологіями з модулем до 60 мм

Нарізання зубів на зубчастому вінці з модулем 50 мм		
 <p>- Модуль 50 мм; - Число зубів 168; - Зовнішній діаметр вінця 8490 мм; - Ширина вінця 360 мм; - Кут нахилу зуба 0°; - Ступінь точності 9.</p>	Традиційна технологія	
	<p><i>Схема формоутворення впадини зуба</i></p>	<p><i>Устаткування, різальний інструмент, трудомісткість роботи</i></p>
	 <p>Метод обкату</p>	<p>Зубостругальний верстат «Маг». Гребінки зі швидкорізальної сталі</p>
	Інноваційна технологія	
		<p>Портальний обробний центр «Waldrich Coburg – PowerTec» 7500 AG-S2. Дискові та кінцеві фрези з ЗНП</p>

Залежно від умов обробки ступінь впливу кожного з цих факторів на утворення шорсткості буде різною. Перші чотири фактори викликають утворення систематичної складової профілю шорсткості, яка може бути описана математично. П'ятий фактор викликає утворення випадкової складової профілю і визначає розкид або дисперсію параметрів шорсткості.

При зубофрезеруванні черв'ячними модульними фрезами, спеціальними немодульними дисковими фрезами кінематика їх переміщення відносно оброблюваної поверхні сприяє формуванню як поперечної, так і поздовжньої шорсткості.

Формування шорсткості поверхні зубів зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс [89, 92, 101, 107] після врізання в нього зуба фрези показано на рис. 2.6.

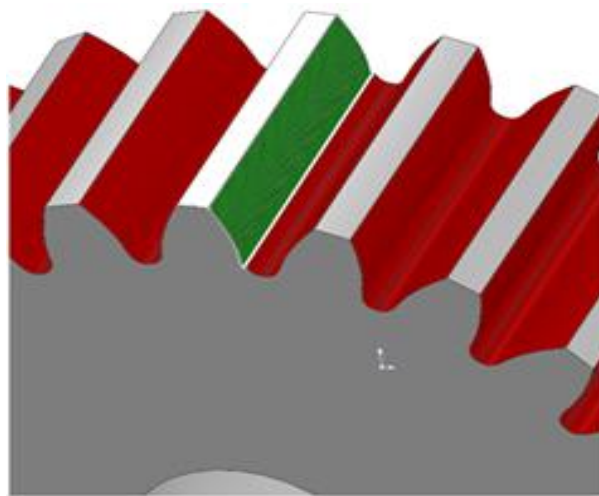


Рисунок 2.6 – Формування поперечної і поздовжньої шорсткості при зубофрезеруванні зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

2.1.2 Методи забезпечення мінімальних пластичних деформацій зубів відновлених крупномодульних зубчастих коліс

При обробці циліндричних зубчастих коліс, в залежності від умов, можуть відбуватися різні явища, що впливають на утворення шорсткості.

При зубообробці в зоні контакту ріжучого зуба фрези із заготовкою матимуть місце: пружні деформації поверхневих шарів металу; пружно-пластичні деформації поверхневих шарів металу; пластичні деформації поверхневих шарів металу; відносний зсув зрізаного або пластично деформованого поверхневого шару металу [7, 31, 35, 55, 65, 201, 204].

Відомо, що радіус округлення різальної крайки зуба фрези (ρ) змінюється в процесі обробки (табл. 2.5). Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити, що радіус округлення різальної крайки при зустрічному зубофрезеруванні формує поверхневий шар оброблюваного зубчастого виробу і залежить від режимів обробки оброблюваного матеріалу і матеріалу ріжучого інструменту.

Таблиця 2.5 – Радіус скруглення різальної крайки і емпіричні коефіцієнти

Марка оброблюваної сталі	Матеріал інструменту	ρ , мкм	Коефіцієнти					
			a	b	c	p	m	l
45	T15K6	85	0,52	-6,54	1,11	4,2	0,71	0,50
40ХН	T15K6	110	0,52	-6,59	1,15	4,5	0,75	0,50
34ХНМ	T15K6	125	0,50	-5,99	0,97	5,0	0,72	0,40
38ХМЮА	BK8	140	0,70	-7,22	0,53	5,1	0,73	0,35

Результати теоретичних і експериментальних досліджень показують, що зсувна міцність оброблюваного матеріалу в значній мірі залежить від температури в зоні різання і радіуса скруглення різальної крайки інструмента.

Пластичне відтискування оброблюваного матеріалу в зоні різання призводить до збільшення висоти шорсткості, що утворюється.

Дослідження впливу радіуса округлення різальної крайки зубів фрези ρ на параметр шорсткості R_z було проведено при подачах $S = 0,05$ мм/об; $S = 0,1$ мм/об; $S = 0,2$ мм/об; $S = 0,4$ мм/об. Решта умов обробки залишалися на тому ж рівні, що і в попередній серії експериментів.

$$\text{Для } S_{x\phi} = 25 \text{ мм/хв. } R_z = 2 + 500 \cdot \left(2\rho + \sqrt{4\rho - 0,0025} \right) + 3,11 \cdot \sqrt{\rho}. \quad (2.8)$$

$$\text{для } S_{x\phi} = 50 \text{ мм/хв. } R_z = 300 + 500 \cdot \left(2\rho + \sqrt{4\rho^3 - 0,01} \right) + 3,11 \cdot \sqrt{\rho} \quad (2.9)$$

$$\text{для } S_{x\phi} = 100 \text{ мм/хв. } R_z = 91 + 141,5 \cdot \rho + 158 \cdot \left(\sqrt{2\rho - 0,1} \right) + 3,11 \cdot \sqrt{\rho} \quad (2.10)$$

$$\text{для } S_{x\phi} = 200 \text{ мм/хв. } R_z = 179,2 + 130 \cdot \rho + 315 \cdot \left(\sqrt{2\rho - 0,1} \right) + 3,11 \cdot \sqrt{\rho} \quad (2.11)$$

Дані експериментів і розрахунків за отриманими рівняннями наведені на рис. 2.7. Теоретичні залежності достовірно описують ступінь впливу радіуса округлення різальної крайки зубів фрези ρ на утворення шорсткості в залежності від числа зубів фрези. Збільшення радіусу при подачах $S < 0,1$ мм/об призводить не до зменшення, а до збільшення висоти утворюємої шорсткості, що пояснюється збільшенням пластичного відтискування матеріалу. Однак з урахуванням подач за оптимальне значення радіуса, з точки зору забезпечення шорсткості поверхні, слід приймати $\rho = 0,02$ мм.

Експериментальні дослідження теоретичної залежності, яка описує вплив радіуса округлення різальної крайки зубів фрези ρ на утворення шорсткості були проведені при тих же умовах, що і попередня серія експериментів, тільки радіус округлення різальної крайки змінювався: $\rho - 20$ мкм; 30 мкм; 40 мкм; 100 мкм.

Виходячи з цих умов рівняння (2.8) – (2.11) приймуть вид [108, 210, 222]:

$$R_z = k_0 + 11,5 \cdot \sqrt{10^{-3} \cdot \rho}. \quad (2.12)$$

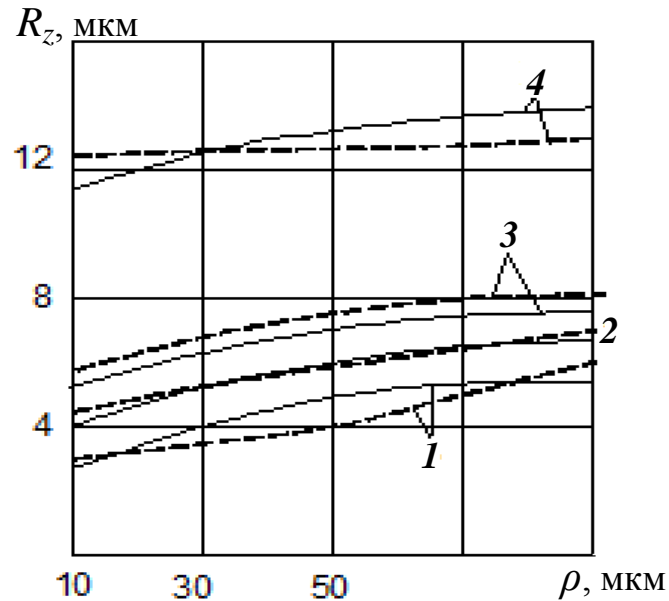


Рисунок 2.7 – Залежність параметра шорсткості R_z від радіуса округлення різальної крайки зубів фрези ρ :

1 – $S = 0,05$ мм/об; 2 – $S = 0,1$ мм/об; 3 – $S = 0,2$ мм/об; 4 – $S = 0,4$ мм/об;
суцільні лінії – теорія; штрихові лінії – експеримент

Значення k_0 для різних подач наступні: для $S_{xв} = 25,0$ мм/хв $\Rightarrow k_0 = 2,0$;
для $S_{xв} = 50,0$ мм/хв $\Rightarrow k_0 = 3,2$; $S_{xв} = 100,0$ мм/хв $\Rightarrow k_0 = 4,05$; $S_{xв} = 200,0$
мм/хв $\Rightarrow k_0 = 10,4$.

Результати розрахунків по (2.12) і дані експериментів, що наведені на рис. 2.14 показують, що збільшення радіусу скруглення різальної крайки приводить до збільшення параметрів шорсткості. Також представляє цікавість явище спадковості, що проявляється в перетворенні шорсткості через неоднорідну твердість і вихідну шорсткість і її відображення в отриманих теоретичних залежностях. Експерименти по визначенню зв'язку шорсткості з глибиною зрізаного шару при різних значеннях неоднорідної твердості Δ_{HB} (0; 10; 30) проводили при подачі $S_{xв} = 25,0$ мм/хв і $\rho = 50$ мкм, решта умов обробки залишалися такими ж, як і в попередніх експериментах.

Отримані результати показують, що вихідна шорсткість поверхні надає значимий вплив на її величину.

З урахуванням попередньої серії досліджень можна стверджувати, що для запобігання шкідливого впливу спадковості на шорсткість поверхні, обробку зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс необхідно проводити на верстатах високої жорсткості.

2.1.3 Аналіз схем різання і обладнання для відновлення коліс з урахуванням жорсткості динамічної верстатної системи і параметрів шорсткості поверхневого шару

Комплексне використання запропонованих принципів створює можливість отримання високопродуктивних процесів зубообробки циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс за умови забезпечення необхідних параметрів якості і точності поверхневого шару оброблюваних зубчастих коліс [12, 13, 18, 20, 128].

Як відомо, жорсткість технологічної системи впливає на продуктивність процесу при досягненні необхідної шорсткості поверхні. Так, при постійних швидкості $v = 2,5$ м/с, радіусі округлення різальної крайки $\rho = 50$ мкм і інших факторах, як і в попередніх експериментах, отримаємо:

$$R_z = 133,11 + 435 \cdot S - 500 \cdot [S \cdot (1 - 0,25 \cdot S)]^{0,5} + \frac{9200 \cdot S^{0,5}}{J_{TC}} . \quad (2.13)$$

Результати розрахунків залежності параметра R_z від жорсткості системи для різних подач і дані експериментальної перевірки, що наведені на рис. 2.8, показують значний вплив жорсткості системи на утворюєму шорсткість. Це вплив зростає зі збільшенням подачі, причому однакова шорсткість може бути отримана при різних подачах. Все це підтверджує

необхідність врахування вибору жорсткості системи при забезпеченні необхідних параметрів шорсткості оброблюваної поверхні.

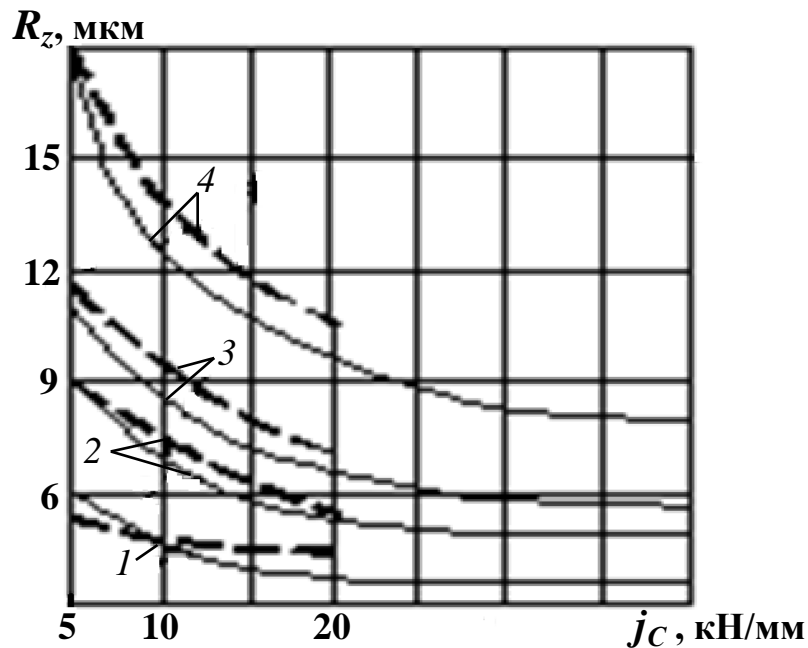


Рисунок 2.8 – Залежність параметра R_z від жорсткості технологічної системи j_C :

1 – $S = 0,04$ мм/об; 2 – $S = 0,08$ мм/об; 3 – $S = 0,15$ мм/об; 4 – $S = 0,25$ мм/об;
суцільні лінії – теорія; штрихові лінії – експеримент

Враховуючи що відносна довжина опорної лінії профілю шорсткості при зубофрезеруванні не залежить від режимів, результати всіх експериментів наведені на одному графіку (рис. 2.9) у вигляді середніх значень і діапазонів їх розсіювання [66, 78, 90, 132, 136]. Порівняння теоретичної і середньої кривої (з 50 експериментів) показує на їх добре співпадання, що підтверджує теоретичні висновки про незалежність t_p від режимів обробки, а експериментальні коливання відносної довжини опорної лінії пояснюються впливом шорсткості ріжучої кромки фрези R_{zbp} , радіуса округлення різальної крайки ρ , жорсткості технологічної системи j_{TC} , нерівномірності твердості Δ_{HB} .

Аналіз теоретичних і експериментальних результатів показує, що висота шорсткості нерівностей циліндричних зубчастих коліс при зустрічному зубофрезеруванні фрезами залежить від режимів обробки, геометрії ріжучої частини фрез, радіуса округлення різальної крайки (ρ) фрези, жорсткості технологічної системи ($J_{ТС}$), фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу і інструменту і від вихідної шорсткості оброблюваної поверхні [130, 137, 142, 145]. Найбільший вплив на утворення шорсткості надає подача $S_{xв}$.

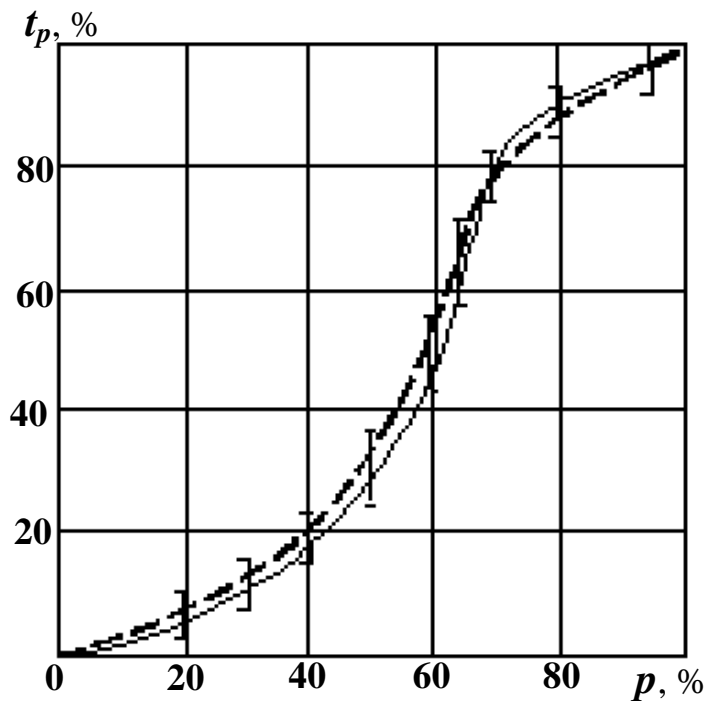


Рисунок 2.9 – Залежність відносної довжини опорної лінії профілю шорсткості t_p від рівня p при зустрічному зубофрезеруванні:

суцільні лінії – теорія; *штрихові лінії* – експеримент

Збільшення границі текучості матеріалу заготовки призводить до зменшення мінімально досягаємої шорсткості оброблюваної поверхні. Для отримання мінімальної шорсткості при чистовому зубофрезеруванні необхідно зменшувати радіус округлення різальної крайки ρ [29, 67, 70, 139, 283].

Приймаючи мінімальний радіус округлення різальної крайки $\rho = 50\text{мкм}$ і $R_{zbp} = 0,5\text{ мкм}$, при $\mu = 0,3$; $E = 19,6\text{ ГПа}$, $\sigma_\tau = 590\text{ МПа}$, при обробці твердим сплавом ВК10ОМ ($\tau_0 = 290\text{ МПа}$), отримаємо мінімальну шорсткість, що утворюється на обробленій поверхні при найменших подачах.

$$R_{z\min} = 500 \cdot \sqrt{1 \cdot 0,05} \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot 29,3}{60} \right) + 0,5 = 3,07 \text{ (мкм)}. \quad (2.14)$$

Таким чином, отримані рівняння досить точно описують фізичні процеси утворення шорсткості. Отримані залежності показують на можливість переходу від швидкісного зубофрезерування до поверхневого пластичного деформування (ППД) накатними конічними роликами [225, 228].

Отримані загальні рівняння інтерпретуються при розрахунку зношеного профілю і параметрів шорсткості відновлених циліндричних зубчастих коліс.

2.2 Організаційні і технічні обмеження, що накладаються на область формування математичної моделі розрахунків при формуванні регламенту відновлення функціональних характеристик крупномодульних зубчастих передач

2.2.1 Оснащення для інтенсивної і високоякісної зубообробки з урахуванням впливу параметрів хвилястості на експлуатаційні властивості відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

Експлуатаційні властивості циліндричних крупномодульних зубчастих коліс в значній мірі залежать від хвилястості їх поверхонь [10, 68, 86, 123]. Основними причинами виникнення хвилястості є динамічні процеси, що протікають при зубообробці зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс на зубообробних верстатах і викликають появу

автоколивань, змушених коливань технологічної системи (ТС). У загальному випадку на утворення хвилястості поверхонь циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс при зубообробці впливають такі чинники: початковий стан поверхневого шару наплавленої поверхні; точність базування і закріплення заготовки зубчастого колеса і фрези; геометрія фрези і кінематика переміщення фрези і оброблюваного циліндричного зношеного і відновленого крупногабаритного зубчастого колеса.

Залежно від методів і режимів зубообробки [82, 93, 124, 131, 133] ступінь впливу перерахованих факторів на утворення хвилястості буде різною. Таким чином, середня висота хвилястості, утворюваною на евольвентній поверхні циліндричного зношеного і відновленого крупногабаритного зубчастого колеса при зубообробці, складається з усіх перерахованих складових відповідно до правил підсумовування випадкових величин.

$$W_z = 1,2 \cdot \sqrt{H_1^2 + H_2^2 + H_3^2} . \quad (2.15)$$

Складова висоти хвилястості H_1 , обумовлена початковим станом поверхневого шару оброблюваної заготовки при зустрічному зубофрезеруванні, виходячи з різниці сил, що діють на інструмент, що викликається різномірністю стану поверхневого шару заготовки і динамікою процесу, як і для шорсткості, може бути визначена за формулою [194, 213, 223, 229]:

$$H_1 = \frac{c_y \cdot S^y \cdot \rho \cdot v^2 \cdot P \cdot \left[H \cdot B_{\max}^n \cdot t^x \cdot p - H \cdot B_{\min}^n \cdot (t - W_{z\text{поч}} - R_{z\text{поч}})^{x p_0} \right]}{H \cdot B_{cp}^n \cdot j_{TC} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2} \right)^2 + T_h \cdot \lambda^2}} , \quad (2.16)$$

де $W_{z\text{поч}}$ – початкова висота хвиль.

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.

При зубообробці коливання фрези [230, 233, 234, 282] щодо оброблюваної поверхні заготовки представляють собою складення радіальних, осьових і дотичних переміщень (рис. 2.10). Коливання фрези можуть бути представлені у вигляді системи з трьома ступенями свободи (поступальний рух уздовж осей x , y і z).

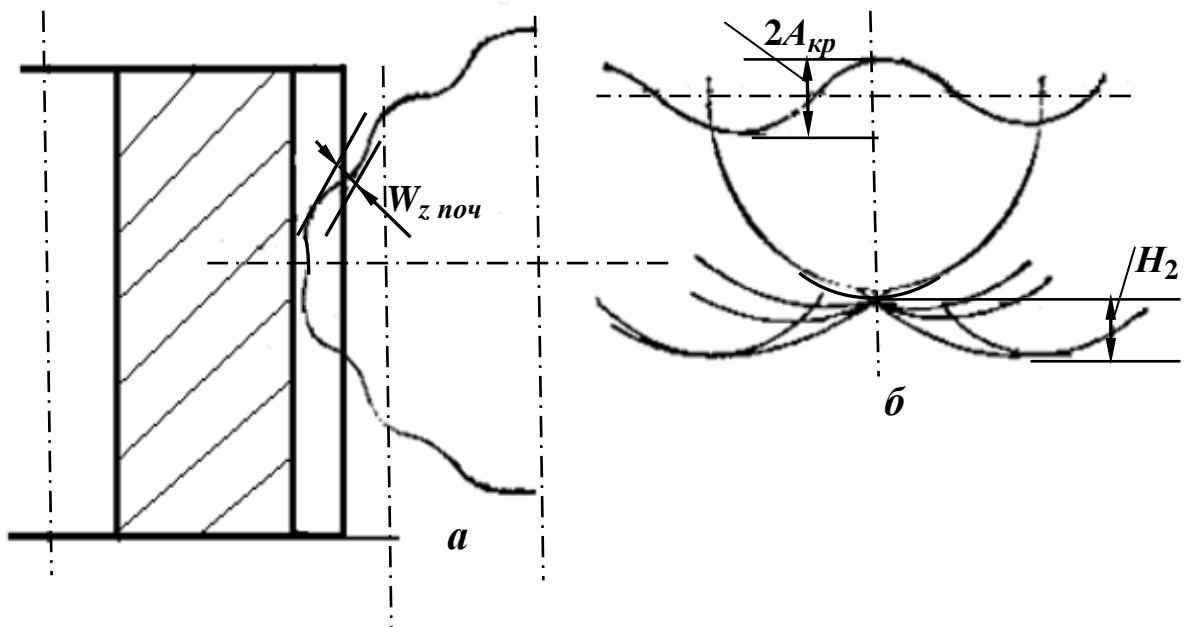


Рисунок 2.10 – Початкова схема для розрахунку складової H_2 при швидкісному зубофрезеруванні:

a – від вимушених коливань фрези; b – від автоколивань фрези

Причому на висоту хвиль, що утворюються, першорядний вплив надаватимуть коливання уздовж осей y і z . Складова H_2 , обумовлена цими коливаннями:

$$H_2 = 2 \cdot C_0 \cdot \left\{ 1 + \cos \left[(n-1) \cdot \frac{180}{n} \right] \right\}, \quad (2.17)$$

де C_0 – амплітуда головного коливання уздовж осі y , яка визначається з наступної рівності:

$$C_0 = \frac{H_1}{2}. \quad (2.18)$$

При швидкісному зубофрезеруванні радіальне биття фрези викликають коливання радіальної сили, що приводить до вимушених коливань осі фрези (рис. 2.17). Складова від цих коливань наступна:

$$H_2 = A_{\text{фр}} \cdot \left\{ 1 - \cos \left[13,2 \cdot \frac{v_D}{t_n} \cdot \sqrt{\frac{1}{A_{\text{кр}}} \cdot \left(\frac{1}{v} + \frac{1}{d} \right)} \right] \right\}, \quad (2.19)$$

де $A_{\text{фр}}$ – амплітуда биття осі фрези; f_n – частота биття.

Зміна радіальної сили різання при швидкісному зубофрезеруванні [139, 146, 148, 151] призводить до нерівномірного зносу фрези і появи хвилястості на оброблюваній поверхні профілю зубчастого колеса.

При ППД обробці складова хвилястості H_2 від биття робочої поверхні ролика і її хвилястості може бути описана через зміну робочого зусилля ΔP .

$$H_2 = R_{\text{рпоч}} \cdot \left\{ \frac{150 \cdot \Delta P \cdot K_{\phi 0} \cdot (1 + f^2)^{0,5}}{\pi \cdot R \cdot t_{\text{мпоч}} \cdot \left[\frac{180 - \arccos \frac{S - a_{nl}}{a_{nl}}}{a_{nl}} \cdot (h_{\text{кін}} - h_{\text{yn}}) - 2 \cdot h_{\text{yn}} \right]} \right\}. \quad (2.20)$$

Приймаючи розподіл складових прирощення зусилля від хвилястості і биття робочого ролика за законом Гауса, маємо:

$$\Delta P = 1,2 \cdot j_{TC} \cdot \sqrt{W_{zp}^2 + \Delta_p^2}, \quad (2.21)$$

де Δ_p – биття поверхні ролика.

При швидкісному зубофрезеруванні форма інструменту і кінематика його переміщення впливають на хвилястість через складові H_1 і H_2 .

Складова H_3 особливо яскраво проявляється при переривчастому швидкісному зубофрезеруванні у вигляді так званої кінематичною хвилястості.

$$H_3 = \frac{D \cdot (1 - \cos \delta)}{2 \cdot \cos \delta}, \quad (2.22)$$

$$\delta = \frac{180 \cdot l_{ок} \cdot V_D}{\pi \cdot V_{кр} \cdot D}, \quad (2.23)$$

де $l_{ок}$ – окружний крок швидкісний фрези.

При ППД обробці НЗ визначається товщиною шару металу, що приводить до утворення напливу в напрямку руху деформуючого елемента, обумовленої кінематикою переміщення і геометрією інструменту.

В процесі обробки перед робочим роликом рухається наплив оброблюваного матеріалу. Висота напливу поступово збільшується, приводячи до збільшення площі контакту деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею, а, отже, до їх пружного віджаття. При досягненні критичної величини напливу ролик прослизає його, викликаючи утворення складової H_3 , і під дією радіальної сили займає своє початкове положення. Потім цей процес повторюється. Величина хвилястості, що утворюється при цьому може бути розрахована за формулою:

$$H_3 = h_{кин} - r \cdot \left[1 - \frac{f \cdot P_x + P_y}{\sqrt{(P_x^2 + P_y^2)(1 + f^2)}} \right], \quad (2.24)$$

де P_x, P_y – осьова сила, що діє на ролик.

Підставляючи (2.16) і (2.17) в (2.15) і здійснивши математичні перетворення, отримаємо рівняння для визначення середньої висоти хвиль при зубофрезеруванні.

$$W_z = 1,2 \cdot \frac{c_y \cdot S^y \cdot \rho \cdot v^2 \cdot P \cdot \left[H \cdot B_{\max}^n \cdot t^x \cdot p - H \cdot B_{\min}^n \cdot (t - W_{zноч} - R_{zноч})^{x_{p_0}} \right]}{H \cdot B_{cp}^n \cdot j_{TC} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2} \right)^2 + T_h \cdot \lambda^2}} \times \\ \times \sqrt{1 + \left\{ 1 + \cos \left[(n-1) \cdot \frac{180}{n} \right] \right\}^2}. \quad (2.25)$$

Оскільки n на два порядки більше 1, то (2.25) прийме вид:

$$W_z = 1,2 \times \\ \times \frac{c_y \cdot S^y \cdot \rho \cdot v^2 \cdot P \cdot \left[H \cdot B_{\max}^n \cdot t^x \cdot p - H \cdot B_{\min}^n \cdot (t - W_{zноч} - R_{zноч})^{x_{p_0}} \right]}{H \cdot B_{cp}^n \cdot j_{TC} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2} \right)^2 + T_h \cdot \lambda^2}}. \quad (2.26)$$

Висота згладжування профілю хвилястості при зубофрезеруванні для нормального закону розподілу визначається з рівності:

$$W_p \approx 0,5 \cdot W_z. \quad (2.27)$$

Використовуючи (2.24), (2.25) і (2.26), при $R_p \text{ поч} = 3R_{a \text{ поч}}$, $h_{\text{кін}} < \rho$ і $f = 0,1$ отримаємо загальне рівняння для розрахунку висоти хвиль при ППД обробці [228, 245, 249]:

$$W_z = 1,2 \cdot \left\{ \left[W_{z \text{ поч}} - \left(\frac{9 \cdot \rho \cdot R_{a \text{ поч}}^2}{\pi \cdot R_{np} \cdot H \cdot B} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 + \left[\frac{27 \cdot R_{a \text{ поч}}^2 \cdot j_{TC} \cdot (W_{zp}^2 + \Delta_p^2)^{\frac{1}{2}}}{\pi \cdot R \cdot t_{m \text{ поч}} \cdot \left(\frac{180 - \arccos \frac{S - a_{nl}}{a_{nl}}}{a_{nl}} \right) \cdot (h_{\text{кін}} - h_{yn}) - 2 \cdot h_{yn}} \right]^2 + h_{\text{кін}}^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.27)$$

Висота згладжування профілю хвилястості при ППД визначається з рівності:

$$W_p = 0,4 \cdot W_z \quad (2.28)$$

Експериментальна перевірка отриманих теоретичних рівнянь була проведена при зубофрезеруванні твердосплавними фрезами, при швидкісному зубофрезеруванні і накатуванні конічними роликками (ППД) циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс модулем $m = 16$ мм зі сталі 40Х.

Дані розрахунків і експериментальної перевірки наведені на рис. 2.11, і рис. 2.12 при $V = 2,5$ м/с; $t = 2,25$ мм; $j_{TC} = 19,6$ кН/мм; $S_{xв} = 50,0$ мм/хв.; $W_z = 16$ мкм; $R_{z \text{ поч}} = 10$ мкм.

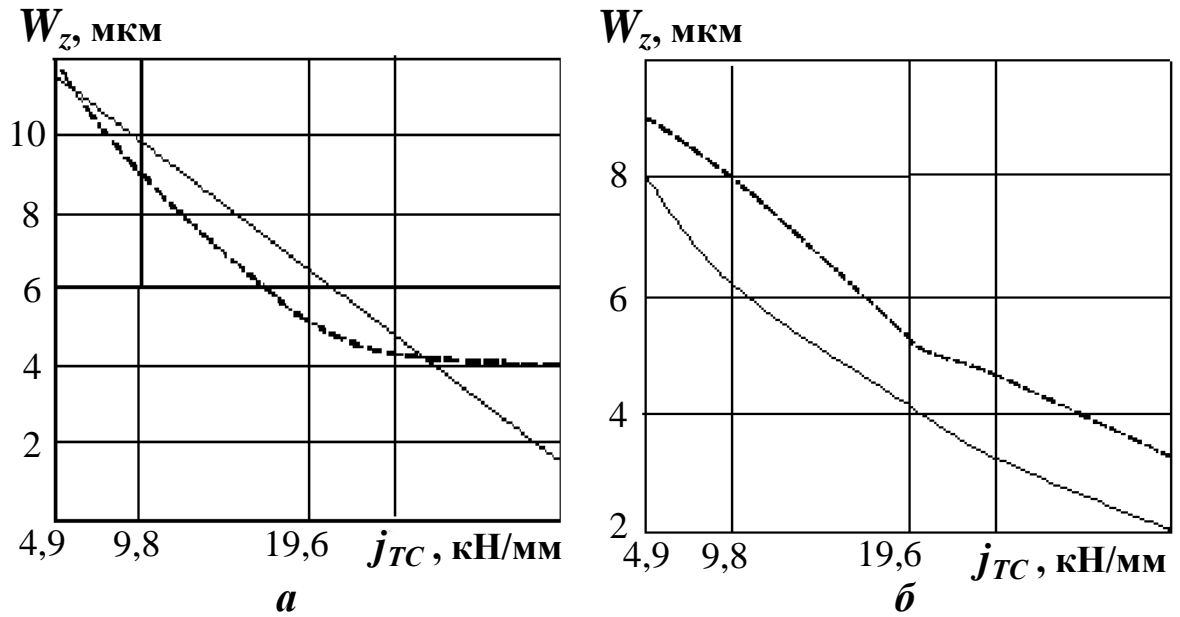


Рисунок 2.11 – Залежність висоти хвиль W_z від жорсткості технологічної системи (j_{TC}) при: *a* – зубофрезерування зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс; *б* – швидкісне зубофрезерування зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс; *суцільні лінії* – теорія; *штрихові лінії* – експеримент

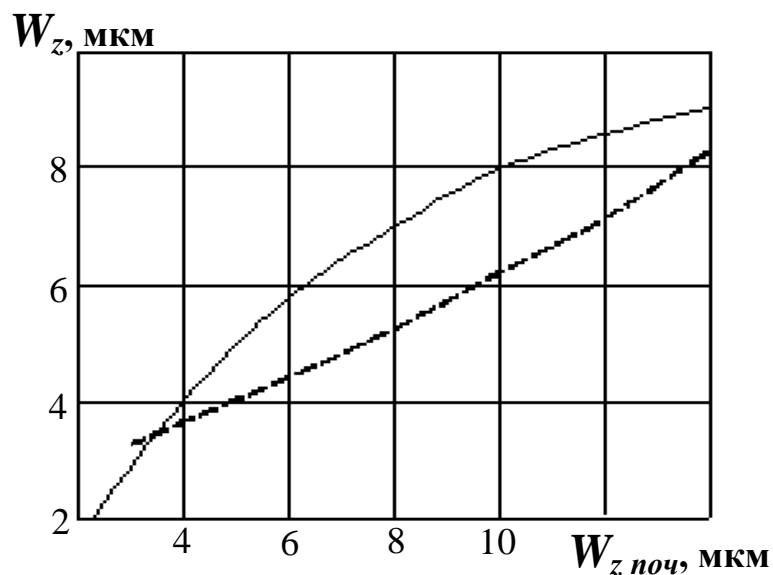


Рисунок 2.12 – Залежність висоти хвиль W_z від її початкової величини при накопченні зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс: *суцільні лінії* – теорія; *штрихові лінії* – експеримент

Аналіз отриманих результатів досліджень показує, що основний вплив на хвилястість при швидкісному зубофрезеруванні і накоченні надають жорсткість системи, швидкість, подача, коефіцієнт формоутворення поверхневого шару.

Як і для шорсткості, явище спадковості особливо яскраво проявляється при ППД: висота утворюємої хвилястості залежить від її початкового значення, величини початкової шорсткості і фізико-механічних властивостей оброблюваного зубчастого колеса. Для зменшення хвилястості при накоченні необхідно забезпечити рівномірність пластичних деформацій в зоні контакту і зменшити величину впровадження конічного ролика в оброблювану поверхню. Це досягається застосуванням інструменту з каплевидним контактом.

2.2.2 Вибір критеріїв оцінки методів відновлення функціональних характеристик крупномодульних зубчастих передач при теоретичному визначенні ступеня зміцнення циліндричних зубчастих коліс

При всіх методах механічної обробки циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс на ступінь їх зміцнення будуть впливати силовий і температурний фактори.

Враховуючи, що майже всі інструменти (фрези, оснащені ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки; ролики), що застосовуються при механічній обробці, мають округлену робочу ділянку із заданою величиною радіуса, для визначення зміцнення поверхневого шару від силового фактора зробимо моделювання робочої частини фрези сферичним індентором [141, 149, 150, 155, 160, 269, 272]. При вдавненні сферичного індентора в поверхню матеріалу, зусилля, що діє на нього, пов'язане з діаметром відбитка.

$$P = m \cdot d_0^n, \quad (2.29)$$

де d_0 – діаметр відбитка; m і n – коефіцієнти, що залежать від властивостей матеріалу.

Виразивши діаметр відбитка через площу пластичного відбитка (A_r), отримаємо:

$$P = m \cdot \left(\frac{4 \cdot A_r}{\pi} \right)^{\frac{n}{2}}. \quad (2.30)$$

Зусилля деформування, відповідно до розробленої теорії контактної взаємодії, визначається наступним чином:

$$P = c' \cdot k \cdot \sigma_T \cdot A_r. \quad (2.31)$$

Підставляючи (2.30) в (2.31), отримаємо рівняння для визначення ступеня зміцнення:

$$k = \frac{m}{0,6 \cdot c' \cdot \sigma_T} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \right)^{\frac{n}{2}} \cdot A_r^{\left(\frac{n-1}{2} \right)}, \quad (2.32)$$

де 0,6 – коефіцієнт, що враховує перехід пластичних деформацій на основу виступів шорсткості.

Таким чином, (2.32) є вихідною формулою для розрахунку ступеня зміцнення при зубофрезеруванні зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс без урахування температурних змін.

Площа A_r в кожному конкретному випадку визначається умовами обробки. Коефіцієнти m і n визначаються при випробуванні на твердість по Роквеллу (HRC) при різних навантаженнях [84, 85, 179, 181, 191, 193, 270, 276]. Так, для деяких матеріалів значення цих коефіцієнтів наведені нижче.

При зубофрезеруванні площа контакту фрези з оброблюваним циліндричним зубчастим колесом, що визначає ступінь зміцнення:

$$A_r = \left[\arccos \left(1 - \frac{\Delta h}{\rho} \right) + h_3 \cdot \frac{\Delta h_{\text{пруж}}}{\sin \alpha} \right] \times \left[\frac{t - R_z}{\sin \varphi} + 4 \cdot \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right) \right], \quad (2.33)$$

де Δh – пружно-пластичний відтискуємий шар оброблюваного матеріалу; h_3 – знос по задній поверхні фрези; $\Delta h_{\text{пруж}}$ – величина пружного відновлення, розраховувана за формулою:

$$\Delta h_{\text{пруж}} = 2,4 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \left(\frac{HB}{E} \right)^2. \quad (2.34)$$

Підставляючи (2.34) в (2.33), отримаємо рівняння для розрахунку площі фактичного контакту інструменту з заготівлею при зубофрезеруванні.

$$A_r = \left[\arccos \left(0,5 - \frac{2 \cdot \tau_0}{\sigma_T} \right) + h_3 + \frac{2,4 \cdot \rho \cdot (1 - \mu^2)}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \right] \times \left[\frac{t - R_z}{\sin \varphi} + 4 \cdot \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right) \right]. \quad (2.35)$$

При швидкісному зубофрезеруванні площа контакту фрези з заготівлею:

$$A_r = \left[\arccos \left(0,5 - \frac{2 \cdot \tau_0}{\sigma_T} \right) + \frac{\pi \cdot \rho \cdot \arccos \left[1 - 24 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \right]}{90} \right] \times \frac{\pi \cdot \rho \cdot \arccos \left(1 - \frac{R_z}{\rho} \right)}{90}. \quad (2.36)$$

При ППД обробці площа фактичного контакту інструменту з заготівлею:

$$A_r = \pi \cdot R \cdot \frac{t_{\text{мпоч}}}{100} \cdot \left(\frac{h_{\text{нл}}}{R_{\text{рпоч}}} \right)^{\nu_{\text{поч}}} \times \left\{ h_{\text{кін}} \cdot \left[\frac{180 - \arccos\left(\frac{S - a_{\text{нл}}}{a_{\text{нл}}}\right)}{180} \right] + h_{\text{пруж}} \cdot \left[1 - \frac{\arccos\left(\frac{S - a_{\text{нл}}}{a_{\text{нл}}}\right)}{180} \right] \right\}. \quad (2.37)$$

Підставляючи (2.35) в (2.32), отримаємо рівняння для розрахунку ступеня зміцнення при лезовій зубообробці від силового фактора.

$$k = \frac{m}{0,6 \cdot c \cdot \sigma_T} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \right)^{\frac{n}{2}} \left\{ \left[\arccos\left(0,5 - \frac{2 \cdot \tau_0}{\sigma_T}\right) + h_3 + \frac{2,4 \cdot \rho \cdot (1 - \mu^2)}{\sin \alpha} \cdot \left(\frac{HB}{E} \right)^2 \right] \times \left[\frac{t - R_z}{\sin \varphi} + 4 \cdot \arccos\left(1 - \frac{R_z}{\rho}\right) \right] \right\}^{\left(\frac{n-1}{2}\right)}. \quad (2.38)$$

Для розрахунку ступеня зміцнення від силового фактора при швидкісному зубофрезеруванні:

$$k = \frac{m}{0,6c \sigma_T} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{\frac{n}{2}} \left\{ \left[\arccos\left(0,5 - \frac{2\tau_0}{\sigma_T}\right) + \frac{\pi \rho \arccos\left(1 - 24\left(1 - \mu^2\right)\left(\frac{HB}{E}\right)^2\right)}{90} \right] \times \left[\frac{\pi \cdot \rho \cdot \arccos\left(1 - \frac{R_z}{\rho}\right)}{90} \right] \right\}^{\left(\frac{n-1}{2}\right)}. \quad (2.39)$$

Взаємозв'язок параметрів поверхонь циліндричних зубчастих коліс з умовами їх обробки фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву, приведено в табл. 2.6. Вплив факторів на параметри якості евольвентних поверхонь циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс при швидкісному зубофрезеруванні фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з мінералокераміки, приведено в табл. 2.7 [152, 153, 157, 158, 268, 274, 277, 281].

Таблиця 2.6 – Взаємозв'язок параметрів поверхонь циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з умовами їх обробки фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву

Умови обробки	Геометричні характеристики обробленої поверхні												Параметри фізико-механічних властивостей поверхневого шару			
	Параметри шорсткості						Параметри хвилястості			Параметри мікрорівдхлення						
	R_a	R_z	R_{max}	S_m	S	t_p	R_p	W_z	W_m	S_{mw}	H_{max}	H_p	$H_{\mu 0}$	h_{μ}	σ_0	h_{σ}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Подача S , мм/хв																
< 50	0	0	0	+	+	0	-	0	0	0	0	0	+	+	+	+
≥ 50	+	+	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+
Швидкість різання v , м/с																
< 0,80	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	+	+	+
$\geq 0,80$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+
Глибина різання, t			+			+			+	+	+	+	+			

Продовження таблиці 2.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Подача на зуб фрези, S_z	+	*	+	+	+	0	+	*	+	+	+	+	+	+	+	+
Зустрічне фрезерування	+	*	+	+	+	+	+	*	+	+	+	+		0	+	*
Попутне фрезерування	-	-	-	0	0		+	*	+	+	+	+	0	0	0	0
Жорсткість системи, ТС	-	-	-			0	-	+	*	0	-	*	*	*	*	*
Границя текучості матеріалу заготовки, σ_m	-	-	-	-	-	0	-	+	+	+	+	+	+	*	*	*
Початкова хвилястість, $W_{z\text{ поч}}$	+	*	+	+	+	-	+	*	0	0	0	0	+	*	*	*
Початкове макровідхилення $H_{\text{max поч}}$	0	0	0	0	0								+	+		
Початкова шорсткість, $R_{z\text{ поч}}$	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0	0	+	+

Примітки (до табл. 2.6 і табл. 2.7):

1. Знак «+» позначає, що збільшення (або зменшення) даної умови обробки сприяє збільшенню чи зменшенню певного параметра якості поверхні.

2. Знак «-» означає, що збільшення (або зменшення) даної умови обробки сприяє зменшенню або збільшенню певного параметра якості поверхні.

3. Знак «0» означає, що зміна даної умови обробки не впливає на певні параметри якості поверхні.

4. Знаком «*» позначені умови обробки, які надають основний вплив на певні параметри якості поверхні.

Причиною деформації поверхневого шару (а отже, і зміцнення) є те, що різання металів здійснюється зубом фрези з радіусом округлення різальної крайки ρ і часткове пружне відновлення незрізаного деформованого металу.

Так, для фрез з прецизійною доводкою по переднім і заднім поверхням, заточених алмазним кругом, радіус округлення різальної крайки зубів фрези $\rho = 3\text{--}10$ мкм; для черв'ячних модульних фрез, виготовлених зі швидкорізальної сталі Р6М5, з зносом по задній поверхні 0,1–0,3 мм радіус округлення різальної крайки зубів фрези $\rho = 20\text{--}60$ мкм; для черв'ячних модульних твердосплавних фрез Т15К6, ВК10ОМ радіус округлення різальної крайки зубів фрези $\rho = 80\text{--}450$ мкм.

Розглянуті фактори, впливаючи на деформацію поверхневого шару, проявляються в залежності від режимів різання, марки оброблюваного та інструментального матеріалів, геометрії інструменту та ін.

Таким чином, метал, який утворює поверхневий шар в процесі різання, зазнає неодноразове пластичне деформування. Це призводить, в свою чергу, до зміни всіх фізико-механічних властивостей і структури металу. Згідно дислокаційної теорії, зміцнення металу при наклепі полягає в концентрації дислокацій близько ліній зрушень. Атомні шари в місці розташування дислокацій пружно спотворені таким чином, що виникає локальний концентратор напружень. При пластичній деформації число дислокацій в металі може збільшитися на кілька порядків. Якщо в недеформованому металі середня щільність дислокацій $j = 10^6\text{--}10^8$ см², то в наклепаному металі вона зростає до $j = 10^{14}$ см². В результаті збільшення щільності дислокацій і взаємодії їх силових полів і відбувається зміцнення металу при пластичній деформації.

Ступінь зміцнення характеризується глибиною пластично деформованого поверхневого шару $h_{\text{пл}}$ і ступенем наклепу N , який визначається за формулою [97, 161, 163, 169, 170, 175, 177, 180, 275, 278]:

$$N = \frac{H_1 - H}{H} \cdot 100\% , \quad (2.40)$$

де H_1 – мікротвердість деталі безпосередньо з поверхні; H – мікротвердість поверхневого шару на глибині залягання $h_{ш}$.

Відповідно до змін, що відбуваються в поверхневому шарі, глибина зміцненого шару визначається або по зміні мікротвердості по перетину деталі, або по зміні характеру інтерференційних ліній на рентгенограмах при пошаровому стравлюванні досліджуваної поверхні.

Стосовно до зустрічного зубофрезерування формула для визначення глибини наклепаного шару має наступний вигляд:

$$h_{ш} = \frac{1 - \sin \beta}{2 \cdot \sin \beta} \cdot \sin \psi_{ков} , \quad (2.41)$$

де $\psi_{ков}$ – кут ковзання.

Кут зсуву β розраховується за формулою:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\cos \gamma}{\xi - \sin \gamma} \cdot \sin \psi_{ков} , \quad (2.42)$$

де ξ – усадка стружки; γ – передній кут фрези.

Швидкість різання виступає як фактор, що визначає швидкість здійснення пластичної деформації поверхневого шару. З підвищенням швидкості деформації, як відомо, відбувається зростання границі міцності і границі текучості конструкційних матеріалів. Підвищення границі текучості знижує пластичність оброблюваного матеріалу і діє в бік зменшення ступеня зміцнення.

Науково-обґрунтований підхід, результати теоретичних досліджень формоутворення параметрів стану поверхневого шару циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс при

зубофрезеруванні, швидкісному зубофрезеруванні, ППД обробкою накатними конічними роликами, математичний їх опис, експериментальна перевірка дають можливість управляти параметрами стану поверхневого шару в залежності від виду обробки [164, 165, 166, 167, 173].

2.2.3 Комплексні параметри оцінки довговічності відновлених крупномодульних зубчастих коліс

Однією з важливих характеристик зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс є здатність відновлення тривалої роботи до 10000–24000 годин без руйнування і відколу зубів, які можуть бути викликані процесами втоми, викришування активних поверхонь і відшаруванням наплавлених поверхневих шарів зубів, абразивним зносом зубів, пластичних деформацій зубів і заїданням [168, 171, 192, 195, 196, 214, 219].

Вплив різних факторів на межу витривалості реальних деталей при проведенні розрахунків на довговічність визначається коефіцієнтом зниження межі витривалості.

$$K_y = \frac{\sigma_{-1(R_z \leq 1)}}{\sigma_{-1Д}}, \quad (2.43)$$

де $\sigma_{-1(R_z \leq 1)}$ – межа витривалості не зміцненого зразка з висотою нерівностей профілю; $\sigma_{-1Д}$ – межа витривалості зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс; K_y – коефіцієнт впливу факторів на опір втоми.

При роботі на стиск або вигин:

$$K_y = \left(\frac{K_\sigma}{K_{d\sigma}} + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 \right) \cdot \frac{1}{K_v \cdot K_A}, \quad (2.44)$$

де K_σ – коефіцієнт зниження межі витривалості внаслідок концентрації напружень; $K_{d\sigma}$ – коефіцієнти, що враховують вплив статичного масштабного фактора; $K_{F\sigma}$ – коефіцієнт, що враховує вплив якості поверхні; K_v – коефіцієнт, що враховує вплив відхилень структури і твердості; K_A – коефіцієнт анізотропії.

Так як в процесі підготовки зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс, вплив на коефіцієнти $K_{d\sigma}$, K_A , K_v виявляється незначний, їх можна прийняти при розгляді рівними одиниці, а значення коефіцієнта K_y записати у вигляді:

$$K_y = K_\sigma + \frac{1}{K_{F\sigma}} - 1 . \quad (2.45)$$

Створення поверхневого шару призводить до зміни границі витривалості:

$$K_{F\sigma} = \left[(1,05 \div 1,20) - 0,0005 \cdot \sigma_{Внов} \right] , \quad (2.46)$$

яка, з урахуванням допущення:

$$K' \approx \frac{\sigma_{Внов}}{\sigma_B} , \quad (2.47)$$

і того, що K' при механічних методах зубообробки коливається в межах $K' = (1,0 \div 1,4)$, а при розрахунках на міцність зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс приймається межа міцності на вигин $\sigma_B = 1380$ МПа, запишеться в вигляді:

$$K_{F\sigma} = 0,75 \cdot K' . \quad (2.48)$$

Коефіцієнт зниження межі витривалості K_σ в приблизних розрахунках можна прийняти:

$$K_\sigma = 1 + g \cdot (\alpha_\sigma - 1), \quad (2.49)$$

де α_σ – коефіцієнт концентрації напружень; g – коефіцієнт чутливості металу до концентрації напружень.

$$\alpha_\sigma = 1 + \frac{200}{t_m \cdot S_m} \cdot \left[2 \cdot R_{\max} \cdot (R_{\max} - R_p) \right]^{0,5}. \quad (2.50)$$

$$g = (\gamma \cdot \rho)^{0,2}, \quad (2.51)$$

де γ – безрозмірний коефіцієнт, що залежить від відношення величини (σ_T / σ_B) ; ρ – радіус скруглення нерівності, що є концентратором напружень.

$$K_\sigma = 1 + \frac{900 \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_{\max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m}. \quad (2.52)$$

Підставивши значення (2.48), (2.52) в (2.45) отримаємо [222, 232, 238, 240]:

$$K_y = \frac{1}{0,75 \cdot K'} + \frac{67,5 \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_{\max}^{0,5} \cdot R_p^{0,5} \cdot \gamma^{0,2}}{t_m \cdot W_a^{0,2} \cdot S_m}. \quad (2.53)$$

Виконаємо підстановку (2.52) в (2.48) і розв'яжемо його так, щоб в правій частині виявилися параметри, що формуються при підготовці стану поверхневого шару зразків, а в лівій – які не залежать від забезпечення.

$$\frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) = \frac{K' \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m}. \quad (2.54)$$

Позначимо праву частину через комплексний параметр D_T , що характеризує зниження порога втоми в залежності від якості підготовки опорних поверхонь ріжучих пластин.

$$D_T = \frac{K' \cdot S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m \cdot t_m} . \quad (2.55)$$

Ліву частину позначимо D_K (конструкторське значення параметра).

$$D_K = \frac{1}{7,5 \cdot \gamma^{0,2}} \cdot \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) . \quad (2.56)$$

У практичних розрахунках визначення впливу параметрів забезпечення на втому ріжучих пластин для матеріалів, наведених в табл. 2.8, співвідношення $\sigma_T / \sigma_B = 0,9$ і при застосуванні механічних методів обробки $t_m \approx 0,55$; $\rho \approx (2 \div 5)$; $\gamma \approx (0,3 \div 0,5)$; $K' \approx (1,1 \div 1,3)$.

Найбільш зручно вираз (2.56) записати у вигляді:

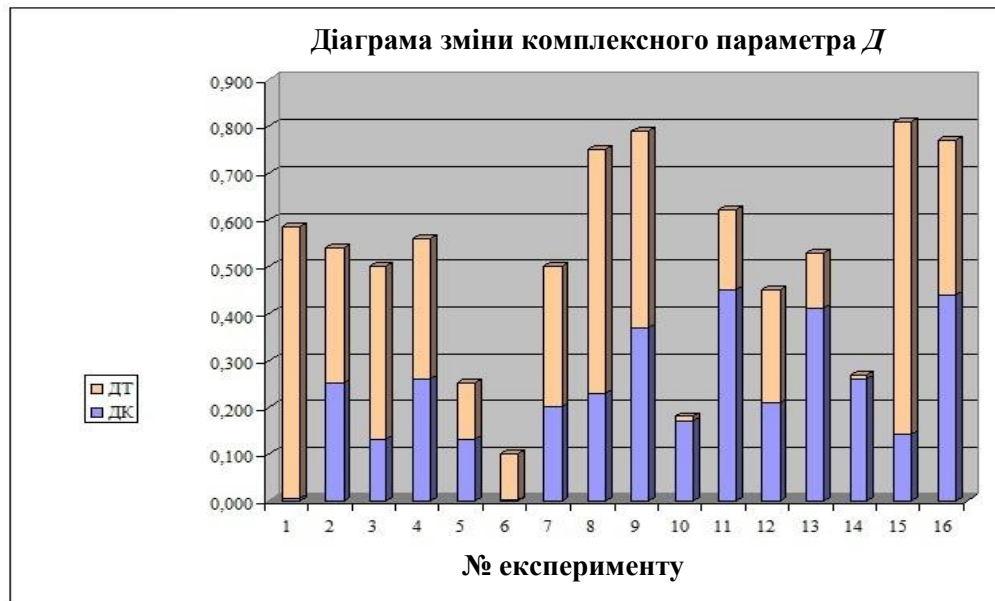
$$\frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} = 0,1 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) . \quad (2.57)$$

Тоді:

$$D_T = \frac{S_{mw}^{0,4} \cdot R_a}{W_a^{0,2} \cdot S_m} , \quad (2.58)$$

$$D_K = 0,1 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{D-1}} - 1 \right) . \quad (2.59)$$

З метою перевірки теоретичних результатів були проведені експериментальні дослідження [243, 244, 247, 279]. Результати дослідження і розрахунку параметрів D_K і D_T наведені в табл. 2.8 і показані на рис. 2.13.

Рисунок 2.13 – Діаграма зміни комплексного параметра D Таблиця 2.8 – Результати дослідження і розрахунку параметрів D_K і D_T

№ експерименту	W_a , мкм	R_a , мкм	S_{mw} , мкм	S_m , мкм	D_K	D_T
1	5	0,63	1200	16	0,004	0,580
2	5	0,63	1200	32	0,250	0,290
3	5	2,5	1200	100	0,130	0,370
4	5	2,5	1200	125	0,260	0,300
5	5	0,63	2800	62	0,130	0,120
6	5	0,63	2800	125	0,001	0,100
7	15	2,5	1200	100	0,200	0,300
8	5	2,5	2800	100	0,230	0,520
9	5	2,5	2800	125	0,370	0,420
10	15	0,63	2800	125	0,170	0,010
11	15	0,63	2800	62	0,450	0,170
12	15	2,5	1200	125	0,210	0,240
13	15	0,63	1200	62	0,410	0,120
14	15	0,63	1200	125	0,260	0,010
15	15	2,5	2800	62	0,140	0,670
16	15	2,5	2800	125	0,440	0,330

2.2.4 Комплексні параметри оцінки стану поверхонь відновлених крупномодульних зубчастих коліс

Забезпечення експлуатаційних властивостей зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс вирішується за рахунок визначенням комплексних параметрів, які враховують фізичну картину експлуатації, вважаються безрозмірними величинами і включають в себе ті параметри якості поверхні, які здійснюють основний вплив на процес експлуатації зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс [83, 91, 134, 176, 178, 183, 188, 189].

Зношені і відновлені крупногабаритні зубчасті колеса припускають тривалу експлуатацію в умовах максимальних навантажень знакозмінного характеру. При відновленні крупногабаритних зубчастих коліс необхідно забезпечити такий стан контактируємих евольвентних поверхонь, яке гарантувало б мінімальний знос при експлуатації зубчастих коліс, а так само сталість коефіцієнта тертя.

Рівняння для розрахунку інтенсивності зносу і коефіцієнта тертя в період прироблення [187, 197, 220, 239, 241]:

$$J_h = \frac{2,5\nu^2 R_a^{\frac{2}{3}}}{n\lambda(\nu+1)S_m t_m^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{P}{K' \sigma_T} \sqrt{15\pi \left(2\pi W_z H_{\max}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left[1 + \frac{2\pi K' \sigma_T (1-\mu^2)}{E}\right]}, \quad (2.60)$$

$$f_h = \frac{\tau_0}{c K' \sigma_T} + \beta + \frac{4\alpha_\Gamma R_a^{\frac{2}{3}}}{S_m t_m} \sqrt{\frac{60\pi}{t_m} \left(\frac{2\pi P W_z H_{\max}}{K' \sigma_T}\right)^{\frac{1}{3}} \left(1 + \frac{2\pi K' \sigma_T (1-\mu^2)}{R_a E}\right)}. \quad (2.61)$$

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

$$J = \frac{2,5\pi \cdot \nu^{0,5} P^{\frac{7}{6}}}{n \cdot \lambda \cdot (\nu + 1) t_m^{\frac{3}{2}} \cdot (K' \sigma_T)^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{30 \cdot (1 - \mu^2) (2\pi R_a W_z H_{\max})^{\frac{1}{3}}}{E \cdot S_m}}, \quad (2.62)$$

$$f = \frac{\tau_0}{c K \sigma_T} + \beta + \frac{8\alpha_{\Gamma} (K' \sigma_T)^{\frac{1}{3}}}{t_m} \cdot \sqrt{\frac{30 (1 - \mu^2) (2\pi P R_a W_z H_{\max})^{\frac{1}{3}}}{E \cdot S_m \cdot t_m}}, \quad (2.63)$$

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.

Мінімальний лінійний знос і стабільність коефіцієнта тертя буде забезпечуватися в разі виконання умов:

$$J_h \leq J, \quad (2.64)$$

$$f_h \leq f. \quad (2.65)$$

Виконавши ці умови таким чином, щоб в правій частині виявилися параметри, що залежать від забезпечення, а в лівій – ті з них, на які процес обробки не впливає, отримаємо:

$$\frac{2\pi \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K' \cdot (S_m - R_a)}. \quad (2.66)$$

Величиною R_a , що стоїть в знаменнику правої частини можна знехтувати, так як при механічних методах обробки вона на два порядки менше величини S_m (у формулі значення в мікрометрах):

$$\frac{2\pi \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E} = \frac{R_a}{K \cdot S_m} . \quad (2.67)$$

Запишемо ліву частину (2.83) у вигляді комплексного параметра I , що характеризує умова рівномірного зносу в різних стадіях обробки:

$$I = \frac{R_a}{K \cdot S_m} . \quad (2.68)$$

Значення комплексного параметра, що забезпечує необхідну умову, визначиться з виразу:

$$[I] = \frac{2\pi \cdot \sigma_T \cdot (1 - \mu^2)}{E} . \quad (2.69)$$

Проведено експеримент на машині тертя «МІ-1М» над зразком з наплавленої сталі 40Х і 38ХМЮА за допомогою масштабного фактора [225, 236, 244, 248, 251, 254, 261]. В якості контртіла застосовувалася сталь 34ХНМ. Швидкість відносного руху зразків 0,2 м/с. Результати експерименту показують, що при виконанні умови $I \leq [I]$ спостерігається менший лінійний знос і найбільш стабільне значення коефіцієнта тертя. Експериментальні дані по інтенсивності зносу і коефіцієнту тертя після 3 хвилин приробітку зразків з контртілом зі сталі 34ХНМ наведені в табл. 2.9 для середніх значень і трьох експериментів.

Таблиця 2.9 – Експериментальні дані по інтенсивності зносу

Матеріал наплавленого шару зразка	Умови проведення експерименту і значення параметрів тертя			
	$I \leq [L]$		$I \geq 2[L]$	
	Лінійний знос	Коефіцієнт тертя	Лінійний знос	Коефіцієнт тертя
40X	0,006	0,64	0,03	0,26
38ХМЮА	0,0012	0,51	0,012	0,14

Загальні закономірності зношування евольвентних зубчастих передач враховують вплив приведенного радіуса кривизни, стану наплавленого поверхневого шару (шорсткість евольвентної поверхні, хвилястість, параметри макровідхилення, мікротвердість, залишкові напруги поверхневого шару), тиску, питомого ковзання і створення умов самовідновлення евольвентного профілю зубчастого колеса за рахунок ефекту виборчого перенесення.

Зміни цих факторів визначають розподіл зносу за профілем зуба. Теоретичний розподіл зносу профілю зуба передбачає відсутність зносу в полюсі зачеплення, де відносне ковзання зубів дорівнює нулю.

Однак, на відміну від теоретичного розподілу, знос в полюсі, як показує аналіз експериментальних даних, може бути суттєвим. На рис. 2.14 представлені сили зачеплення в циліндричній зубчастій передачі і еюра зносу зуба шестерні циліндричної зубчастої передачі (отримана на підставі аналізу дослідних даних).

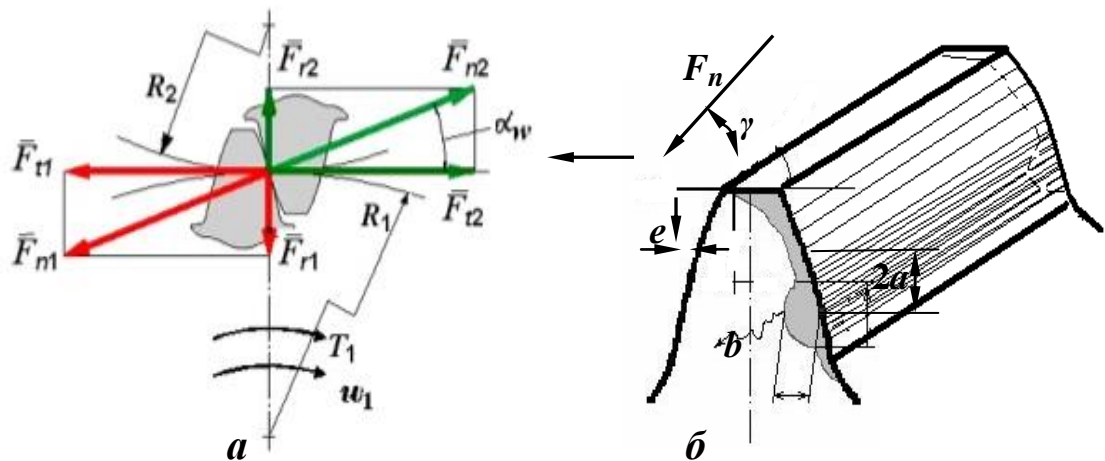


Рисунок 2.14 – Сили зачеплення в циліндричній зубчастій передачі (а);
і еюра зносу зуба шестерні циліндричній зубчастій передачі (б)

Знос оцінювався по зміні товщин зуба, виміряних в 10 точках профілю від ніжки до головки зуба. Становить певний інтерес знос в зоні полюса. Результати стендових випробувань показали, що на профілі зуба шестерні в процесі зношування утворюється виїмка, а на сполученому зубі колеса – виступ. Підвищений знос спостерігався на голівці зуба.

За ступенем зносу або пошкодженості робочої поверхні зуба зазвичай оцінюють ресурс передачі.

Ресурс закритих передач визначається пітінгом, причому площа не повинна перевищувати 30 % площі робочої поверхні зуба при глибині пітінгов понад 10 % товщини зуба.

Для відкритих передач граничним зносом при оцінці ресурсу з точки зору згинальної міцності, напруги вигину і стиску зуба (рис. 2.15) є знос, рівний 0,3 модуля ($0,3m$).

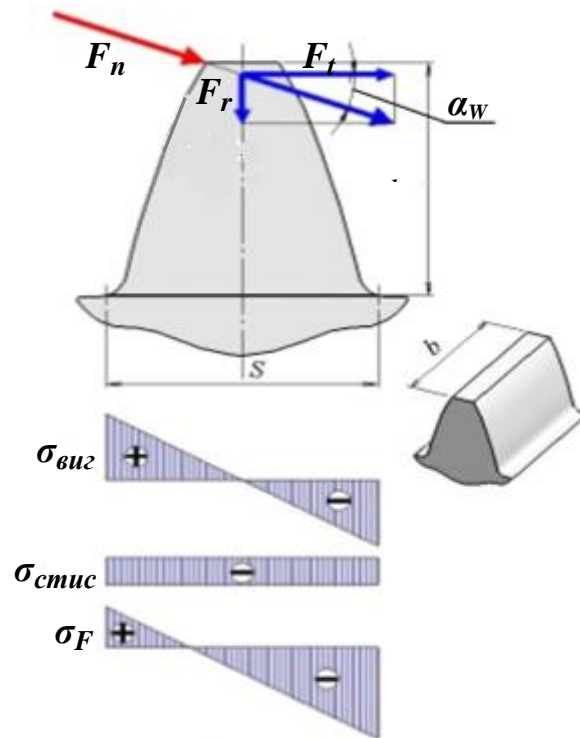


Рисунок 2.15 – Напряга вигину і стиску зуба при передачі навантаження

Порушення кінематичної точності спостерігається при зносі, що перевищує $0,025m$. Знос провокує зародження і розвиток тріщин під дією напружень розтягнення. Після того, як утворюється магістральна тріщина, її зростання визначається значенням коефіцієнта інтенсивності напруження [234, 242, 253, 259].

2.2.5 Критерії формування якісних характеристик поверхневого шару зубів при чистовий зубообробці відновлених крупномодульних коліс

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 [51, 108, 174, 198, 199, 216, 258].

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 [92, 99, 215, 222]:

$$C_x = \frac{H_p \cdot W_p \cdot (0,75 \cdot R_z)^4}{S_m^6 \cdot k^{-12}}, \quad (2.70)$$

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:

$$C_x = 3375 \cdot \left[\frac{\sigma_\tau \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^6, \quad (2.71)$$

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.

Висновки до розділу 2

1. Встановлено і науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки стану поверхонь, довговічності, мінімально можливих пластичних деформацій зубів зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс після лезової обробки.
2. Забезпечені експлуатаційні властивості зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс пов'язано із забезпеченням параметрів стану поверхневого шару зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості.
3. Розглянуті теоретичні аспекти взаємозв'язку параметрів стану поверхневого шару зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з умовами їх обробки.
4. Встановлен взаємозв'язок параметрів стану поверхневого шару зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з умовами їх обробки в математичних рівняннях, які є основою при розробці алгоритмів і програми з метою отримання оптимальних умов обробки з урахуванням забезпечення потрібних параметрів стану поверхневого шару відновлених крупногабаритних зубчастих коліс, виходячи з їх експлуатаційних властивостей.
5. Визначені пластичні відтискування при механічній обробці відновлених зубчастих коліс та розроблен регламент радіуса округлення різальної крайки інструмента, який змінюється в процесі формоутворення робочих поверхонь і залежить від оброблюваного наплавленого матеріалу і ріжучого леза інструменту.
6. Розроблен науково-обґрунтований метод обробки зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс, який враховує експлуатаційні і вартісні показники, і в значній мірі визначає можливості забезпечення якості відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

7. Удосконалена система параметрів: R_a , R_p , R_{\max} , t_m , S_m і S на підставі теоретичних досліджень для оцінки шорсткості поверхонь зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс через які можуть бути визначені всі інші параметри: v , b , t_p , p_m , ρ , ρ'_m , Δ , що використовуються в розрахунках контактної взаємодії та втомної міцності відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

3.1 Математична модель прогнозування структури і параметрів систем зубообробки крупномодульних зубчастих коліс після відновлення

Задачі моделювання процесів оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки крупногабаритних зубчастих коліс пропонується вирішувати методами впливу з урахуванням специфічних умов формоутворення зубчастих коліс [243, 244].

Аналіз причин виходу з ладу зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс показав, що в 90 % руйнування крупногабаритних зубчастих коліс починається з поверхневого шару через появу мікротріщин, абразивного зносу, викришування активних поверхонь зубів, відшаровування поверхневого шару зубів, прогресуючого заїдання, пластичних деформацій зубів [267, 273].

При зубофрезеруванні евольвентної поверхні зубчастого колеса переміщення ріжучого леза інструмента з початкового положення в кінцеве положення під дією керуючих впливів може бути здійснено за різними траєкторіями в рамках техніко-економічних обмежень. Кожній траєкторії відповідає певне значення критерію оптимальності. Геометрія проекрованої передачі визначається параметрами початкового контуру інструмента і його зміщеннями при нарізанні коліс передачі. Тому при проектуванні, перш за все, слід задати початковий виробляючий контур інструменту і вибрати розрахункові зміщення. Якщо циліндричне зубчасте колесо нарізається рейковим інструментом, то верстатне зачеплення розглядають в торцевій площині, перпендикулярній осі зубчастого колеса. Таке зачеплення є

зачепленням рейкового початкового виробляючого контуру з колесом, що нарізується.

Задача оптимального управління процесом зубообробки крупномодульних зубчастих коліс диференційно апроксимується на два етапи:

- *перший* (рис. 3.1) пов'язаний з обґрунтуванням вибору значень параметрів режиму різання, що задовольняють заданому критерію якості, параметрів формування товщини зрізаного шару (глибини різання);
- *другий* (рис. 3.2) передбачає управління режимами різання з метою підтримки оптимального значення показника критерію якості в умовах дії на процес збурюючих впливів.

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 в I блоці, розрахункових зусиль різання і пластичних деформацій в зоні обробки, розрахунку залишкових напруг і глибини наклепу, температур, швидкостей зносу різальних крайок зуба фрези в зоні обробки в II блоці і розрахунку стану параметрів шорсткості обробленої поверхні зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс розроблений алгоритм багатокритеріальної оптимізації формоутворення зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

У тому випадку, коли основними показниками оцінки режимів різання є забезпечення точності обробки та якості поверхневого шару, як критерій оцінки процесу використовують коефіцієнт функціонального формування поверхневого шару – K_p .

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 $K_p = f\left(\frac{a}{\rho}, R_z, t_m(k), H, \mu_0, \sigma_0, h, H, \mu\right)$ і оброблюваності матеріалу C_v .

Враховуючи, що зустрічне зубофрезерування нестабільне через переривчастого характеру різання, товщини зрізаного шару (a_i), що постійно змінюється, зі зміною кута ковзання ($\Psi_{ков}$) товщина шару, що знімається, виходить змінною по перетину зрізу [146, 273].

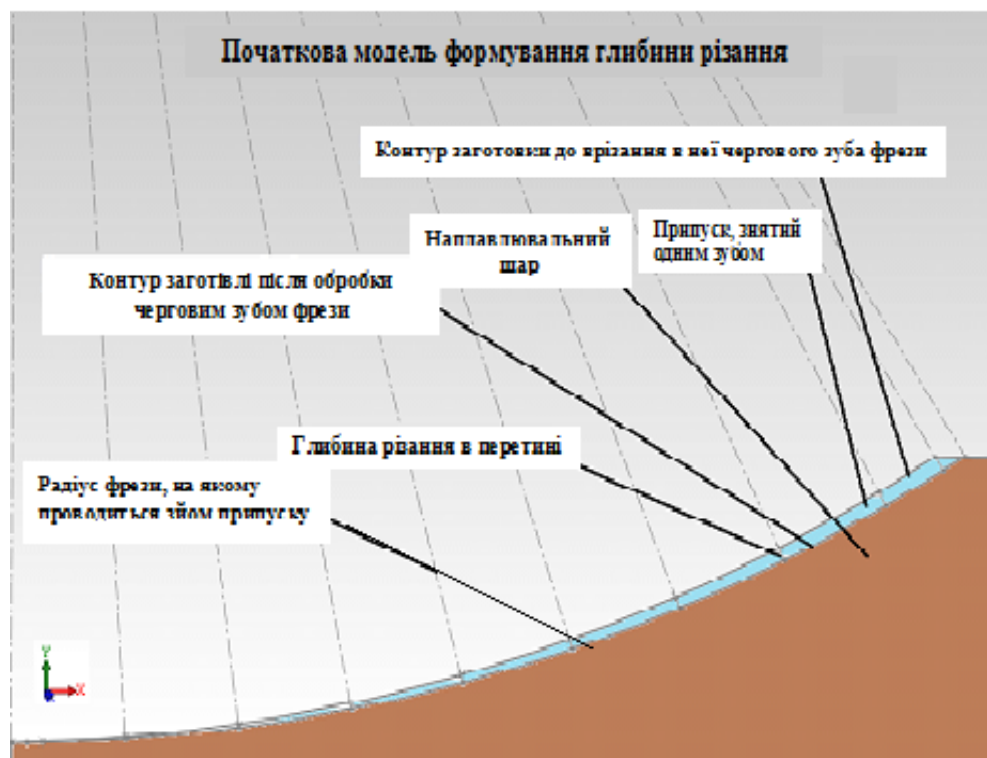


Рисунок 3.1 – Початкова модель формування процесу формоутворення при відновленні крупногабаритних зубчастих коліс після наплавки

Товщина шару, що зрізається після

$$a_i = S_z \cdot \sin \psi_{ков} \cdot \sin \varphi, \quad (3.1)$$

де S_z – подача на зуб; φ – кут профілю зуба фрези в нормальному перерізі

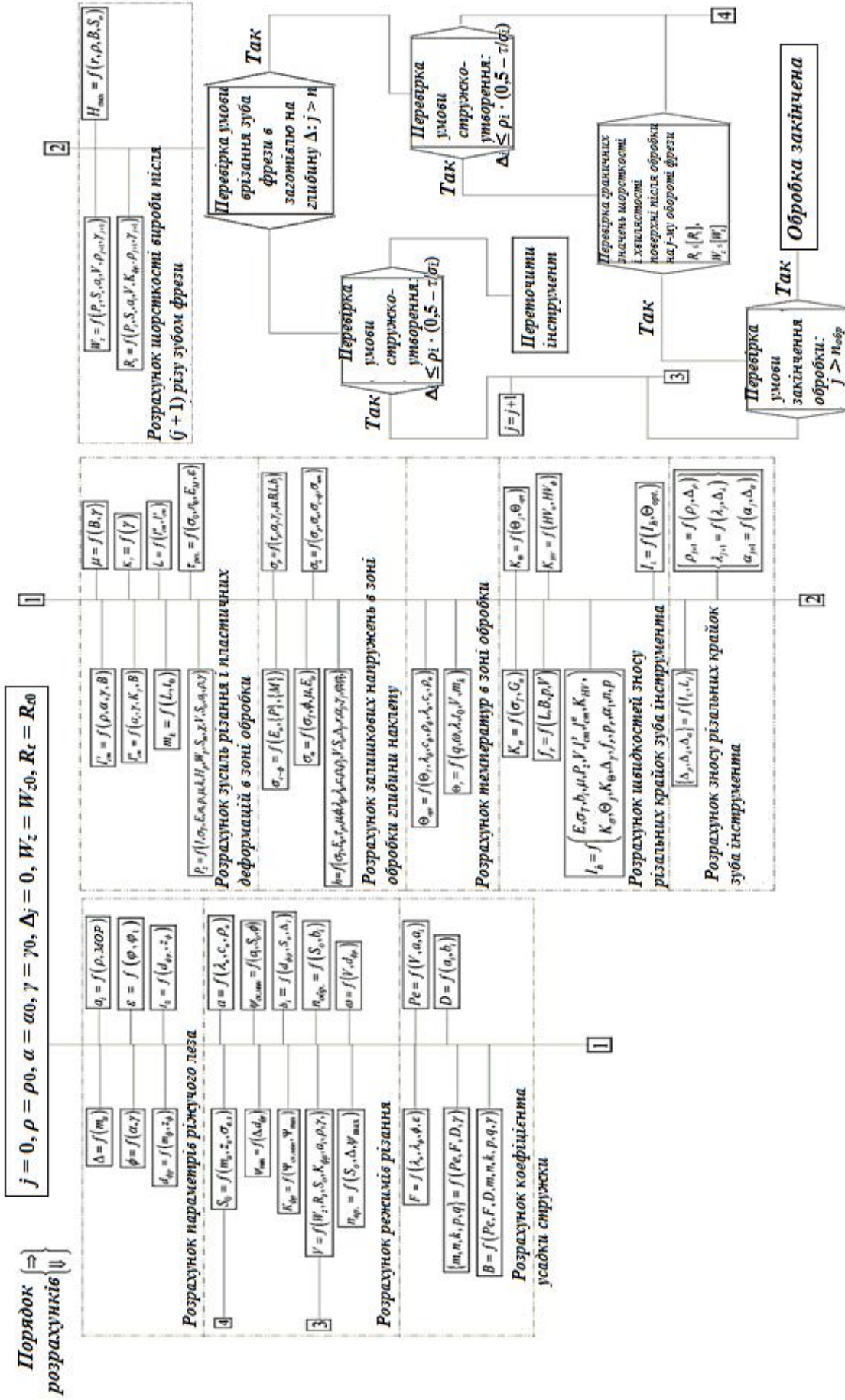


Рисунок 3.2 – Блок-схема управління процесом формування після наплавки зубів

Мінімальні значення кутів ковзання без мастильно-охолоджуючої рідини (MOP):

$$\Psi_{ков} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi} . \quad (3.2)$$

Мінімальні значення кутів ковзання із застосуванням MOP:

$$\Psi_{ков} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi} . \quad (3.3)$$

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 зубообработки через коефіцієнт функціонального формування поверхневого шару K_ρ [?].

$$K_\rho = \frac{\sin \psi_{max} - \sin \psi_{ков}}{\sin \psi_{max}} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Підставляючи в (3.4) параметри обробки, отримаємо зручний для теоретичних і експериментальних досліджень вираз коефіцієнта ефективності функціонального формування поверхневого шару K_ρ .

$$K_\rho = \left[1 - \frac{\arcsin \left(K_{MOP} \cdot \frac{\rho_i \cdot z \cdot 10^3 \cdot V}{S_m \cdot \pi \cdot D \cdot \sin \varphi} \right)}{\arcsin \frac{2 \cdot \sqrt{H \cdot (D - H)}}{D}} \right] \cdot 100\% , \quad (3.5)$$

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

Період стійкості (T) інструменту визначається з (3.5).

$$T = C_v^{\frac{1}{m}} \cdot \frac{K_\rho}{v^{\frac{1}{m}} \cdot S_y^{\frac{v}{m}} \cdot t_x^{\frac{v}{m}}} . \quad (3.6)$$

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 [?].

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

$$\dots = \frac{10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot S_m^{\frac{3}{2}} \cdot k^{-3}}{H_p^{\frac{1}{4}} \cdot W_p^{\frac{1}{4}}} , \quad (3.7)$$

де R_z – висота нерівностей профілю по десяти точках (мм); R_a – середнє арифметичне відхилення профілю (мм); W_z – висота згладжування профілю хвилястості по десяти точках (мм); P_z – головна складова сили різання (Н); S_z – подача на зуб (мм/зуб); a_i – товщина шару, що зрізається (мм); ρ – радіус

округлення різальної крайки (мм); V – швидкість різання (м/с); γ – передній кут фрези (град.); K_ρ – коефіцієнт ефективності функціонального формування поверхневого шару; 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 – питоме навантаження, що припадає на геометричну площу контакту; H_p – висота згладжування макровідхилення; W_p – висота згладжування профілю хвилястості; S_m – середній крок нерівностей; $k(H_{\mu 0})$ – ступінь зміцнення.

Рівняння (3.7) адекватно описує процес формоутворення. Отримані дані використовуються в якості технічних обмежень по системі параметрів поверхневого шару зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості при виборі методів і режимів обробки [146, 182, 244].

$$\left. \begin{aligned} T_{\min} &\leq T \leq T_{\max}; \\ v_{\min} &\leq v \leq v_{\max}; \\ S_{\min} &\leq S \leq S_{\max}; \\ K_{\rho \min} &\leq K_\rho \leq K_{\rho \max}; \\ R_{z \min} &\leq R_z \leq R_{z \max} \end{aligned} \right\} . \quad (3.8)$$

Залежності (3.6), (3.7) використовуються для параметрів формоутворення. Фізичні величини, що входять в систему (3.8), розглядаються як математичні очікування відповідних випадкових величин, а саме вираження представляється як багатofакторна кореляційна залежність, справедлива в області існування з певною точністю і надійністю.

Особливе значення має інформація про частотні властивості процесу формоутворення поверхневого шару зубчастих коліс.

При врізанні зуб фрези ковзає по оброблюваній поверхні на куті ковзання $\Psi_{ков}$ при $\alpha_i \ll K_{MOP} \cdot \rho$ (рис. 3.3); при $\alpha_i < K_{MOP} \cdot \rho$ відбувається

пластичне деформування поверхневого шару без зняття припуску (рис. 3.4); при $\alpha_i = K_{MOP} \cdot \rho$ (рис. 3.5) – початок процесу стружкоутворення на куті ковзання $\Psi_{ков}$, що відповідає початку формування поверхневого шару; при $\alpha_i > K_{MOP} \cdot \rho$ (рис. 3.6) – початок стійкого процесу стружкоутворення з формуванням поверхневого шару протягом часу контактування зуба фрези до повного виходу з контакту з оброблюваною поверхнею на куті Ψ_{max} .

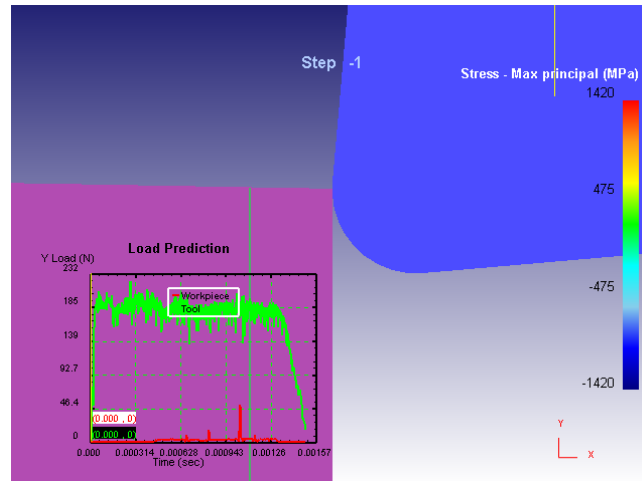


Рисунок 3.3 – Формування поверхневого шару зубообробної фрезою

при $\alpha_i \ll K_{MOP} \rho$

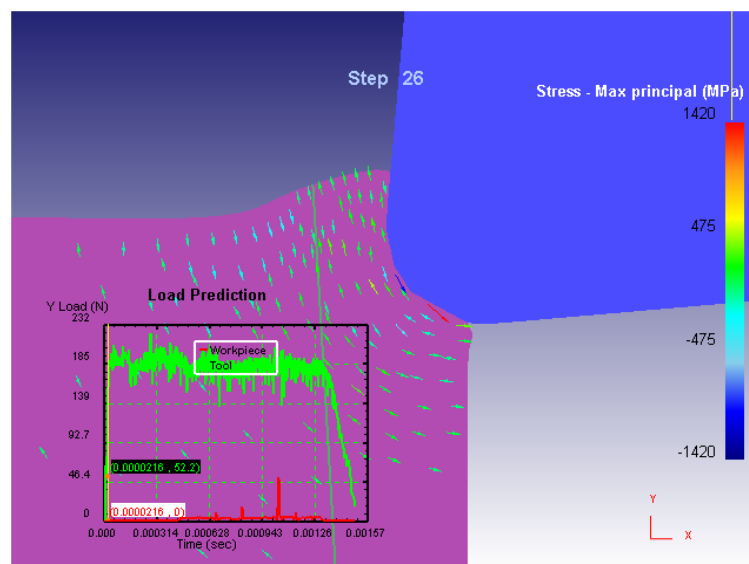


Рисунок 3.4 – Формування поверхневого шару зубообробної фрези

при $\alpha_i < K_{MOP} \cdot \rho$

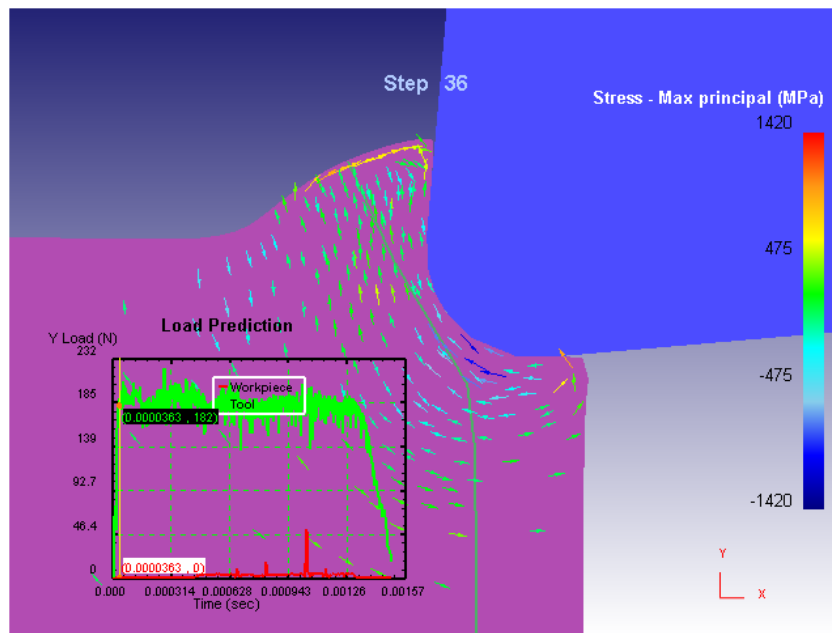


Рисунок 3.5 – Формування поверхневого шару зубообробної фрези

$$\text{при } \alpha_i = K_{MOP} \cdot \rho$$

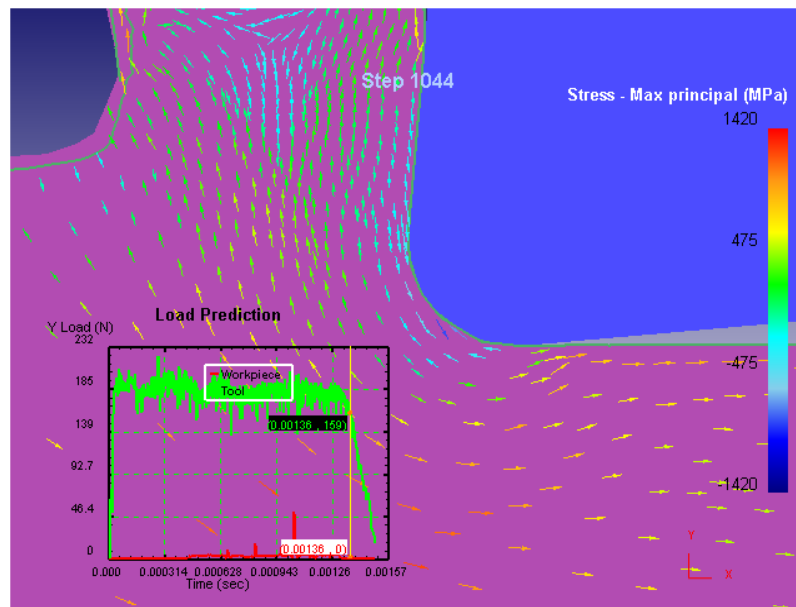


Рисунок 3.6 – Формування поверхневого шару зубообробної фрези

$$\text{при } \alpha_i > K_{MOP} \cdot \rho$$

Співвідношення кутів ковзання $\Psi_{ков}$ і найбільшого кута контакту зуба фрези Ψ_{max} з оброблюваною поверхнею визначає ефективність процесу формування поверхневого шару при відновленні крупногабаритних зубчастих коліс.

3.1.1 Моделювання параметрів поверхневого шару з метою зниження утомного викришування і запобігання поломки зубів відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

При роботі евольвентної зубчастої передачі робочі поверхні зубів одночасно обкатуються і ковзають один по одному (рис. 3.7 (а, в)), вектори окружних швидкостей змінюються. У полюсі зачеплення (рис. 3.7 (б)) відносне ковзання профілів відсутнє. Різниця окружних швидкостей викликає відносне ковзання профілів зубів шестерні і колеса (рис. 3.7 (а, в)). Відносне ковзання поверхонь зубів викликає появу сили тертя [184, 273].

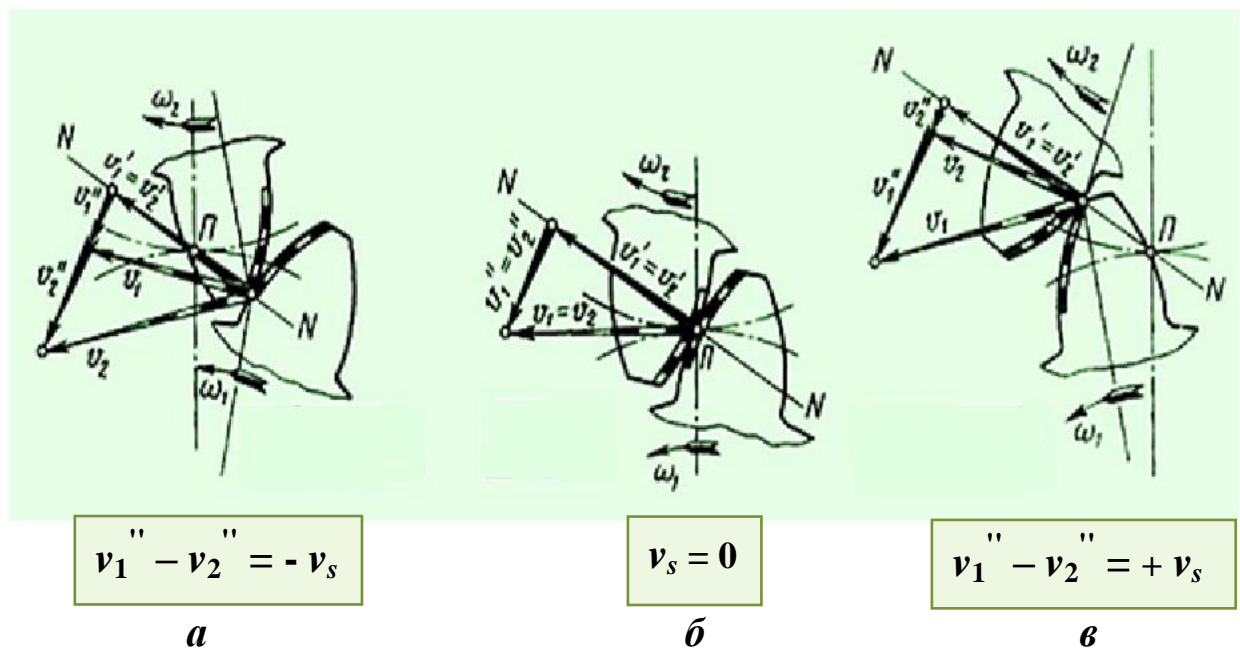


Рисунок 3.7 – Ковзання зубів в процесі роботи передачі:

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

Правильно спроектована і виготовлена передача при виконанні всіх правил експлуатації не повинна перегріватися і виробляти при роботі сильного шуму. Поява значного перегріву і надмірного шуму свідчить про недоліки в роботі передачі, пов'язані з її конструкцією, виготовленням, неправильним вибором мастильного матеріалу або можливими ушкодженнями зубів.

Спостерігаються наступні види руйнування зубів: утомне викришування робочих поверхонь зубів, поломка зубів, зношування, заїдання, змінання робочих поверхонь зубів.

Утомне викришування робочих поверхонь зубів, яке, як правило, виникає поблизу початкової окружності колеса на ніжці зуба, є основним видом руйнування закритих, добре змазаних передач. Причиною є змінні контактні напруги на поверхні зубів (σ_H), під дією яких розростаються мікротріщини, що призводить до утворення оспінок, що переходять в раковини. Викришування призводить до підвищення контактного тиску і порушення роботи передачі. У відкритих передачах поверхневі шари стираються раніше, ніж в них з'являються утомні тріщини, тому викришування з'являється досить рідко.

Основні заходи попередження викришування: визначення розмірів коліс з розрахунку на утому за контактними напруженнями; підвищення твердості матеріалу шляхом термообробки; підвищення ступеня точності виготовлення зубів і забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару контактируємих зубчастих коліс.

Утомне викришування визначає здатність робочих поверхонь зубів, що знаходяться в контакті, чинити опір дії сил, що прагнуть їх zdeформувати [103].

$$j = \frac{P_{num}}{Y_{kn}}, \quad (3.9)$$

де P_{num} – питоме навантаження, що припадає на геометричну площу контакту; $Y_{кл}$ – контактні переміщення.

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:

$$P_i = c' \cdot \sigma_T \cdot A_{ri}, \quad (3.10)$$

де A_{ri} – площа контакту одиничного виступу.

Підставляючи вираз A_{ri} в формулу (3.10), отримаємо:

$$Y_{i\text{ нл}} = \frac{P_i}{c' \cdot \sigma_T \cdot \left(\frac{\pi \cdot t_m \cdot S_m \cdot t_{m\text{нод}} \cdot S_{m\text{нод}}}{4 \cdot 10^4 \cdot R_{\rho}^{n_{\text{нон}}} \cdot R_{\rho\text{нод}}^{n_{\text{нод}}}} \right)^{\frac{n_{\text{нон}} \cdot n_{\text{нод}}}{n_{\text{нон}} + n_{\text{нод}}}}}. \quad (3.11)$$

Вище було показано, що під дією сили P_i відбувається не тільки пластична деформація вершини виступу, але і пружне переміщення утвореної зони пластичних деформацій в основний метал, величина якого для еліпсної площадки контакту може бути виражена таким рівнянням:

$$Y_{np} = \frac{1 - \mu^2}{\pi \cdot E} \int \frac{p_0}{r_i} dA_{ri} = \frac{1 - \mu^2}{\pi \cdot E} \int_0^{\pi} d\varphi \int p_0 dr_i, \quad (3.12)$$

де $p_0 = c' \cdot \sigma_T$ – тиск на фактичній площадці контакту.

Виконуючи інтегрування і ряд математичних перетворень, отримаємо:

$$Y_{np} = 4 \cdot \frac{1 - \mu^2}{\pi \cdot E} \cdot k(e) \cdot a' \cdot c' \cdot \sigma_T, \quad (3.13)$$

де $k(e)$ – еліптичний інтеграл першого роду; e – ексцентриситет еліпсний площадки контакту; a' – менша напіввісь еліпса.

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{a'}{c'}\right)^2} =$$

$$= 1 - \left\{ \frac{t_m S_m R_{\rho n_{nod}}^{\frac{1}{n_{nod}}}}{t_{mn_{nod}} S_{mn_{nod}} R_{\rho}^{\frac{1}{n_{non}}}} \cdot \frac{P_i}{c' \cdot \sigma_T \cdot \left(\frac{\pi \cdot t_m S_m t_{mn_{nod}} S_{mn_{nod}}}{4 \cdot 10^4 \cdot R_{\rho}^{\frac{1}{n_{non}}} R_{\rho n_{nod}}^{\frac{1}{n_{nod}}}} \right)^{\frac{n_{non} \cdot n_{nod}}{n_{non} + n_{nod}}}} \right\}^2 \quad (3.14)$$

$$a' = \frac{t_m \cdot S_m}{200} \cdot \frac{P_i}{R_{\rho} \cdot c' \cdot \sigma_T \cdot \left(\frac{\pi \cdot t_m \cdot S_m \cdot t_{mn_{nod}} \cdot S_{mn_{nod}}}{4 \cdot 10^4 \cdot R_{\rho}^{\frac{1}{n_{non}}} \cdot R_{\rho n_{nod}}^{\frac{1}{n_{nod}}}} \right)^{\frac{n_{non} \cdot n_{nod}}{n_{non} + n_{nod}}}} \cdot \frac{1}{n_{non}} \quad (3.15)$$

Звідси рівняння для визначення сумарного переміщення вершини виступу матиме такий вигляд:

$$Y_i = \frac{P_i}{c' \cdot \sigma_T \cdot \left(\frac{\pi \cdot t_m \cdot S_m \cdot t_{mn_{nod}} \cdot S_{mn_{nod}}}{4 \cdot 10^4 \cdot R_{\rho}^{\frac{1}{n_{non}}} \cdot R_{\rho n_{nod}}^{\frac{1}{n_{nod}}}} \right)^{\frac{n_{non} \cdot n_{nod}}{n_{non} + n_{nod}}}} +$$

$$+2k(e) \frac{1-\mu^2}{E} c' \sigma_T \frac{t_m S_m}{100} \left[\frac{P_i}{R_\rho c' \sigma_T \left(\frac{\pi \cdot t_m \cdot S_m \cdot t_{mnod} \cdot S_{mnod}}{4 \cdot 10^4 \cdot R_\rho^{n_{non}} \cdot R_{\rho nod}^{n_{nod}}} \right)^{\frac{n_{non} \cdot n_{nod}}{n_{non} + n_{nod}}}} \right]^{\frac{1}{n_{non}}} \cdot (3.16)$$

Задача про переміщення вершин виступів значно ускладнюється при розгляді контакту між двома виступами. Контакт двох виступів, різних за формою і за фізико-механічними властивостями призводить до впровадження однієї нерівності в другу, а, отже, площа фактичного контакту буде визначатися не площею перерізу кожного виступу на рівні його пластичної деформації, а площею перерізу виступу, що впровадився, на відстані величини зближення, що визначається його пластичною деформацією $Y_{i\text{пл}}$.

Експериментальні дослідження показали [180, 185, 194], що при першому навантаженні контактуючих поверхонь досить великий відсоток варіювання контактної жорсткості доводиться на поверхневу мікротвердість $H_{\mu 0}$, тоді як при повторних навантаженнях контактна жорсткість в основному визначається геометричними параметрами R_a , R_p , ρ_m , W_z і W_p . Причому при повторних навантаженнях характеристики хвилястості (W_z і W_p) надають більший вплив на контактні переміщення, ніж при першому навантаженні.

Зміна взаємного розташування слідів обробки на контактуючих поверхнях зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс з паралельного на перпендикулярне веде до перерозподілу значимості впливу окремих параметрів стану цих поверхонь на контактну жорсткість. Так, якщо при взаємно паралельному розташуванні слідів обробки на сполучених

поверхнях найбільший відсоток варіювання контактної жорсткості пов'язаний з висотними параметрами R_a , R_p , W_z і W_p , то при взаємно перпендикулярному розташуванні слідів обробки найбільший вплив на контактну жорсткість надає поперечний радіус мікронерівностей. Слід зазначити, що при взаємно перпендикулярному розташуванні слідів обробки на сполучених поверхнях подовжній радіус мікронерівностей надає незначимий вплив на їх контактну жорсткість.

Таким чином, результати теоретичних і експериментальних досліджень контактної жорсткості деталей машин показали, що вона визначається геометричними параметрами: макровідхилення H_{\max} , H_p ; хвилястості W_z , W_p , S_{mw} ; шорсткості R_a , R_p , S_m , t_p ; взаємним розташуванням слідів обробки; ступенем зміцнення $k(H_{\mu 0})$; фізико-механічними властивостями матеріалів контактуючих деталей E , μ , σ_T і умовами їх роботи. Основний вплив на контактну жорсткість надають при першому навантаженні: $k(H_{\mu 0})$, H_p , W_p , R_r ; при повторних навантаженнях: H_p , W_p , R_p , і S_m . Це вказує на широкі можливості плосковершинних і обробно-зміцнюючих методів обробки зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс на згладжуючих режимах в підвищенні контактної жорсткості як при першому, так і при повторних навантаженнях і обробно-зміцнюючої обробки на зміцнюючих режимах при першому навантаженні.

3.1.2 Математична модель параметрів поверхневого шару з метою зниження пластичних деформацій і абразивного зносу відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

У зоні контакту, де матеріал піддається сильному всебічному стискуванню, виникають пластичні деформації зубів [146, 185]. Сили тертя викликають переміщення поверхневих шарів матеріалу в напрямку вектора швидкості ковзання. При цьому на поверхні провідних зубів поблизу

полюсной лінії утворюється – западина, на поверхні ведених зубів рейок – виступ. Особливо значні пластичні деформації мають місце у зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс, виконаних з матеріалів з невисокою твердістю активних поверхонь зубів [273].

Як міру боротьби з пластичними деформаціями, можна рекомендувати збільшення твердості поверхонь зубів і здатність поверхневих шарів профілів зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс чинити опір взаємному переміщенню при дії навантажень.

Коефіцієнт тертя визначає здатність поверхневих шарів деталей чинити опір взаємному переміщенню при дії тангенціальних навантажень. Він впливає на ККД машин, надійність роботи фрикційних пар і міцність посадок з натягом.

Коефіцієнт тертя визначається як відношення дотичній сили (сили тертя) P_k до нормальної сили P [182, 183]:

$$F = \frac{P_k}{P} . \quad (3.17)$$

Згідно молекулярно-механічної теорії тертя коефіцієнт тертя визначається як сума молекулярної і механічної складових [184, 244]:

$$f = \frac{\tau_0}{p_r} + \beta + 0,4 \cdot a_r \cdot \sqrt{\frac{h}{\rho}} , \quad (3.18)$$

де τ_0 – питома зсувна міцність молекулярних зв'язків [108]; p_r – середній контактний тиск; β – коефіцієнт зміцнення молекулярних зв'язків під дією стискаючих напруг; a_r – коефіцієнт гістерезисних втрат при ковзанні [109]; h – глибина взаємного упровадження мікронерівностей контактуючих деталей; ρ – радіус заокруглення вершин мікронерівностей.

У викладеній вище теорії контактної взаємодії було показано, що тиск на фактичних площадках контакту визначається фізико-механічними властивостями поверхневого шару більш пластичного матеріалу:

$$p_r = c \cdot k_1' \cdot \sigma_T . \quad (3.19)$$

Питома зсувна міцність молекулярних зв'язків також визначається фізико-механічними станом поверхневого шару контактуючих деталей:

$$\tau_0 = \frac{U_a}{j \cdot N_A} - \frac{k \cdot T}{j} \ln \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} , \quad (3.20)$$

де U_a – енергія активації; j – активаційний об'єм (10^{-27} м³); $\varepsilon_0 = 10^{12}$ – 10^{13} – для всіх металів; ε – швидкість деформації (10^{-4} – 10^{-6} с⁻¹); N_A – число Авогадро ($6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹); k – стала Больцмана ($1,38 \cdot 10^{-23}$); T – температура в зоні контакту.

Глибина взаємного упровадження мікронерівностей в період приробляння визначається загальними контактними деформаціями деталі з більш пластичного матеріалу. У період нормального (сталого) зносу величина упровадження визначається пружними контактними деформаціями.

Математична обробка експериментальних даних дозволила отримати рівняння для визначення шорсткості поверхні тертя, що відповідає різним зонам тертя [184, 273].

I. Зона рідинного тертя:

$$R_a < 0,39 \cdot v^{0,19} \cdot (0,1 \cdot N)^{-0,66} . \quad (3.21)$$

II. Зона граничного тертя:

$$0,43 \cdot v^{-0,43} \cdot (0,1N)^{-0,3} > R_a \geq 0,39 \cdot v^{0,19} \cdot (0,1 \cdot N)^{-0,66} . \quad (3.22)$$

III. Зона схоплювання:

$$R_a \geq 0,43 \cdot v^{-0,43} \cdot (0,1 \cdot N)^{-0,3} . \quad (3.23)$$

Результати проведених досліджень показали, що для граничного тертя при рясному мастилi зі зменшенням шорсткості, коефіцієнт тертя також зменшується і оптимум по шорсткості відсутній в діапазоні всіх досліджуваних швидкостей ($v = 0,3-1,5$ м/с). При переході з однієї зони в іншу досить чітко проявляється оптимум по шорсткості, особливо для невисоких швидкостей ковзання і великих навантажень.

Так, при невисоких швидкостях ковзання ($v < 0,3$ м/с) і великих навантажень ($N > 300$ Н) оптимальною шорсткістю є $R_a = 2,0$ мкм. Для швидкостей ковзання $0,3 \text{ м/с} \leq v < 1,5 \text{ м/с}$ і навантажень $N > 100$ Н оптимум по шорсткості зміщується до $R_a = 0,8$ мкм.

Абсолютно ясно, що ці значення шорсткості є оптимальними тільки для даних умов тертя. Для інших умов тертя будуть свої оптимальні значення шорсткості, однак зі збільшенням швидкості ковзання оптимум буде зміщуватися до її менших значень. Аналіз результатів досліджень переконливо показує, що шорсткість значною мірою впливає на утворення гідродинамічного клину і його товщину в зоні тертя ковзання. Так, емпіричне рівняння товщини масляної плівки, яка утворюється між сферичним індентором і шорсткою поверхнею, має такий вигляд:

$$\varepsilon = 5,5 \cdot R_a \cdot 0,53 \cdot (0,1 \cdot N) - 0,55 . \quad (3.24)$$

Кореляційний аналіз рівняння показує, що товщина цієї плівки на 35% визначається шорсткістю поверхні зразка. Таким чином, результати експериментів переконливо показують, що шорсткість поверхні тертя в

значній мірі визначає можливість утворення гідродинамічного клину, що виявляє вплив на контактні переміщення при терті ковзання, товщину клина, вид тертя і значення коефіцієнта тертя для всіх швидкостей і навантажень в області граничного тертя.

Абразивний знос полягає в стиранні активних поверхонь зубів, істотно залежить від величини питомого тиску, відносної швидкості ковзання, стану активних поверхонь зубів, можливості попадання в передачу абразивних частинок. Наявність зносу викликає спотворення профілю зуба і може привести до істотного послаблення ніжки зуба. Спотворення профілів викликає зростання динамічних навантажень і напружень біля основи зуба, а також зниження згинальної міцності зубів.

Однією з причин виходу з ладу закритих зубчастих передач при абразивному зношуванні є невідповідний вибір мастила. У відкритих передачах абразивне зношування є прогресуючим видом руйнування.

У зношених передачах підвищуються зазори в зачепленні і, як наслідок, посилюються шум, вібрація, динамічні навантаження, спотворюється форма зуба, зменшуються розміри поперечного перерізу, а значить і міцність зуба.

Основні заходи попередження зносу – підвищення твердості поверхні зубів, технологічне забезпечення параметрів поверхневого шару зубів крупногабаритних зубчастих коліс в залежності від видів зносу, захист від забруднення, застосування спеціальних масел. У розрахунку на контактну витривалість абразивний знос враховується заниженням контактних напруг, що допускаються. Процес тертя значною мірою зумовлює зносостійкість контактуючих деталей. Зносостійкість характеризується здатністю поверхневих шарів деталей чинити опір руйнуванню при терті ковзання, терті кочення, а також при мікропереміщеннях, обумовлених впливом вібрацій (фреттинг-процес).

Знос деталей машин призводить до втрати точності, зниження ККД, зниження міцності, збільшення динамічних навантажень, які є наслідком збільшення зазорів в місцях сполучень, підвищенню шуму. Знос є

причиною виходу з ладу переважної більшості машин (до 80 %) і їх деталей [193].

У відповідності зі сформованим поданням про процес прироблення контактуючих поверхонь деталей, одним з його результатів є утворення рівноважної шорсткості, яка не залежить від вихідної і визначається тільки умовами тертя [184]. При досягненні рівноважної шорсткості контактні переміщення стабілізуються, коефіцієнт тертя і інтенсивність зносу стають мінімальними, що можливо при реалізації пружного контакту взаємодіючих тіл. Однак, як було показано вище, несуча здатність поверхні деталей, їх коефіцієнт тертя і інтенсивність зносу при терті ковзання поряд з шорсткістю, визначаються макровідхиленням, хвилястістю і фізико-механічними властивостями (мікротвердість і залишкові напруги). Тому очевидно, шорсткість поверхні тертя, що утворюється в процесі прироблення буде залежати від інших параметрів стану поверхневого шару контактуючих деталей.

Отже, досягнення так званої рівноважної шорсткості, що залежить тільки від умов тертя, можливо після тривалого процесу роботи контактуючих циліндричних зубчастих коліс, коли будуть стабілізовані всі параметри стану поверхневого шару, що характеризують їх несучу здатність, коефіцієнт тертя і зносостійкість. Це вказує на необхідність введення поняття «рівноважний стан поверхневого шару контактуючих деталей» і відповідної оцінки цього рівноважного стану. Вперше поняття «оцінка рівноважного стану поверхневого шару деталей» були дані в роботах [273], згідно з якими рівноважний стан поверхонь тертя характеризується параметром C_x :

$$C_x = \left(R_p^v \cdot W_p^2 \cdot H_p^2 \right)^{\frac{1}{v+4}} \cdot \frac{k' \left(6 + \frac{1}{v+4} \right)}{\rho_m} . \quad (3.25)$$

Значення C_x розраховується за формулою:

$$C_x = \frac{0,5 \cdot \tau_0^4 \cdot \sigma_T^{\left(\frac{1}{v+4}-6\right)}}{\pi^2 \cdot \left(\frac{1-\mu^2}{E}\right)^2 \cdot a_r^4 \cdot (1,7 \cdot p)^{\frac{1}{v+4}}} . \quad (3.26)$$

Приймаючи $v = 2$, $3R_a = R_p$ і підставляючи цей вираз в (3.25), отримаємо:

$$C_x = \frac{H_p \cdot W_p \cdot R_p^4}{S_m^6 \cdot k_1^{-12}} . \quad (3.27)$$

Значення комплексного параметра, що забезпечує необхідну зносостійкість, може бути розраховане за формулою:

$$C_x = 3375 \cdot \left[\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1-\mu^2)} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^6 \quad (3.28)$$

Результати експериментальних досліджень підтверджують правильність наведених вище гіпотез і рівнянь, необхідність введення комплексного параметра для оцінки стану контактуючих поверхонь зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс. Аналіз результатів досліджень, стосовно до реальних деталей вузлів тертя, показує, що криві зносу не матимуть явно вираженого переходу від прироблення до нормального зносу, як це спостерігалось при випробуваннях зразків.

Наявність на реальних поверхнях тертя зношених крупногабаритних зубчастих коліс макровідхилення, хвилястості, шорсткості, залишкових напруг і мікротвердості, обумовлених їх виготовленням, призводить до значної зміни класичної кривої зносу. Причому часто допустима величина лінійного зносу деталей, що труться значно менше товщини поверхневого шару зі зміненим станом. У процесі тертя і зносу крупногабаритних зубчастих коліс, як правило, відбувається поступове зменшення макровідхилення і хвилястості поверхонь, що труться, а, отже, збільшення їх

контурної і номінальної площі контакту, що призводить до збільшення площадок контакту і зменшення фактичних напружень на цих площадках. Це повинно викликати поступове і повільне зменшення інтенсивності зносу і нахилу кривої зносу. Одночасно по мірі зносу в роботу вступають нові поверхневі шари, що мають інші фізико-механічні властивості, що може призводити до значного відхилення кривої зносу від загального характеру її зміни – в сторону збільшення або зменшення.

Таким чином, результати теоретичних і експериментальних досліджень коефіцієнта тертя і зносостійкості зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс показали, що вони визначаються геометричними параметрами (макрівідхилення, хвилястість, шорсткість); ступенем зміцнення; поверхневими залишковими напруженнями; фізико-механічними властивостями матеріалів контактуючих деталей; умовами їх роботи (навантаження, швидкості ковзання, температури, мастила). Це вказує на широкі можливості обробно-зміцнюючих методів обробки в підвищенні зносостійкості деталей машин.

3.1.3 Математичне моделювання достовірності виникнення заїдання зубів шляхом формування параметрів поверхневого шару крупногабаритних зубчастих коліс після відновлення

Такий вид руйнування як заїдання зубів характерний для важконавантажених і швидкохідних передач.

При високому питомому навантаженні відбувається місцевий розрив масляної плівки, нагрів і молекулярне зчеплення сполучених поверхонь з утворенням слідів задиру в напрямку ковзання зубів [182, 194].

Зазвичай заїдання відбуваються внаслідок видавлювання масляної плівки між зубів при спільній дії високих тисків і швидкостей.

Результати теоретичних дослідження показують, що для оцінки шорсткості поверхонь зношених і відновлюваних крупногабаритних

зубчастих коліс досить мати наступну систему параметрів: R_a , R_p , R_{\max} , t_m , S_m і S , через які можуть бути визначені всі інші параметри: v , b , t_p , p_m , p , p'_m , Δ , що використовуються в розрахунках контактної взаємодії та втомної міцності твердих тіл.

Що стосується хвилястості, під якою слід розуміти нерівності поверхні з кроком, більшим базової довжини l , використовуваної для вимірювання шорсткості, то до теперішнього часу вона не регламентована ДСТУ.

Врахування хвилястості призводить до значної зміни відносної опорної кривої поверхні, яку можна побудувати, розглядаючи шорсткість і хвилястість як незалежні складові або розглядаючи їх спільно [146, 183, 244]. Враховуючи, що хвилястість, як і шорсткість, в залежності від методів і умов експлуатації мають різну форму і різний розподіл виступів по висоті, для оцінки їх несучої здатності можна будувати опорні криві хвилястості, початкова ділянка яких з достатньою точністю описується рівнянням:

$$t_{pW} = b_W \cdot \left(\frac{y}{W_{\max}} \right)^{v_W}, \quad (3.29)$$

де b_W , v_W – параметри початкової ділянки опорної кривої хвилястості; W_{\max} – максимальна висота хвилястості.

Провівши математичні викладки, аналогічні наведеним вище для шорсткості, отримаємо наступні рівняння для визначення відносної опорної довжини профілю хвилястості і параметрів її початкової ділянки:

$$t_{pW} = t_{mw} \cdot \left(\frac{y}{W_p} \right)^{v_W} = t_{mw} \cdot \left(\frac{p \cdot W_{\max}}{100 \cdot W_p} \right)^{v_W}, \quad (3.30)$$

$$v_W = \frac{t_{mw} \cdot W_p}{50 \cdot W_a} - 1, \quad (3.31)$$

$$b_W = \frac{t_{mw}}{100} \cdot \left(\frac{W_{\max}}{W_p} \right)^{v_W}, \quad (3.32)$$

де W_a и W_p – середнє арифметичне відхилення і висота згладжування профілю хвилястості; t_{mw} – відносна довжина опорної лінії профілю хвилястості на рівні середньої лінії.

Використовуючи математичний апарат згортки, застосований для побудови відносних опорних кривих в роботі [273], можна визначити відносні опорні площі шорсткості з урахуванням хвилястості.

Інший метод заснований на знятті профілограм великої реалізації ($L \geq 5 \cdot S_{mw}$, де S_{mw} – крок хвилі) і відповідної їх обробки. Цей метод можна застосовувати для поверхонь с невеликим кроком хвиль [273].

Однак, враховуючи, що шорсткість і хвилястість – незалежні складові геометрії поверхні і що для забезпечення зносостійкості і контактної жорсткості необхідно прагнути до управління як шорсткістю, так і хвилястістю, перевагу слід віддавати першому методу.

Радіуси хвиль можуть бути визначені так само, як для шорсткості, а саме (при $t_{mw} = 50 \%$):

$$R_{mw} = \frac{125 \cdot S_{mw}^2}{6 \cdot W_a} . \quad (3.33)$$

Несуча здатність поверхні, з точки зору втомної міцності деталі, від хвилястості практично не залежить.

Таким чином, для оцінки несучої здатності хвилястості необхідні наступні параметри: W_a , W_p , W_z и S_{mw} .

Як раніше було зазначено, значний вплив на контактну взаємодію деталей машин надає макровідхилення їх поверхонь. Поряд з величиною макровідхилення значний вплив, зокрема на контактну жорсткість, надає і їх форма.

На даний час немає єдиної системи для всіх видів відхилень форм, яка задовольняла б умовам взаємозамінності за розмірами, формою і розташуванням поверхонь деталей і одночасно відповідала б умовам

раціональних і практично зручних методів вимірювання. Проект стандарту на граничні відхилення форми був розроблений тільки для циліндричних поверхонь [146]. Існуючий КТМ 2-59 (Керівний технічний матеріал) на плоскі поверхні не відповідає сучасним вимогам до їх якості. Враховуючи, що макровідхилення можуть мати різну величину і форму, для оцінки їх несучої здатності можуть бути використані два параметри: H_{\max} – максимальна висота макровідхилення і H_p – висота згладжування макро відхилення, що характеризує металоємність поверхні.

Заходи попередження тут ті ж, що і при абразивному зносі. Рекомендується також фланкування зубів, правильний вибір сорту масла і його охолодження.

Утомне викришування, абразивний знос і заїдання обумовлені поверхневою міцністю, а злам - об'ємною міцністю зубів.

Зминання робочих поверхонь зубів відбувається при дії значних за величиною навантажень, при контактено-динамічних і реверсивних навантаженнях.

3.1.4 Загальні вимоги до вибору і призначенню системи параметрів поверхневого шару відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

Аналіз параметрів поверхневого шару деталей, теоретичні та експериментальні дослідження контактної жорсткості, коефіцієнта тертя і зносостійкості, герметичності з'єднань і міцності посадок, границя витривалості та корозійної стійкості, наведені вище, показують, що всі розглянуті експлуатаційні властивості характеризуються системою геометричних параметрів (табл. 3.1): макровідхилення (H_{\max} , H_p); хвилястість (W_z , W_p , S_{mw}); шорсткість (R_a (R_z), R_{\max} , R_p , S_m , S , t_p (t_m)); їх взаємне положення при контактуванні (ω); фізико-механічні властивості поверхневих

шарів ($H_{\mu 0}$, h_{μ} , $\pm \sigma_0$, h_{σ}); фізико-механічні властивості матеріалів деталей (E , μ , σ_T) і умови функціонування (величина і напрямок діючої сили, швидкість взаємного переміщення і наявність мастила) [49, 102, 244].

Таблиця 3.1 – Взаємозв'язок експлуатаційних властивостей відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з параметрами стану їх поверхневого шару

Експлуатаційна властивість	Геометричні параметри поверхні											Фізико-механічні властивості поверхневого шару			
	Макро відхилення		Хвилястість			Шорсткість						Мікротвердість		Залишкові напруги	
	H_{\max}	H_p	W_z	W_p	S_{mW}	$R_a (R_z)$	R_{\max}	R_p	$t_p (t_m)$	S_m	S	$H_{\mu 0}$	h_{μ}	σ_0	h_{σ}
Втомне викришування	-	-*	-	-*	-	-	-	-*	+	+	0	-	0	-	0
Пластичні деформації	+	+	+	+	-	+	+	+	-*	-	-	+	0	-	0
Абразивний знос	-	-*	-	-*	+	-	-	-*	+	+	+		0	+	0
Заїдання	-	-*	-	-*	-	-	-	-*	+	-	-	-*	0	-	0
Поломка зубів	-	-*	-	-*	-	-	-	-*	+	-	0	-*	0	-	0
Втомна міцність	0	0	0	0	0	-	-*	+	-	+	0	+	+	+	+

Примітки: «+» і «-» – збільшення або зменшення цих параметрів викликає, відповідно, збільшення або зменшення даної експлуатаційної властивості; «*» – параметр, який надає основний вплив на дану експлуатаційну властивість; «0» – параметр, що не виявляє впливу на дане експлуатаційний засіб.

Найважливішими параметрами поверхневого шару деталі, що надають основний вплив на розглянуті експлуатаційні властивості, є H_p , W_p , R_p , S_m , k'_1 ($H_{\mu 0}$). Оптимальні значення цих параметрів, що забезпечують отримання необхідних експлуатаційних властивостей, можуть бути розраховані з наведених вище формул, визначені експериментально або дослідно-статистично.

Так, при необхідності забезпечення необхідної зносостійкості крупногабаритних зубчастих коліс параметри її поверхневого шару визначають з рівності:

$$\frac{H_p \cdot W_p \cdot R_p^4 \cdot k'_1}{S_m^6} = 3375 \cdot \left[\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right]^3 \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^6. \quad (3.34)$$

При забезпеченні контактних навантажень:

$$H_{p1} + W_{p1} + R_{p1} + H_{p2} + W_{p2} + R_{p2} = \Delta - \frac{2M}{\pi d l f} \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_1 + \frac{1 - \mu_2}{E_2} \right). \quad (3.35)$$

Попередньо обчислені значення параметрів стану поверхневого шару деталей машин повинні бути перевірені на технологічність. В результаті вибирають ту їх комбінацію, яка технологічно забезпечується за найменшою собівартістю.

У табл. 3.2 наведені оптимальні значення стандартизованих параметрів шорсткості для деяких деталей, що визначають надійність і довговічність машин в цілому.

Моделюючи умови роботи деталей машин і їх з'єднань на експериментальних установках, з урахуванням масштабного фактора можна експериментально визначити оптимальні значення параметрів стану робочих поверхонь зразків, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

Таблиця 3.2 – Оптимальні значення параметрів шорсткості поверхонь відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

Ступінь точності циліндричних зубчастих коліс ГОСТ1643-81 $m = 12-65$ мм $z = 80-400$ $D_e = 960-8000$ мм	Параметри шорсткості, мкм						Чистова, остаточна обробка відновлення крупногабаритних зубчастих коліс після наплавлення та попередньої обробки
	R_a , середнєарифметичне відхилення профілю	R_z , висота нерівностей профілю по 10 точкам	R_{max} , найбільша висота профілю	S , середній крок місцевих виступів профілю	S_m , середній крок нерівностей профілю по середній лінії	t_p , відносна опорна довжина профілю	
1	2	3	4	5	6	7	8
6В ГОСТ 1643-81	0,8–1,25	6,3	6,3	0,08	0,063	60 %	1. Зубошліфування 2. Зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозаходними кл. точності: АА, ААА, ГОСТ 9324-80
7В ГОСТ 1643-81	1,6–2,5	10	10	0,16	0,125	50 %	1. Зубошліфування 2. Швидкісне чистове фрезерування 3. Зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозаходними кл. точності: А, ГОСТ 9324-80 4. Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликами
8В ГОСТ 1643-81	3,2–5	20	20	0,20	0,16	40 %	1. Зубошліфування 2. Швидкісне чистове фрезерування 3. Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликами

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5	6	7	8
9В ГОСТ 1643-81	6,3–10	40	40	0,25	0,20	40 %	1. Зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозаходними кл. точності: А, В ГОСТ 9324-80
10В ГОСТ 1643-81	12,5–20	80	80	0,32	0,25	30 %	1. Зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозаходними кл. точності: В, С ГОСТ 9324-80
11В ГОСТ 1643-81	25–40	160	160	0,40	0,32	25 %	
12В ГОСТ 1643-81	50–80	320	320	0,32	0,40	25 %	

3.2 Інформаційне моделювання процесів зубообробки відновлених крупномодульних зубчастих коліс

Процес зубообробки розглядається як об'єкт управління, що складається з ряду об'єктів ($T_{об}$): початковий матеріал (вхід об'єкта управління); навколишнє середовище (умови протікання процесу); зубчасте колесо (вихід об'єкта управління, кількісна та якісна характеристики поверхневого шару); модуль обробки з системою управління та оснащенням (власне об'єкт управління) [146, 184].

Особливості процесу формування поверхневого шару (рис. 3.8) пов'язані з початковими даними формування об'єктів моделювання процесів зубообробки відновлених крупногабаритних зубчастих коліс [273].

Завдання оптимального управління зубообробкою формується як задача вибору формування, яка забезпечує максимальну продуктивність із забезпеченням якісного поверхневого шару відновлених крупногабаритних зубчастих коліс при заданій точності з урахуванням показника собівартості.

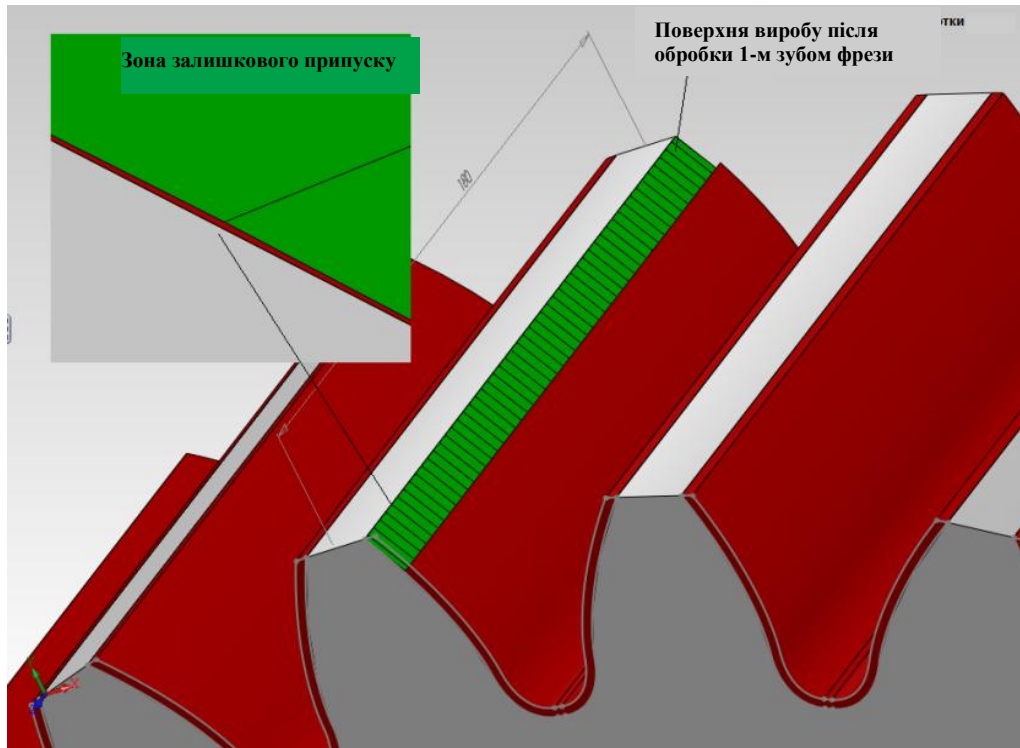


Рисунок 3.8 – Формоутворення поверхневого шару одним зубом зубообробної фрези відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

Рішення оптимального управління процесом зубообробки інтегрується в спільному розгляді цільових функцій забезпечення параметрів стану поверхневого шару і технічними показниками оптимальності при зубообробці відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

Джерелом інформації служить класифікація технічних показників оптимальності при зубообробці (рис. 3.9).

Оптимальні поєднання цільових функцій забезпечення параметрів стану поверхневого шару відновлених крупногабаритних зубчастих коліс знаходяться в області оптимального управління. Побудова області оптимального управління і формує стратегію управління і моделювання оптимального управління зубообробкою відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

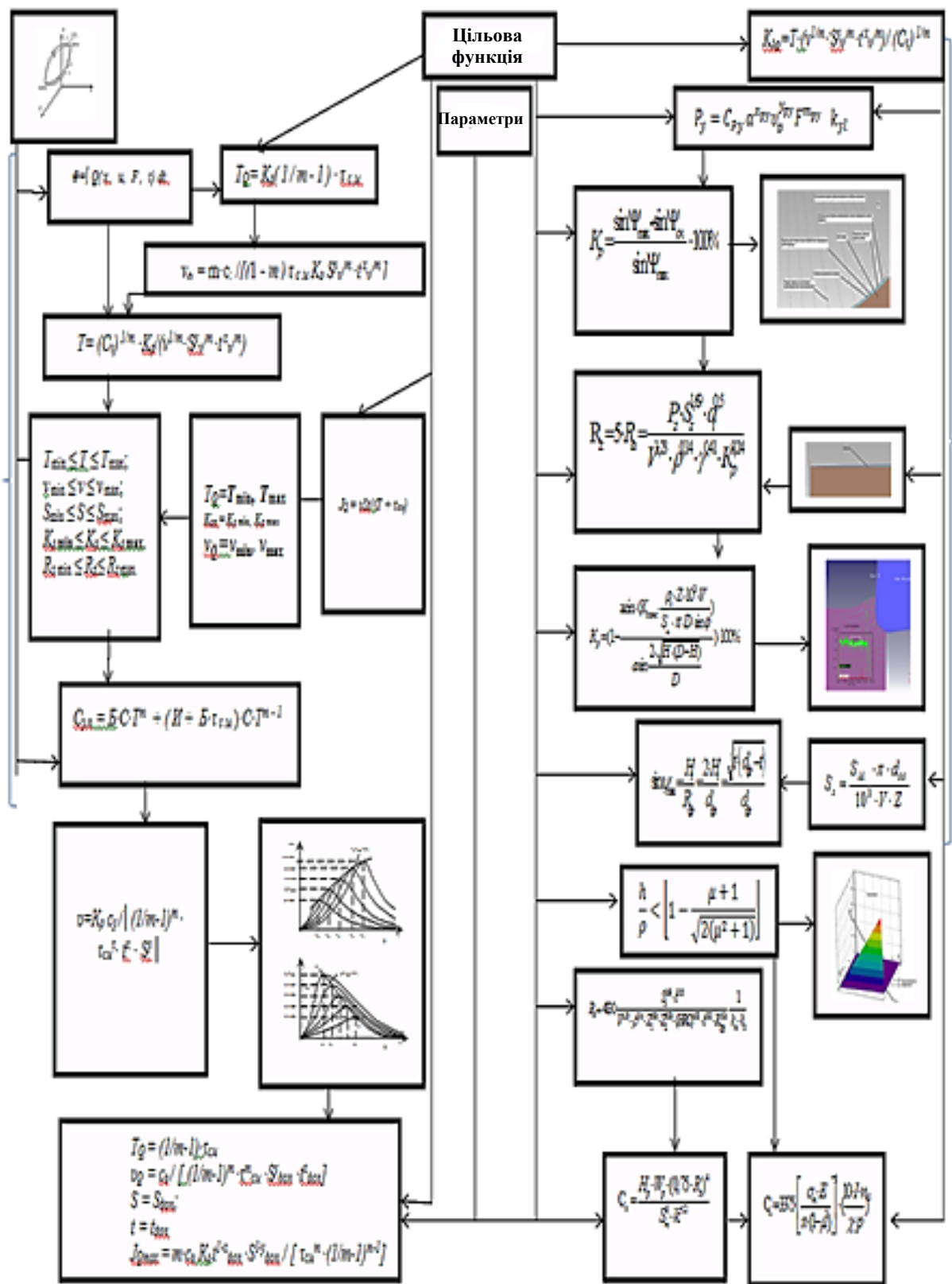


Рисунок 3.9 – Класифікація технічних показників оптимальності при зубообробці відновлених крупногабаритних зубчастих коліс

3.3 Моделювання забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь відновлених крупногабаритних зубчастих коліс за допомогою системної оптимізації

Однією з головних задач відновлення зношених крупногабаритних зубчастих коліс є забезпечення експлуатаційних характеристик коліс. Тому для підвищення якості передач важливо технологічно забезпечити систему геометричних (параметри макровідхилення, хвилястості, шорсткості), фізико-механічних та комплексних параметрів їх стану [181, 194].

Ця система параметрів характеризує експлуатаційні властивості за допомогою комплексних параметрів стану поверхні з метою попередження виходу зубчастих передач з ладу, таких, як поломка зубів, викришування активних поверхонь (рис. 3.10) і відшаровування поверхневих шарів зубів, абразивний знос зубів, пластичні деформації зубів (рис . 3.11) і заїдання [273].

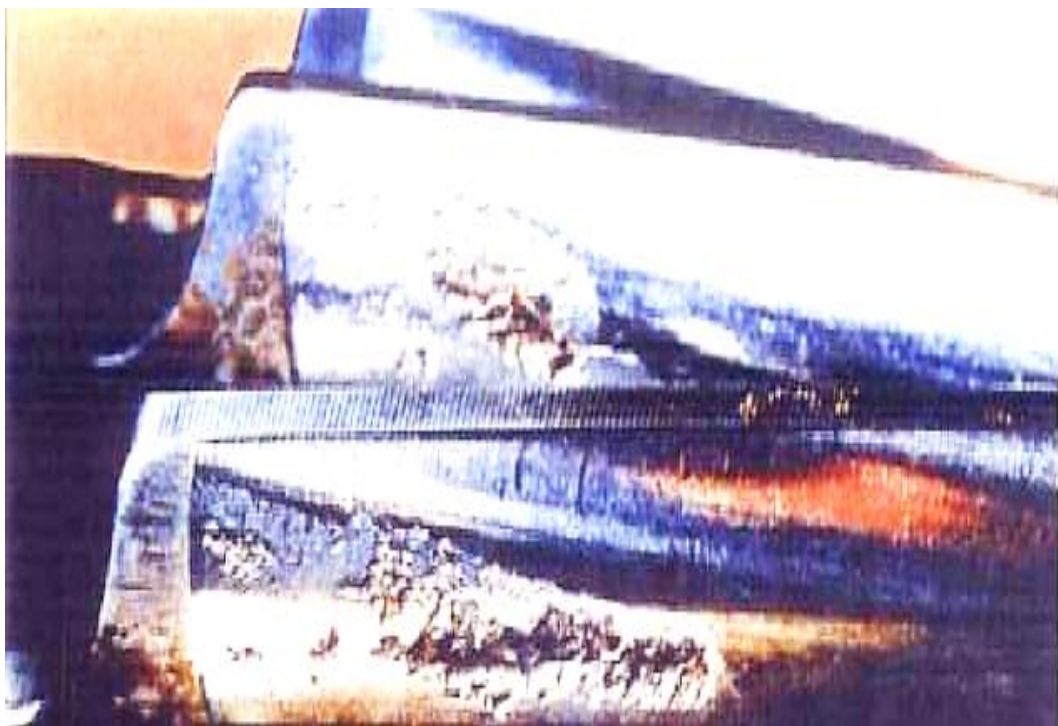


Рисунок 3.10 – Стан активних поверхонь зубів при наявності прогресуючого викришування



Рисунок 3.11 – Пластична деформація при холодній текучості матеріалу (при температурі нижче температури рекристалізації)

Підвищення опірності зубів викришування може бути досягнуто забезпеченням рівномірного контактного шару і шорсткості евольвентної поверхні шляхом формоутворення поверхневого шару інструментом, що має радіус округлення різальної крайки при мінімальному куті ковзання зуба фрези.

Суттєвий вплив на знос надає шорсткість робочих поверхонь зубів. Якщо мікронерівності на активних поверхнях зубів перевищують товщину масляного шару, то відбувається безпосереднє зіткнення активних поверхонь зубів.

Інтенсивний початковий знос називається прироблювальним зносом. По мірі згладжування поверхонь зубів знос зменшується і може зовсім

припинитися. Тривалість прироблювального зносу суттєво залежить від твердості активних поверхонь зубів, які впливають на розрахункову величину комплексного параметра стану поверхні. Для передач з високою твердістю цей процес може бути досить тривалим. У тих випадках, коли знос стабілізується в часі, він носить назву прогресуючого. Цей знос характерний для відкритих зубчастих передач або передач, що працюють без мастила, і є основною причиною виходу їх з ладу.

У зоні контакту, де матеріал піддається сильному всебічному стиску, виникають пластичні деформації зубів. Сили тертя викликають переміщення поверхневих шарів матеріалу в напрямку вектора швидкості ковзання. При цьому на поверхні ведучих зубів поблизу полюсної лінії утворюється западина, а на поверхні ведених зубів – виступ (рис. 3.11), що в значній мірі визначається значенням коефіцієнта тертя сполучених евольвентних поверхонь зубчастих коліс і їх станом.

Між межею міцності σ_B (МПа) і твердістю HB або HRC існує наближена залежність:

$$\sigma_B = 3,5 \cdot HB \approx 35 \cdot HRC . \quad (3.36)$$

При вирішенні розглядуваної задачі забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих передач застосовуються комплексні параметри рівноважного стану поверхні.

З поділом комплексних параметрів на технологічні і розрахунково-конструкторські виникає задача спрощення регламентації, єдності підходу і зниження ймовірності помилок рішень. Один з варіантів такого рішення – це застосування графічних методів системної оптимізації.

При такому забезпеченні, критеріями за визначенням методу обробки на фінішному етапі, а також режимів різання є необхідні умови максимуму областей ефективного значення експлуатаційних властивостей при розглянутому методі обробки (ОЕМО), мінімуму проекції функції витрат на

їх вісь, а також максимуму щільності розподілу ймовірності при обмеженому наборі регламентованих параметрів якості поверхні [185].

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

Сучасна зубообробка відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс розвивається в напрямку розробки нових підходів, процесів формоутворення робочих поверхонь зубів, створення нового високопродуктивного обладнання, нових інструментальних матеріалів та інструментів.

У зв'язку з постійно зростаючими вимогами до якості відновлюваних крупногабаритних зубчастих передач безперервно зростає обсяг підготовки, пов'язаної з оснащенням виробництва сучасним високопродуктивним обладнанням та інструментальним забезпеченням. Сучасні вимоги щодо збільшення твердості робочих поверхонь зубів відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс є одними з найбільш ефективних і актуальних на сьогоднішній день шляхів підвищення здатності навантаження і довговічності зубчастих передач і редукторів [180, 194].

Разом з тим суттєве підвищення твердості відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс різко збільшує трудомісткість їх виготовлення: підвищуються вимоги до жорсткості зуборізного обладнання, стійкості інструменту, з'являється потреба в дорогих, але малопродуктивних зубошліфувальних верстатах. Якщо для зубчастих коліс малого і середнього модуля ($m = 5\text{--}10$ мм) можна відносно стійко отримати необхідні якісні характеристики зачеплення шляхом хіміко-термічної обробки і зубошліфування, то для крупномодульних коліс ($m = 12\text{--}65$ мм), особливо косозубих з кутом нахилу зубів понад $\beta_d = 15\text{--}30^\circ$ і довжиною зуба більш $b_k = 250\text{--}900$ мм, виконання операцій хіміко-термічної обробки і

зубошліфування багаторазово ускладнюється і далеко не завжди забезпечує досягнення поставлених цілей через значні термічні деформації зубів після наплавлення (1,8–4,5 мм) і високої (більше 200 станко-годин) трудомісткості операцій зубошліфування [146, 194, 243].

На підставі імітаційного моделювання, з урахуванням прогресуючих видів зносу розроблені та реалізовані групові маршрутні процеси відновлення крупногабаритних зубчастих коліс. Такий підхід дозволяє відновити експлуатаційні властивості крупногабаритних зубчастих коліс із забезпеченням якості, точності обробки з високою продуктивністю.

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.

Вібростабілізуюча обробка (ВО) зубчастих коліс значно скорочує технологічний час на виконання стабілізуючих операцій замість термічної обробки (ТО) і забезпечує високу ефективність екологічно чистого процесу ВО для зниження залишкових напружень та стабілізації геометричних розмірів крупногабаритних зубчастих коліс, виготовлених з поковок, зварних конструкцій, лиття і, найголовніше, зменшує короблення деталей, а отже, зменшує припуск для виконання остаточної зубооброблювальної операції.

Як показано в табл. 3.3, поряд з превалюючими перевагами економіко-екологічних факторів, суттєвими є і умови проведення вібростабілізуючої обробки в порівнянні з термостабілізацією. Вібростабілізація виконується в умовах температури навколишнього середовища і, відповідно, деталі не відчують температурних деформацій.

Для організації процесу віброобробки практично не потрібно значних матеріальних витрат на розробку участка. Найсуттєвішим є дуже мала енергоємність цього процесу в порівнянні з термічним методом, витрата енергоресурсів знижується більш ніж в 2000 разів.

Таблиця 3.3 – Порівняльна таблиця витрат на виконання вібростабілізуючої обробки (ВО) і термообробки (ТО)

Найменування деталей	Технологічний час на виконання стабілізуючої обробки		Енерговитрати	
	ВО (хв)	ТО (год)	ВО (кВт год)	ТО (тис. м ³ газу)
Зубчасті колеса масою 80–200 кг	10–18	12–20	0,2–0,6	5
Зубчасті колеса масою 200–500 кг	14–25	22–30	0,4–0,9	8
Зубчасті колеса масою 500–1000 кг	18–34	28–36	0,6–1,1	12
Крупногабаритні зубчасті колеса масою 1000–3000 кг	30–50	34–42	1,0–1,25	16
Крупногабаритні зубчасті колеса масою 3000–5400 кг	40–60	40–48	1,2–1,4	20

Для віброобробки зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс, виготовлених з поковок, зварних конструкцій і лиття, вдосконалено віброкомплекс ВК-86.

Віброкомплекс ВК-86 з регульованим вібробуджувачем дозволяє розвивати віброзусилля до 30 кН в діапазоні частот від 10 до 140 Гц при високій експлуатаційній надійності. Можливості віброкомплекса значно розширилися за рахунок стикування його з самописцем WX 2400 (США) і оснащення системою автоматичного сканування в діапазоні 600–8500 об/хв (10–140 Гц).

Вперше у світовій практиці з'явилася технічна можливість проведення

стабілізуючого відпуску методом вібростабілізації для крупногабаритних зубчастих коліс діаметром до 11–15 м. Це виконати термостабілізацією було неможливо через відсутність термічного обладнання.

Запис віброчастотної характеристики (ВЧХ) самописцем WX 2400 дозволяє працювати більш ефективно, економічно і швидко. Зняття ВЧХ деталі спочатку проводиться до її віброобробки, а вдруге – після завершення віброобробки.

Контроль зміни залишкових напруг крупногабаритних зубчастих коліс виготовлених з поковок, зварних конструкцій і лиття здійснюється в виробничих умовах за допомогою рентгенівського дифрактометра з переносною мобільною рентгенографічною камерою (рис. 3.12), оснащеною рентгенографічною трубкою ДРОН-0,5, яку можна встановити на зубчасте колесо діаметром до 16000 мм і масою до 60 тонн [273].

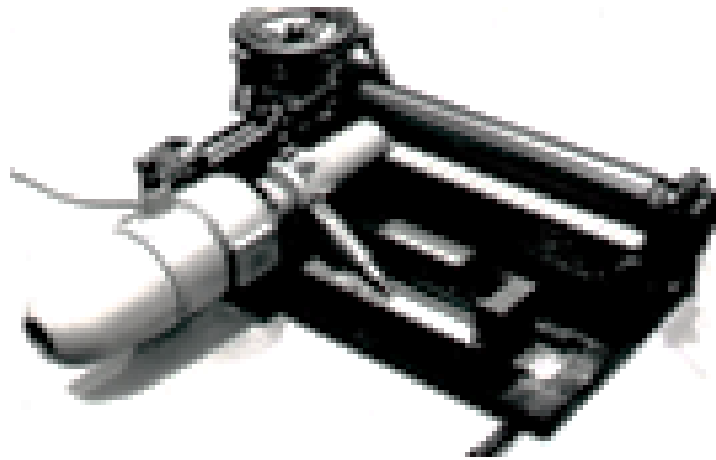


Рисунок 3.12 – Мобільна рентгенографічна камера

На пульті управління апарату режим сканування і програма обробки даних задаються автоматично, проводяться вимірювання і на друк видаються числове значення і знак напружень.

Підготовлений для вимірювання залишкових напружень участок поверхні зубчастого колеса повинен бути чистим, без окалини і сторонніх покриттів. Прокатана, лита і кована поверхня не повинна мати рисок, забоїн і

видимих нерівностей.

Віброобробці піддавалися крупногабаритні зубчасті колеса модулем від 12 до 30 мм, діаметром від 1000 до 5400 мм, цілісні, а також з двох або чотирьох секцій. Матеріал крупногабаритних зубчастих коліс: сталь 40Х, сталь 45, сталь 40ХН, чавун СЧ15-20.

Крупногабаритне зубчасте колесо або окремі секції встановлюються на 3-х або 4-х віброопорах з технічної гуми (рис. 3.13).

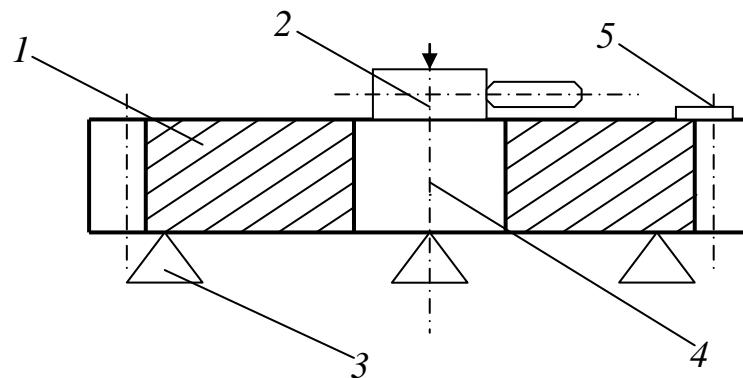


Рисунок 3.13 – Схема установки крупногабаритного зубчастого колеса:

1 – крупногабаритне зубчасте колесо; 2 – віброкомплекс;

3 – віброізолюючі опори з технічної гуми; 4 – вісь зубчастого колеса;

5 – вібродатчик

Поруч із зубчастим колесом встановлюються пульт управління віброкомплекса ВК-86 та портативний рентгенівський дифрактометр.

При виконанні віброобробки крупногабаритних зубчастих коліс двічі, а для складних конструкцій коліс – тричі, фіксувалися ВЧХ зубчастих коліс.

З діаграми ВЧХ для крупногабаритного зубчастого колеса (рис. 3.14) випливає, що процес віброобробки відповідає класичній схемі: резонансні піки зменшуються по амплітуді і отримують зрушення в бік менших частот коливань. Обробка на кожній резонансній частоті проводилася до тих пір, поки не наступала стабілізація місцеположення і форм відповідного піку.

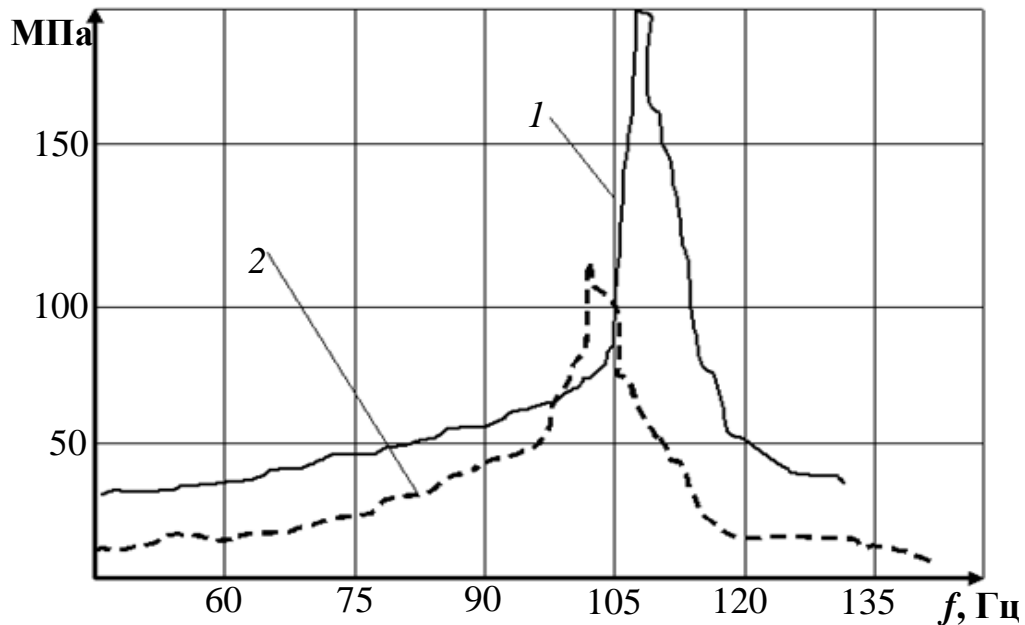


Рисунок 3.14 – ВЧХ крупногабаритного зубчастого колеса:
 1 – до віброобробки; 2 – після віброобробки

Досить цікаві результати експериментів, проведених при віброобробці крупногабаритного зубчастого колеса, яке складалося з двох половинок, на зубофрезерному верстаті моделі WFS-54. При віброобробці обидві половинки були зібрані в кільце (діаметр – 5400 мм, маса – 14000 кг) на стягуваннях. Місце кріплення віброзбудника 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.

Виміри залишкових напружень до і після віброобробки (табл. 3.4) показали стабілізацію об'єкта: напруга зменшилася в середньому майже в 2 рази. Це свідчить про ефективність процесу віброобробки на різних резонансних частотах.

Досвід віброобробки відновлених крупногабаритних зубчастих коліс показав, що в процесі стабілізації в більшості випадків відбувається зміщення резонансних частот в сторону їх зменшення з одночасним зменшенням амплітуд резонансів.

Таблиця 3.4 – Результати вимірювання залишкових напружень крупногабаритного зубчастого колеса

Номер виміру	Залишкові напруги, МПа			
	До віброобробки		Після віброобробки	
	Колесо № 1	Колесо № 2	Колесо № 1	Колесо № 2
1	+142	+151	+66	+84
2	+38	-65	-8	-26
3	+121	+104	+56	+50

Були проведені експериментальні дослідження зі зміни мікронерівностей поверхонь зубів коліс при проведенні вібро- і термостабілізації і без стабілізації після лиття заготовки зі сталі 34ХН3А (рис. 3.15) зі зміною режимів різання, що показало ефективність процесу вібростабілізації.

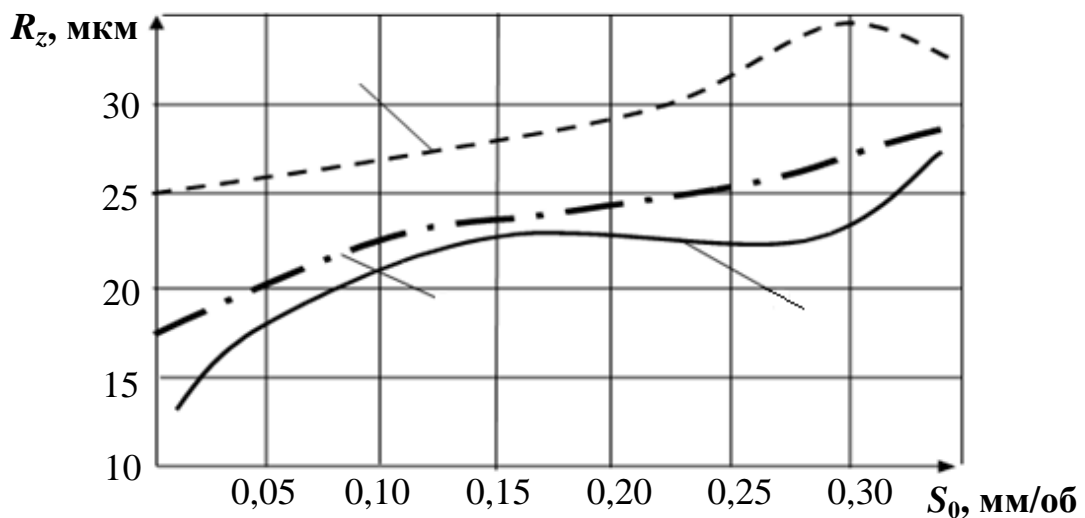


Рисунок 3.15 – Графік зміни шорсткості поверхні зубів зубчастого колеса ($m = 12$ мм; $d = 2500$ мм):

1 – без проведення вібро- і термостабілізації; 2 – термостабілізація; 3 – вібростабілізація

Для практичного використання результатів досліджень залишкових напружень зубчастих коліс розроблені таблиці нормування процесу вібростабілізації по масі, геометричним параметрам в залежності від

матеріалу. Завершення процесу вібростабілізації опосередковано визначається по напрузі котушки збудження вібростбудника, що і підтверджується в залежності від виду стабілізуючої обробки проведеними дослідженнями.

У процесі здійснення робіт визначено пріоритетні виконання відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс в залежності від виду прогресуючого зносу. Після напавлення зубчастих коліс встановлюється вид механічної обробки з урахуванням виду зносу зубчастого колеса.

Узагальнення результатів реалізації групових маршрутних процесів відновлення крупногабаритних зубчастих коліс в розглянутих виконаннях в залежності від їх первинного стану дозволили прогнозувати відновлюваність крупногабаритних зубчастих коліс.

Узагальнений груповий маршрутний процес відновлення крупногабаритних зубчастих коліс:

1. Попередня механообробка підготовки баз.
2. Виконується попереднє нарізування відновлених зубів спеціальними фрезами з «протуберанцем».
3. Вібростабілізуючий відпуск.
4. Неруйнівний контроль поверхневого шару зубчастих коліс.
5. Остаточне швидкісне зубофрезерування спеціальними швидкісними фрезами.
6. Контроль параметрів поверхневого шару і геометричних параметрів відповідно до вимог ГОСТ 1643-81.

Таким чином, вирішена актуальна науково-прикладна проблема сучасного машинобудування в розробці групових маршрутних процесів відновлення крупногабаритних зубчастих коліс. В результаті виконаних теоретичних пошуків і проведених експериментальних досліджень реалізовані групові маршрутні процеси відновлення крупногабаритних зубчастих коліс.

Висновки до розділу 3

1. Розроблена методика регламентації стану поверхонь після наплавки для зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс, такі їх показники, як поломка зубів, викришування активних поверхонь і відшаровування поверхневих шарів зубів, абразивний знос зубів, пластичні деформації зубів і заїдання.

2. Удосконалено теорію імітаційного моделювання взаємозв'язків якості зубчастого зачеплення крупногабаритних модульних коліс в процесі експлуатації при зношуванні і процесів їх обробки при відновленні.

3. Виконано моделювання для забезпечення експлуатаційних властивостей поверхонь зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс, за допомогою системної оптимізації.

4. Проведено теоретичні та експериментальні дослідження з визначення оптимальних кутів ковзання $\Psi_{ков}$ при яких встановлюється стабільність процесу зубофрезерування і необхідні умови по стійкості інструмента і якості оброблюваної поверхні по відношенню до найбільшого куту зуба фрези Ψ_{max} з оброблюваним зубчастим виробом через коефіцієнт ефективності формоутворення.

5. Удосконалена математична модель параметрів поверхневого шару з метою зниження пластичних деформацій і абразивного зносу відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

6. Розширено математичне моделювання достовірності виникнення заїдання зубів шляхом формування параметрів поверхневого шару крупногабаритних зубчастих коліс після відновлення.

7. Розроблені напрямки по відновленню крупногабаритних зубчастих коліс на основі імітаційного моделювання з урахуванням прогресуючих видів зносу

РОЗДІЛ 4

МЕТОДОЛОГІЯ ПРОЦЕСУ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАДАНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

4.1 Конструкторська і організаційна оптимізація систем відновлення крупномодульних зубчастих передач зовнішнього зачеплення

Задачі моделювання процесів оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс пропонується вирішувати методами впливу з урахуванням специфічних умов формоутворення зубчастих коліс [146, 244].

Аналіз причин виходу з ладу крупногабаритних зубчастих коліс показав, що в 90 % руйнування крупногабаритних зубчастих коліс починається з поверхневого шару через появу мікротріщин, абразивного зносу, викришування активних поверхонь зубів, відшаровування поверхневого шару зубів, прогресуючого заїдання, пластичних деформацій зубів [273].

При зубофрезеруванні евольвентної поверхні зубчастого колеса переміщення ріжучого леза інструмента з початкового положення в кінцеве положення під дією керуючих впливів може бути здійснено за різними траєкторіями в рамках техніко-економічних обмежень. Кожній траєкторії відповідає певне значення критерію оптимальності. Геометрія проектованої передачі визначається параметрами початкового контуру інструмента і його зміщеннями при нарізанні коліс передачі. Тому при проектуванні насамперед слід задати початковий контур інструменту, що виробляється і вибрати розрахункові зміщення. Якщо циліндричне зубчасте колесо нарізається рейковим інструментом, то верстатне зачеплення розглядають в торцевій площині, перпендикулярній вісі зубчастого колеса.

На підставі узагальнених теоретичних залежностей, які визначають взаємозв'язок критеріїв якості поверхневого шару з технологічними параметрами процесу різання розроблена методика розрахункового визначення залишкових напружень в поверхневому шарі оброблюваних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс черв'ячними модульними і спеціальними немодульними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні. 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. Оскільки залишкові напруги є пружними, для складання пружних залишкових напруг використовується *метод накладання*, сумарні залишкові напруги визначаються алгебраїчним підсумовуванням температурних і силових залишкових напружень. Для того щоб визначити залишкові напруги від кожного фактора окремо, необхідно встановити закономірність розподілу температури в поверхневому шарі оброблюваних циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс, а також визначити зусилля різання, що діють на оброблювану поверхню.

Температурні залишкові напруги визначаються алгебраїчним складанням напруг, що виникають в поверхневому шарі при нагріванні і охолодженні, причому вони можуть з'явитися тільки в тому випадку, якщо напруги при нагріванні перевищують межу текучості.

У формулах (4.1)–(4.4) наведено розрахунок для визначення температурних залишкових напруг при обробці циліндричних крупномодульних зубчастих коліс черв'ячними модульними і спеціальними немодульними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні.

$$\text{При } u = u_{0н}; \sigma_{0\max} < 2\sigma_T \Rightarrow$$

$$\sigma_{зал. T} = -\sigma_T + \frac{\beta_D \cdot A_1 \cdot E_D}{1 - \mu} \cdot \left\{ \left(\frac{H - y + a_1}{a_1} \right)^{x_1} - \frac{a_1^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} \cdot (1 + x_2) \cdot H} \right\}; \quad (4.1)$$

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

$$\sigma_{зал. T} = \frac{\beta_D \cdot A_1 \cdot E_D}{1 - \mu} \times \quad (4.2)$$

$$\times \left\{ \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y_{0H})^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] + (1 - \mu) \sigma_T (H - y_{0H})}{E_D \cdot y_{0H}} + \frac{a_1^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2}}{a_1^{x_2} \cdot (1 + x_2) \cdot H} \right\}$$

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

$$\sigma_{зал. T} = \sigma_T + \frac{\beta_D \cdot A_1 \cdot E_D}{1 - \mu} \cdot \left\{ \left(\frac{H - y + a_1}{a_1} \right)^{x_2} + \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y_{0ox})^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] + 2(1 - \mu) \sigma_T (H - y_{0ox})}{E_D \cdot y_{0ox}} \right\}; \quad (4.3)$$

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

$$\sigma_{зал. T} = \frac{\beta_D \cdot A_1 \cdot E_D}{1 - \mu} \times$$

$$\times \left\{ \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1 + x_2)} \left[(H + a_1 - y_{0ox})^{1+x_2} - (H + a_1)^{1+x_2} \right] + 2(1 - \mu) \sigma_T (H - y_{0ox})}{E_D \cdot y_{0ox}} - \right.$$

$$\left. \frac{\frac{E_D}{a_1^{x_2} (1+x_2)} \left[(H-a_1-y_{0n})^{1+x_2} - (H-a_1)^{1+x_2} \right] + (1-\mu)\sigma_T (H-y_{0n})}{E_D \cdot y_{0n}} \right\}, \quad (4.4)$$

де H – твердість оброблюваного зубчастого колеса (HB); y – глибина залягання розглянутого шару від поверхні; y_{0n} , y_{0ox} – границі розділу пружних і пластичних деформацій при нагріванні і охолодженні; σ_T і E_D – межа плинності і модуль пружності оброблюваного матеріалу; β_D і μ – коефіцієнт температурного лінійного розширення і коефіцієнт Пуассона оброблюваного матеріалу; A_1 и x_2 – величини, що визначають значення температури в поверхневому шарі оброблюваної деталі; a_i – змінна товщина зрізу при зустрічному зубофрезеруванні: $a_i = S_z \cdot \sin \Psi \cdot \sin \varphi$, де S_z – подача на зуб; φ – кут профілю зуба фрези.

Залишкові напруги, обумовлені силовим впливом на поверхневий шар, визначаються відповідно до теореми Генкі про розвантаження як різниця напруг, що виникають при навантаженні і розвантаженні. Фіктивні напруги визначаються за формулами:

$$\sigma_x = -\frac{\tau_p}{2\pi} \cdot \left\{ \psi_1 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \cdot \xi_1 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \cdot \frac{1}{1-\mu^2}, \quad (4.5)$$

$$\sigma_y = -\frac{\tau_p}{2\pi} \cdot \left\{ \psi_2 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \cdot \xi_2 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \cdot \frac{1}{1-\mu^2}, \quad (4.6)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\tau_p}{2\pi} \cdot \left\{ \psi_3 \left[B; \frac{y}{h}; \frac{h}{a_1} \right] - \frac{b}{b_1 \cos \alpha} \cdot \xi_3 \left[\frac{y}{h}; B; \frac{\Delta}{\Delta_1} \right] \right\} \cdot \frac{1}{1-\mu^2}, \quad (4.7)$$

де τ_p – опір оброблюваного матеріалу пластичному зсуву; b_i – ширина зрізу; b – периметр робочих частин різальних крайок; Δ – довжина площадки контакту задньої поверхні фрези з оброблюваною поверхнею; Δ_1 – проекція

поверхні зсуву на горизонтальну площину; h – глибина залягання випереджальних пластичних деформацій в поверхневому шарі; B – критерій, що характеризує кут сходу стружки; α і γ – задній і передній кути фрези.

Дійсні напруги визначаються також за формулами (4.5) – (4.7) за умови, що у відповідає глибині залягання пластичних деформацій.

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. 4.1).

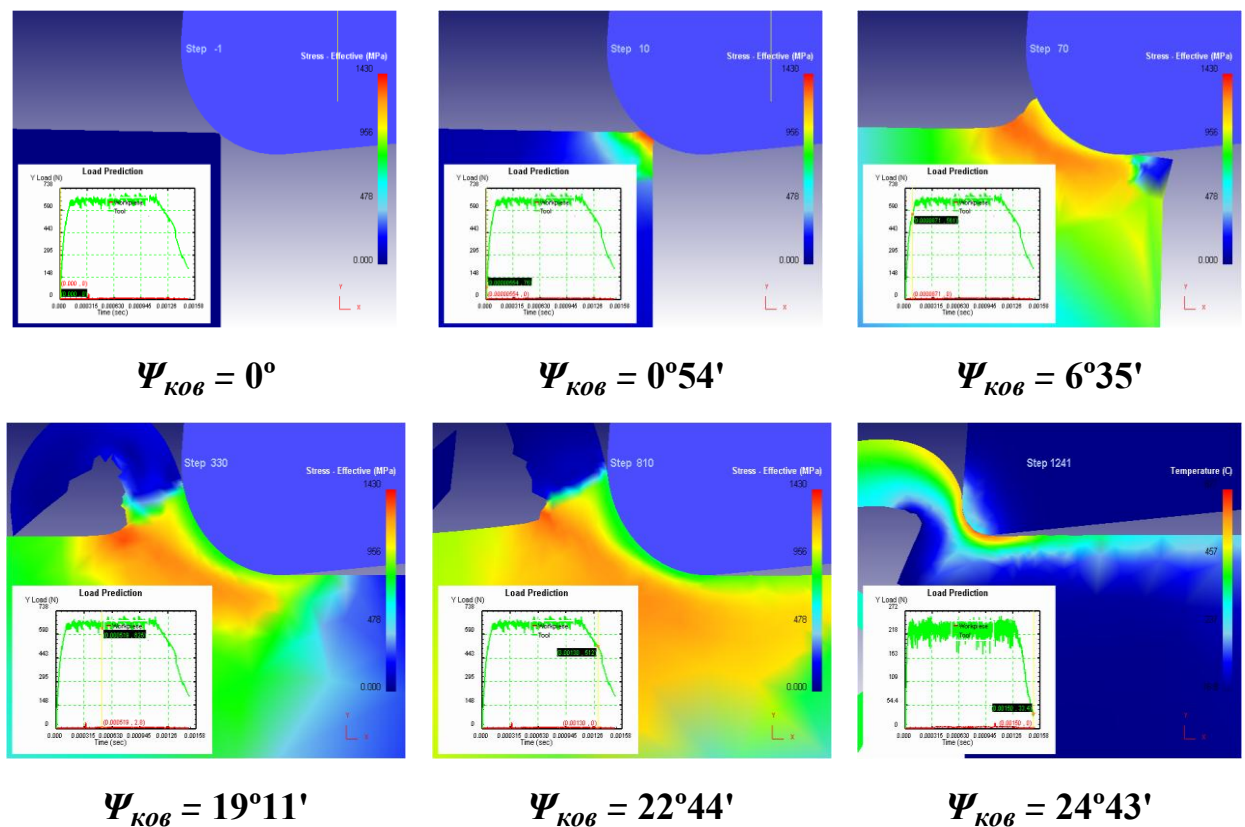


Рисунок 4.1 – Послідовність моделювання формоутворення глибини залягання залишкових напруг поверхневого шару (h_w) і сходу стружки при швидкісному зубофрезеруванні при значеннях радіуса округлення різальної крайки зубів фрези $\rho = 0; 300$ мм в залежності від кута ковзання ($\Psi_{ков}$)

З урахуванням усього вищевикладеного, одержуємо:

$$R_z = \left\{ \frac{a_1^{0,125} b_1^{0,7} c_\rho \theta \rho^{0,1} a^{0,43} \left(2,85 \sin^{0,115} \alpha V^{0,57} a_1^{0,345} \lambda b^{0,3} + 0,6625 \lambda_\rho \varphi^{0,57} \rho^{0,075} \right)}{V \cdot \lambda \cdot \sin^{0,165} \alpha} \times \right. \\ \left. \times \frac{-0,5 \tau_\rho \cdot \rho \cdot b \left[\arccos \left(1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin \gamma)^{-x_2}} \right) + \frac{a_2 \cdot B^{1-b_2(1-\sin \gamma)^{-x_2}}}{\sin \alpha \cdot (\cos \gamma + B \sin \gamma)} + \frac{\delta}{\rho} \right] \cdot \cos \alpha}{t \cdot \tau_\rho \cdot \left[1 + \frac{1}{B} + \operatorname{tg}(\operatorname{arctg} B - \gamma) \right]} \right\} \times \\ \times \frac{1}{K_\rho}, \quad (4.8)$$

де K_ρ – коефіцієнт ефективності формоутворення поверхневого шару; c_ρ – питома об'ємна теплоємність оброблюваного матеріалу; θ – температура в зоні різання; ρ – радіус округлення різальної крайки фрези; t – глибина різання; δ – довжина площадки зносу по задній поверхні фрези; a – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу; V – швидкість різання; λ і λ_ρ – коефіцієнти теплопровідності оброблюваного та інструментального матеріалів; φ – кут початкового профілю (20°); α і γ – задній і передній кути фрези; a_1 і a_2 – величини, що залежать від умов обробки (кута сходження стружки).

Глибина наклепу обробленої поверхні приймається рівною глибині залягання пластичних деформацій. Таким чином, відповідно до формул (4.1)–(4.8) глибина наклепаного шару (h_{ul}) функціонально визначається як:

$$h_{ul} = f(\sigma_T, E_D, \tau_p, \mu, \beta_D, \lambda, \lambda_\rho, c_\rho, V, S_{x6}, \rho, a_1, a_2, \alpha, \gamma). \quad (4.9)$$

Встановлено, що при обробці конструкційних і легованих сталей ступінь наклепу з достатньою для практичних цілей точністю може

визначатися за формулою:

$$N = \frac{h_{ш}}{1,25 \cdot \left(\frac{\sigma_{\sigma}}{\sigma_{\sigma л}} \right)^{0,8}} \cdot 100\% , \quad (4.10)$$

де σ_{σ} – межа міцності оброблюваного матеріалу; $\sigma_{\sigma л}$ – межа міцності легованих сталей циліндричних зубчастих коліс.

Результати досліджень дозволяють вирішувати задачі по визначенню параметрів поверхневого шару оброблюваної деталі, а також призначати умови обробки, що забезпечують задані технічними умовами параметри поверхневого шару.

Методика вибору, призначення та метрологічного забезпечення системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс показує, що експлуатаційні властивості циліндричних крупномодульних зубчастих коліс в значній мірі визначаються системою параметрів їх поверхневого шару. Проведені дослідження дозволили встановити між ними як якісні, так і кількісні залежності, ступінь достовірності яких цілком задовольняє вимогам практики.

4.1.1 Моделювання внутрішніх взаємозв'язків процесу зубообробки крупномодульних передач при їх відновленні

Моделювання процесів обробки зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс полягає в розробці оптимізованої математичної моделі об'єкта управління [194, 244]. 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 збурюючих впливів на пружну

динамічну верстатну систему (ДВС), а також зворотної дії пружної системи на робочі процеси, узагальнена схема процесу різання може бути представлена у вигляді, показаному на рис. 4.2.

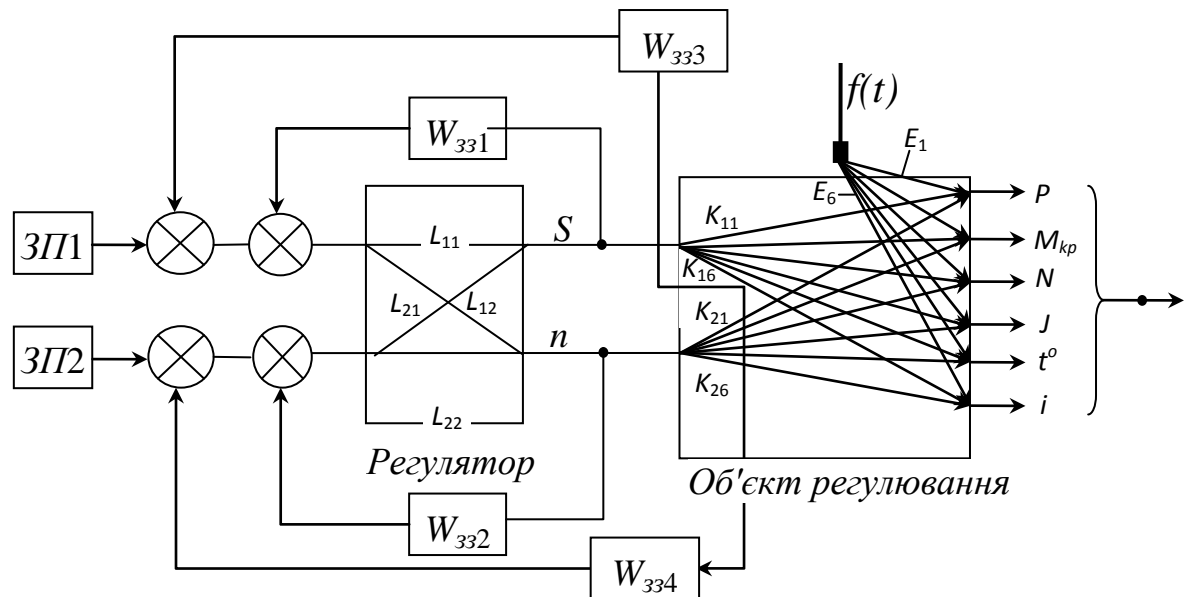


Рисунок 4.2 – Узагальнена схема процесу формоутворення циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс:

$ЗП1, ЗП2$ – 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

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

При синтезі і аналізі імітаційного моделювання математичний опис об'єкта управління (ОУ) представляється у вигляді передатних функцій

$W(p)$, що характеризують відношення лапласових зображень вхідного $X_{вх}(p)$ і вихідного $X_{вих}(p)$ сигналів.

Математичний опис процесів обробки зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс як OU зручно розглядати на прикладах формоутворення зубчастих коліс спеціальними фрезами (СФ) і при швидкісному зубофрезеруванні фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки (ФТМ), що мають узагальнену динамічну структуру і внутрішні взаємозв'язки.

В якості керованої величини, що відображає зміни, які відбуваються в процесі обробки, вибирають величину пружних Y системи ДВС. Не вдаючись в подробиці прямих і непрямих методів і засобів визначення величини Y , відзначимо їх трудомісткість і значні похибки, що виникають при вимірах [193, 244].

Результуюче пружне переміщення Y системи – наслідок пружних деформацій в ДВС. У зв'язку з цим становить практичний інтерес вимір факторів, які є причинами вектора сили різання P від подачі S і радіус округлення різальної крайки інструмента ρ при зустрічному фрезеруванні.

Однак для того, щоб вибрати величину $P = f(i_p, HRC, S)$, в якості регульованої, функції зміни радіуса обробки $C = (F, MB, S)$ і $P = f(t_p, HRC, S)$ повинні бути залежними. Ця умова виконується, якщо визначники другого порядку матриці дорівнюють нулю.

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial(G)}{\partial t_0} & \frac{\partial(G)}{\partial S} & \frac{\partial(G)}{\partial H} \\ \frac{\partial(P)}{\partial t_0} & \frac{\partial(P)}{\partial S} & \frac{\partial(P)}{\partial H} \end{vmatrix}$$

У разі лінійності залежності G від кожної складової сили різання має місце $G = a'P_y + b'P_z + c'P_x$, причому коефіцієнти a' , b' , c' визначають інтенсивність впливу складових. У свою чергу регульована величина $P = aP_y + bP_z + cP_x$. Критерієм вибору регульованої величини буде умова:

$$\frac{a'}{a} = \frac{b'}{b} = \frac{c'}{c}.$$

Таким чином, вираз для регульованої величини прийме вид:

$$P = C_p \cdot t^x \cdot S^y. \quad (4.11)$$

Вираз (4.11) в свою чергу пов'язаний з пружними деформаціями системи ДВС під дією сил різання рівнянням жорсткості [273]:

$$Y = \frac{P_y}{j} = \frac{C_p \cdot t^x \cdot S^y}{j}, \quad (4.12)$$

де j – жорсткість пружної системи.

На рис. 4.3 відображена область пластичних деформацій в зоні формоутворення поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс.

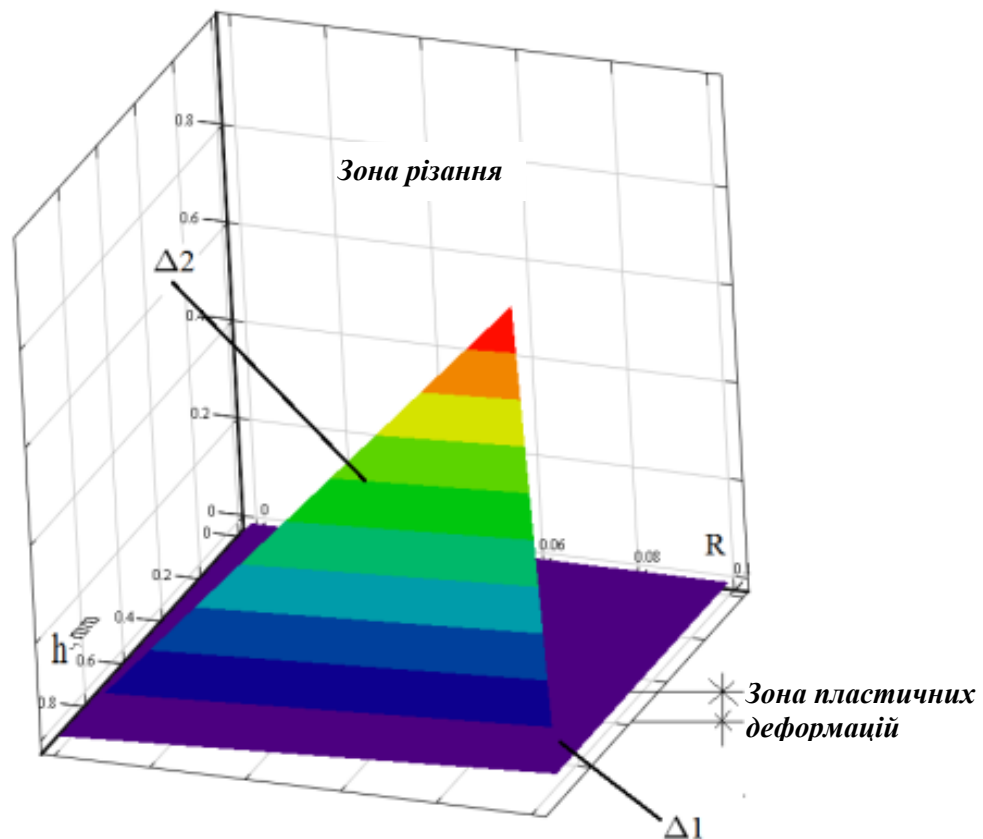


Рисунок 4.3 – Область пластичних деформацій в зоні формоутворення поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс

Якщо вважати, що h змінюється від 0 до $a_{i\max}$ – найбільша товщина шару, що зрізається при зустрічному зубофрезеруванні, то на ділянці різання $\Delta 2$ буде пластична деформація без стружкоутворення, що й треба було довести.

$$\Delta 2 = \frac{h}{\rho} < \Delta 1 = \left[1 - \frac{\mu + 1}{\sqrt{2(\mu^2 + 1)}} \right], \quad (4.13)$$

де $\rho = f(t, V_u)$; t – тривалість контакту інструменту з заготовкою; V_u – швидкість зносу поверхонь інструменту (при цьому можна припустити, що $\rho \rightarrow \rho_{\max}$); $h = 0,01-1$ мм; $\rho = 0,01-0,45$ мм; $\mu = 0,15$; $\Delta 1 = 0,161$ – границя зони пластичних деформацій (залежить від V, S_z).

Зміна товщини зрізаного шару при досягненні мінімального кута ковзання $\psi_{\text{ков min}}$ змінює коефіцієнт тертя при наявності обов'язкового сплеску (стрибка), що несприятливо позначається на динаміку різання і якість обробленої поверхні.

Основна формула для оптимізації процесу зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс при зустрічному фрезеруванні полягає:

♦ в отриманні мінімального значення кута ковзання $\psi_{\text{ков min}}$ або отриманні максимального значення $\sin \psi_{\text{ков min}}$, при якому процес різання відсутній з урахуванням варіювання змінних параметрів режимів різання ($S_{x\phi}, V$) і геометричних параметрів зуборізних фрез (ρ, d_{fp}, z):

$$\text{без МОР:} \quad \psi_{\text{ков min}} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho \cdot 10^3 \cdot V \cdot z}{S_{x\phi} \cdot \pi \cdot d_{fp} \cdot \sin \varphi}, \quad (4.14)$$

$$\text{із застосуванням МОР:} \quad \psi_{\text{ков min}} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho \cdot 10^3 \cdot V \cdot z}{S_{x\phi} \cdot \pi \cdot d_{fp} \cdot \sin \varphi}; \quad (4.15)$$

♦ в отриманні максимального кута контакту зуба фрези з оброблюваним зубчастим колесом (максимальний кут ковзання) $\Psi_{\text{ков max}}$:

$$\sin \Psi_{\text{ков max}} = \frac{H_i}{R_{\text{фр}}} = \frac{2 \cdot H_i}{d_{\text{фр}}} = \frac{2 \cdot \sqrt{t \cdot (d_{\text{фр}} - t)}}{d_{\text{фр}}}; \quad (4.16)$$

$$\Psi_{\text{ков max}} = \arcsin \frac{H_i}{R_{\text{фр}}} = \arcsin \frac{2 \cdot H_i}{d_{\text{фр}}} = \arcsin \frac{2 \cdot \sqrt{t \cdot (d_{\text{фр}} - t)}}{d_{\text{фр}}}, \quad (4.17)$$

де t – висота зуба зубчастого колеса.

Аналогічні розрахунки виконані і при аналізі швидкісного зубофрезерування при відновленні крупногабаритних зубчастих коліс. Як було вже визначено в розділі 3 (формули (3.4)–(3.5)), для швидкісного зубофрезерування зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс в якості вихідної змінної є коефіцієнт ефективності формоутворення поверхневого шару (K_ρ). Цей висновок може бути зроблений, зокрема тому, що ріжуча здатність ($k_{\text{фр}}$) спеціальних зубообробних фрез для зустрічного зубофрезерування зберігається приблизно на одному і тому ж рівні, тобто $k_{\text{фр}} = \text{Const}$ протягом періоду стійкості фрези.

4.1.2 Області оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки відновлених крупномодульних зубчастих коліс

Розглянуті особливості вибору параметрів режиму зубофрезерування 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:

$$J_Q = \frac{v \cdot S \cdot K_\rho \cdot t}{T + \tau_{cm}}. \quad (4.18)$$

Зазвичай при визначенні максимуму виразу (4.18) 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 [146] і, як наслідок, до помилкового висновку про недосяжність максимуму функції J_Q при використанні стійкісних залежностей степеневого вигляду [180, 184]. У зв'язку з цим при оптимізації процесу обробки по продуктивності визначають максимум вираження J_Q , вважаючи один з параметрів v, S, t змінним, а два інших – постійними. Враховуючи, що вплив кожного з параметрів режиму різання на показник якості різне, необхідна об'єктивна оцінка при виборі параметра для керуючого впливу [194, 273]. Для цього скористаємося виразом:

$$J_Q = \frac{v \cdot S \cdot K_\rho \cdot t \cdot c_v^{\frac{1}{m}}}{c_m^{\frac{1}{m}} + \tau_{cm} \cdot v^{\frac{1}{m}} \cdot S^{\frac{y}{m}} \cdot t^{\frac{x}{m}}}. \quad (4.19)$$

При заданих і незмінних v, t та змінної S вираз (4.19) представляє собою функцію від подачі S , причому для $m < y < 1$ як при $S \rightarrow 0$, так і при $S \rightarrow \infty$, значення $J_Q(S) \rightarrow \infty$, оскільки $\lim_{S \rightarrow \infty} f(J_Q) = 0$.

Якщо $J_Q(S)$ має максимум, то в точці екстремуму $\frac{\partial J_Q(S)}{\partial S} = 0$.

Тоді отримуємо:

$$S = c_v^{\frac{1}{y}} \cdot \left[\left(\frac{y}{m} - 1 \right)^{\frac{m}{y}} \cdot \tau_{cm}^{\frac{m}{y}} \cdot v^{\frac{1}{y}} \cdot e^{\frac{x}{y}} \right]. \quad (4.20)$$

Після перетворення (4.19) знаходимо:

$$J_Q(S)_{\max} = \frac{m \cdot c_v^{\frac{1}{y}} \cdot t^{\frac{1-m}{y}}}{\left[y \cdot \left(\frac{y}{m} - 1 \right)^{\frac{m-1}{y}} \cdot \tau_{cm}^{\frac{m}{y}} \cdot v^{\frac{1}{y-1}} \right]} . \quad (4.21)$$

При заданих і незмінних S , t та змінної швидкості v , причому для $m < y < 1$ як при $v \rightarrow 0$, так і при $v \rightarrow \infty$, значення $J_Q(v) \rightarrow \infty$, оскільки $\lim_{v \rightarrow \infty} f(J_Q) = 0$.

Якщо $J_Q(v)$ має максимум, то в точці екстремуму $\frac{\partial J_Q(v)}{\partial v} = 0$. Тоді з вираження (4.19) визначаємо:

$$v = \frac{K_\rho \cdot c_y}{\left[\left(\frac{1}{m} - 1 \right)^m \cdot \tau_{cm}^m \cdot t^x \cdot S^y \right]} . \quad (4.22)$$

Після перетворення (4.19), враховуючи (4.22) знаходимо:

$$J_Q(v)_{\max} = \frac{m \cdot c_v \cdot t^{1-x} \cdot S^{1-y}}{\left[\tau_{cm}^m \cdot \left(\frac{1}{m} - 1 \right)^{m-1} \right]} . \quad (4.23)$$

Функції (4.21) і (4.23) для різних S і різних v представлені на рис. 4.4.

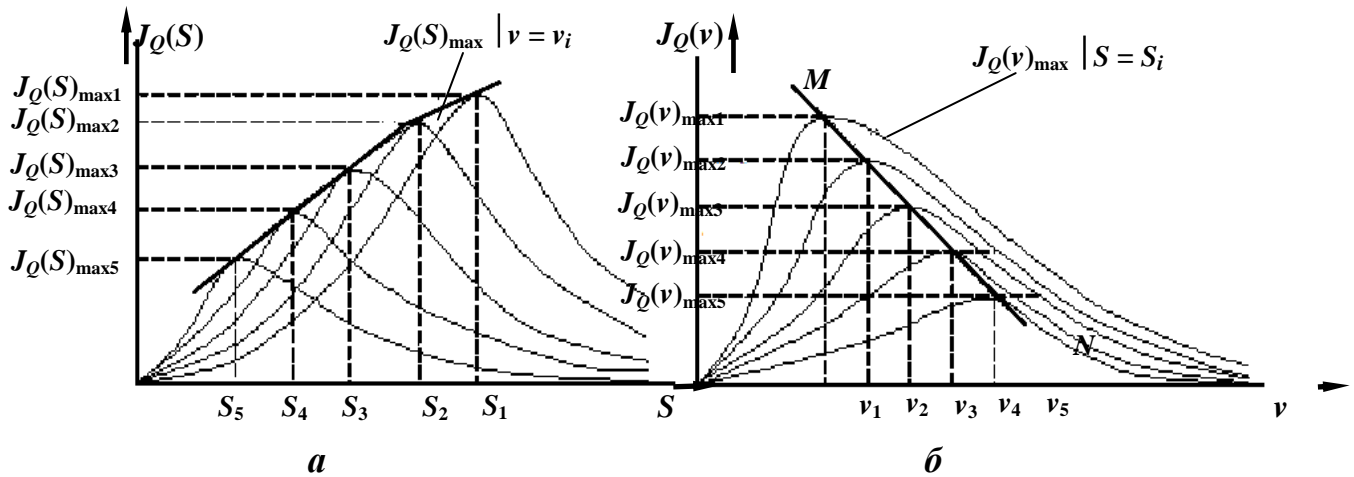


Рисунок 4.4 – Зміна показника якості процесу обробки:

a – при зміні S і фіксованих значеннях v ;

б – при зміні v і фіксованих значеннях S

Перетворимо вираження (4.21) з урахуванням (4.20) і залежність (4.23) до виду:

$$J_Q(S)_{\max} = A \cdot F_1, \quad (4.24)$$

$$J_Q(v)_{\max} = A \cdot F_2, \quad (4.25)$$

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

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 $\frac{\partial F_1}{\partial y} = 0$.

При цьому отримуємо $(1-m) \cdot y \cdot (y-m)^{1-m} - (y-m)^{1-m} = 0$, що має місце при $y = 1$, тобто $F_1 = F_2$. Отже, для всіх y в інтервалі $m < y < 1$ має місце

$J_Q(v)_{\max} > J_Q(S)_{\max}$, тому алгоритм управління і систему оптимізації процесу зубофрезерування слід будувати з урахуванням виразу (4.22), тобто по параметру v . У цьому випадку рішення задачі оптимізації може бути представлено системою рівнянь (за умови, що $S = S_{\text{дон}}; t = t_{\text{дон}}$):

$$T_Q = \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \cdot \tau_{cm}; \quad (4.26)$$

$$v_Q = \frac{c_v}{\left[\left(\frac{1}{m-1} \right)^m \cdot \tau_{cm}^m \cdot S_{\text{дон}}^y \cdot t_{\text{дон}}^x \right]}; \quad (4.27)$$

$$J_{Q\max} = \frac{m \cdot c_v \cdot t_{\text{дон}}^{1-x} \cdot S_{\text{дон}}^{1-y}}{\left[\tau_{cm}^m \cdot \left(\frac{1}{m-1} \right)^{m-1} \right]}. \quad (4.28)$$

Графік функції $J_Q(v)$ залежності (4.28) на рис. 4.4 (б) має вигляд однієї з кривих для $S_i = S_{\text{дон}}; t = t_{\text{дон}}$.

При забезпеченні заданої точності обробки *дійсна продуктивність* з урахуванням виразу (4.28) визначається залежністю:

$$J_D = \frac{m \cdot c_v \cdot t_{\text{дон}}^{1-x} \cdot (S_{\text{дон}}^{2-y} - S_i^{2-y})}{\left[\tau_{cm}^m \cdot \left(\frac{1}{m} - 1 \right) \cdot (2-y) \cdot (S_{\text{дон}} - S_i) \right]}, \quad (4.29)$$

причому $J_D < J_{Q\max}$.

Вираз (4.29) визначає досяжне при даних обмеженнях по точності обробки значення продуктивності в умовах, коли оптимізація здійснюється по одному параметру швидкості різання v , а параметр S використовується для управління точністю обробки. На рис. 4.4 б показано, що MN є

геометричним місцем розташування допустимих значень продуктивності (J_D).

Таким чином, представляється можливим здійснювати управління якістю обробки при зміні подачі S відповідно до залежності (4.21) і при зміні швидкості v відповідно до виразу (4.23) при максимальній продуктивності, тобто $J_D < J_{Q_{\max}} = \text{Const}$.

Загальної постановки задачі оптимізації зубообробки.

При $S = S_{\text{дон}} = \text{Const}$; $t = t_{\text{дон}} = \text{Const}$; $v = \text{var}$, використовуючи (4.26), (4.27) знаходимо співвідношення, відповідні точці на поверхні відгуку.

$$\left. \begin{aligned} v_Q &= \sqrt[m]{\frac{C_x \cdot c_v}{\left(\frac{1}{m-1}\right)^m \cdot \tau_{cm}^m \cdot S_{\text{дон}}^y \cdot t_{\text{дон}}^x}}, \\ T_Q &= C_x \cdot \tau_{cm} \cdot \left(\frac{1}{m} - 1\right). \end{aligned} \right\} \quad (4.30)$$

У цій точці $J_Q = J_{Q_{\max}}$, а оптимальне значення T_Q залежить від параметра C_x .

При $t = t_{\text{дон}} = \text{Const}$; $v = \text{var}$; $S = \text{var}$ співвідношення матимуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{v \cdot S}{c_v^m + \tau_{cm}^m \cdot t_{\text{дон}}^m \cdot v^m \cdot S^m} &= \frac{(1-m) \cdot v_Q \cdot S_{\text{дон}}}{c_v^m}, \\ T_Q &= \frac{C_x \cdot (1-m) \cdot \tau_{cm} \cdot v_Q \cdot S_{\text{дон}}}{\left[v \cdot S - (1-m) \cdot v_Q \cdot S_{\text{дон}}\right]}. \end{aligned} \right\} \quad (4.31)$$

Співвідношення (4.31) відповідають кривій, на якій $J_Q = J_{Q_{\max}} = \text{Const}$, причому оптимальне значення T_Q залежить від C_x , v і S .

Рівняння кривої оптимального поєднання параметрів зубообробки при

максимальній продуктивності ($J_D < J_{Q_{\max}} = Const$) матиме вигляд:

$$\frac{v \cdot S \cdot t}{c_v^m + C_x \cdot \tau_{cm} \cdot t^m \cdot v^m \cdot S^m} = \frac{m \cdot c_v^{1-\frac{1}{m}} \cdot S_{\text{дон}}^{1-y} \cdot t_{\text{дон}}^{1-x}}{\left[\tau_{cm}^m \cdot \left(\frac{1}{m} - 1 \right)^{m-1} \right]} \quad (4.32)$$

Таким чином, представляється можливим здійснювати управління якістю обробки при зміні подачі S відповідно до залежності (4.12) і при зміні швидкості v відповідно до виразу (4.32).

Втрата продуктивності, що виникає визначається з відношення $\frac{J_{Q_{\max}}}{J_D}$.

Отже, використовуючи алгоритм управління можна підвищити продуктивність обробки металів різанням за рахунок досягнення значення

$J_D < J_{Q_{\max}} = Const$. Дійсно, при $S_i \rightarrow S_{\text{дон}}$ відношення $\frac{J_{Q_{\max}}}{J_D} \rightarrow 1$, а при

$S_i \rightarrow 0$ відношення $\frac{J_{Q_{\max}}}{J_D} \rightarrow (2 - y) > 1$, так як $y < 1$. Графік відношення

$\frac{J_{Q_{\max}}}{J_D}$ в залежності від зміни S показаний на рис. 4.5.

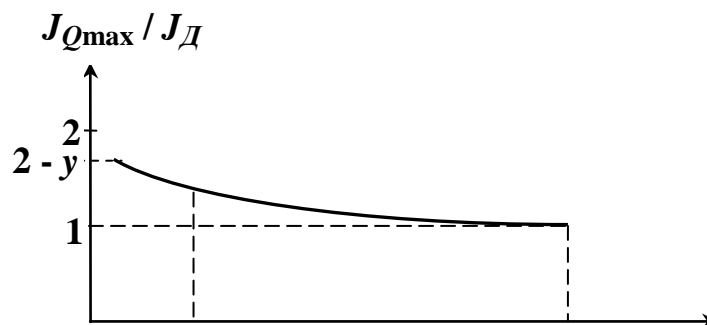


Рисунок 4.5 – Графік відношення $J_{Q_{\max}} / J_D$ в залежності від зміни S

Проведені дослідження і отримані залежності дозволяють перейти до

побудови областей оптимального управління процесом зубообробки і розробці систем оптимального управління, що реалізують такі алгоритми.

4.1.3 Схема багатокритеріальній оптимізації процесу відновлення крупномодульних зубчастих коліс після наплавки

Узагальнена модель і еквівалентна структурна схема для різних процесів зубообробки має свої особливості, що відбиваються в узагальненій математичній моделі і еквівалентній структурній схемі. Розглянемо ці особливості для процесів зустрічного і швидкісного зубофрезерування зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

При зустрічному зубофрезеруванні пружну систему представимо у вигляді послідовно включених елементів ділильного столу $W_c(p)$ і шпindelних $W_{uu}(p)$ груп зубообробного верстата. Тоді передатна функція пружної системи [184, 185]:

$$W_{n.c}(p) = W_c(p) + W_{uu}(p), \quad (4.33)$$

причому:

$$W_c(p) = \frac{k_{2c}}{(T_1^2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1)} - \frac{k_{1c}}{(T_1^2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1)} = W_{y_2}(p) - W_{y_1}(p); \quad (4.34)$$

$$W_{uu}(p) = \frac{k_{1uu} \cdot \sin \psi}{(T_3^2 p^2 + T_4 p + 1)} - \frac{k_{2uu} \cdot \frac{\cos \psi - \sin \omega}{\cos \omega}}{(T_3^2 p^2 + T_4 p + 1)} = W_{y_3}(p) \cdot (1 - W_{y_4}(p)) \cdot l, \quad (4.35)$$

де $k_{1c} = \frac{\cos \psi \cdot \sin \psi}{j_1}$; $k_{2c} = \frac{\cos \psi \cdot \sin \psi}{j_2}$; j_1 и j_2 – головні жорсткості пружної

системи ділильного столу зубообробного верстата; k_{1uu} ; k_{2uu} – деформації в шпindelній групі (відповідно), викликані дією одиничних сил, прикладених в точках контакту фрези з оброблюваним зубчастим колесом і розташування наведеної сили від передачі; ψ – кут між напрямком дії сили різання P і віссю

Z ; ω – кут підйому черв'ячної модульної фрези; T_1, T_2 – інерційні постійні часу жорсткості ділильного столу, що має два ступені свободи; T_3, T_4 – постійні часу демпфірування згинальної і крутильної шпindelної групи (відповідно) верстата.

Передатна функція процесу зубофрезерування по збурюючому впливу має вигляд:

$$W_p^t(p) = \frac{k_p \cdot (1 - T_v \cdot p)}{(1 + T_p \cdot p)}, \quad (4.36)$$

де k_p – жорсткість різання ($k_p = k \cdot t_p$; $k = \sigma_0$; t_p – питома сила різання; σ_0 – умовна межа плинності); $T_v = \frac{a_i \cdot \xi}{v}$ – змінна стружкоутворення (ξ – коефіцієнт усадки стружки; a_i – змінна товщина або задане значення товщини стружки); $T_p = \frac{K_p}{v}$ (K_p – коефіцієнт формоутворення поверхневого шару).

На рис. 4.6 показана узагальнена структурна схема процесу зубофрезерної обробки, яка побудована з урахуванням зустрічного фрезерування.

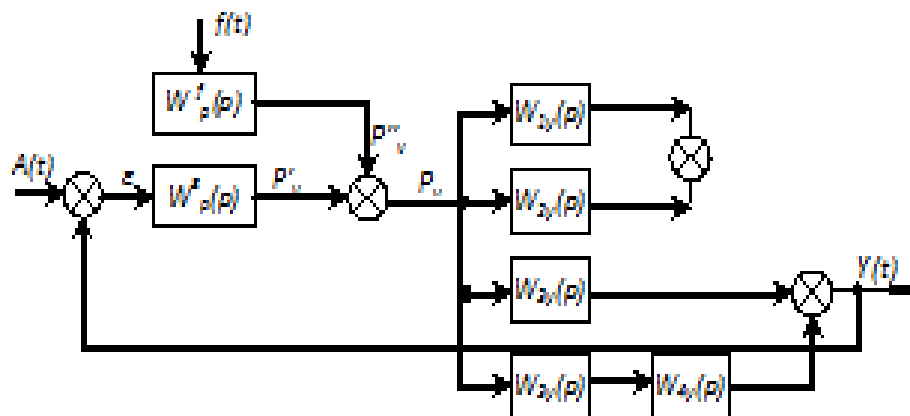


Рисунок 4.6 – Узагальнена структурна схема процесу зубофрезерної обробки при зустрічному зубофрезеруванні

$$P_y = W_p^s(p) \cdot \varepsilon + W_p^t(p) \cdot f(p), \quad (4.37)$$

де $\varepsilon = (A - Y)$ – встановлена помилка, а для випадку дії збурюючих впливів

$f(t)$ на вході величина $A = 0$, то

$$P_y = -W_p^S(p) \cdot Y(p) + W_p^t(p) \cdot f(p). \quad (4.38)$$

Враховуючи, що $Y = P_y \cdot W_y(p)$, з формули (4.38) отримуємо:

$$Y = W_y(p) \cdot \left[W_p^t(p) \cdot f(p) - W_p^S(p) \cdot Y(p) \right] \quad (4.39)$$

Передатна функція по збурюючому впливу може бути записана в такому вигляді:

$$W_{ВПД}^S(p) = \frac{Y(p)}{f(p)} = \frac{W_y(p) \cdot W_p^t(p)}{1 + W_y(p) \cdot W_p^S(p)} = \frac{g_7 p^7 + g_6 p^6 + \dots + g_1 p + g_0}{u_9 p^9 + u_8 p^8 + \dots + u_1 p + u_0}. \quad (4.40)$$

Аналогічно функція $W_{ВПД}^S(p)$ по керуючому впливу визначається з формули (4.37), при $f = 0$, тобто при $P_y = W_p^S(p) \cdot A(p) - W_p^S(p) \cdot Y(p)$, приймає вигляд:

$$W_{ВПД}^S(p) = \frac{Y(p)}{f(p)} = \frac{W_y(p) \cdot W_p^S(p)}{1 + W_y(p) \cdot W_p^S(p)} = \frac{c_7 p^7 + c_6 p^6 + \dots + c_1 p + c_0}{u_9 p^9 + u_8 p^8 + \dots + u_1 p + u_0}. \quad (4.41)$$

При швидкісному зубофрезеруванні фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки, складні функціональні зв'язки між процесами в замкнутій динамічній системі верстата, які проявляються через взаємодію елементів ДВС з процесами різання, призводять, як вже було показано в розділі 2 (формули (2.9)–(2.10)), до зміни складової P_y сили різання при зміні жорсткості динамічної верстатної системи $J_{ДВС}$.

Сила різання, деформуючи пружну систему ДВС, викликає в свою чергу відносні зміщення дискових немодульних фрез і оброблюваної заготовки і, як наслідок, змінення товщини зрізаного шару (a_i) на величину пружних деформацій (переміщень) $\Delta_{пр. ДВС}$ в системі ДВС.

$$t_p(t) = \left[\int_0^t v_n(t) dt - \int_0^t v_n(t - T_{\phi p}) dt \right] - \left[\Delta_{np.ДВС}(t) - \delta_y(t - T_{\phi p}) \right] - \left[\Delta_{np.ДВС}(t) - k_\rho(t - T_{\phi p}) \right], \quad (4.42)$$

де $\left[\int_0^t v_n(t) dt - \int_0^t v_n(t - T_{\phi p}) dt \right]$ – координата ріжучої крайки інструменту з урахуванням моменту часу $(t - T_{\phi p})$; $T_{\phi p} = \frac{1}{n}$ – час одного обороту; n – число оборотів фрези в одиницю часу; $\left[\Delta_{np.ДВС}(t) - \delta_y(t - T_{\phi p}) \right]$ – пружні деформації верстата в радіальному напрямку з урахуванням моменту часу $(t - T_{\phi p})$; $\delta_y(t) = \int_0^t k_\rho \cdot P_y(t) dt$; $\left[\Delta_{np.ДВС}(t) - k_\rho(t - T_{\phi p}) \right]$ – пружні деформації верстата в радіальному напрямку на куті ковзання фрези $\psi_{ков}$.

Вираз (4.42) є математичною моделлю об'єкта управління, де у відповідних передатних функціях процесу різання і пружної системи ДВС враховані основні параметри об'єкта і їх взаємозв'язок.

На рис. 4.7 приведена узагальнена структурна схема процесу швидкісного зубофрезерування з передатними функціями ланок, що входять до неї.

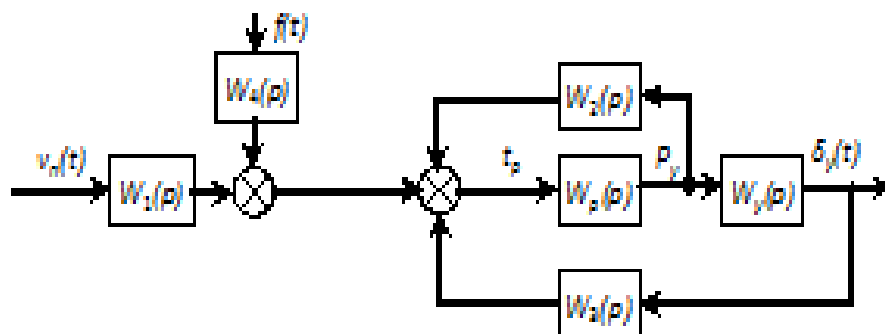


Рисунок 4.7 – Узагальнена структурна схема процесів зубофрезерної обробки при швидкісному зубофрезеруванні

Загальне рівняння об'єкта управління в операторній формі:

$$v_n(p) \cdot W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_y(p) + f(t) \cdot W_4(p) \cdot W_p(p) - \Delta_{np.ДВС}(p) \cdot W_2(p) - \\ - \Delta_{np.ДВС}(p) \cdot W_2(p) \cdot W_p(p) \cdot W_y(p) = \Delta_{np.ДВС} \cdot \quad (4.43)$$

Вирази для передатних функцій об'єкта управління *по збурюючому і керуючому впливам* відповідно до узагальненої структури мають такий вигляд:

$$W_{uu}^t(p) = \frac{\delta_y(p)}{f(p)} = \frac{(d_4 \cdot p^4 + d_3 \cdot p^3 + \dots + d_0)}{(F_7 \cdot p^7 + F_6 \cdot p^6 + \dots + F_0)}; \quad (4.44)$$

$$W_{uu}^v(p) = \frac{\delta_y(p)}{v_p(p)} = \frac{(B_2 \cdot p^2 + B_1 \cdot p^1 + B_0)}{(F_7 \cdot p^7 + F_6 \cdot p^6 + \dots + F_0)}. \quad (4.45)$$

Вирази (4.40), (4.41), (4.44) і (4.45), відповідно, для процесів зустрічного зубофрезерування і швидкісного зубофрезерування дозволяють досліджувати вплив різних сталих часу, що входять в ці вирази, на стійкість всієї системи в цілому і в той же час оптимізувати параметри забезпечення продуктивності, точності та якості зубообробки зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з урахуванням основних показників зубчастих передач – їх надійності і ККД, які в значній мірі визначаються експлуатаційними властивостями зубчастих циліндричних коліс (межею витривалості, зносостійкості, коефіцієнтом тертя, константною жорсткістю, міцністю). У свою чергу експлуатаційні властивості характеризуються станом поверхневого шару зубчастих коліс, що визначається процесом їх виготовлення з урахуванням динамічних властивостей об'єктів управління – зубообробного устаткування.

4.2 Оцінка характеру зміни якісних характеристик зубчастої передачі в результаті відновлення зношених крупногабаритних зубчастих коліс

Робоча модель і спрощена структура об'єкта управління пов'язана з оптимізацією зубообробного обладнання, визначається не тільки точністю ідентифікації та адекватністю математичної і фізичної моделей об'єкта управління, а й виявленням допустимого ступеня спрощення динамічної моделі системи без збитку для необхідних показників якості обробки. З метою спрощення моделі, передатні функції замкнутої динамічної верстатної системи (ДВС) по збудуючому (4.40), (4.44) і керуючому (4.41), (4.45) впливам досліджуються за допомогою ітераційного методу уточнення значення кореня нелінійного функціонального (операторного) рівняння (узагальнення методу Ньютона). Для рівняння $P(x) = 0$, де P – нелінійна операція.

Аналітично-експериментальне дослідження об'єкта управління зводиться до аналізу перехідних процесів, побудованих з використанням стандартних програм, для чого поліноми передатних функцій (4.40)–(4.41) і (4.44)–(4.45) спочатку записуються в нормальному вигляді Коші:

$$\left. \begin{aligned} Y(u_9 p^9 + u_8 p^8 + \dots + u_1 p + u_0) &= f(g_7 p^7 + g_6 p^6 + \dots + g_1 p + g_0) \\ Y(u_9 p^9 + u_8 p^8 + \dots + u_1 p + u_0) &= A(c_6 p^6 + c_5 p^5 + \dots + c_1 p + c_0). \end{aligned} \right\} (4.46)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta_{np. ДВС} (F_7 p^7 + F_6 p^6 + \dots + F_1 p + F_0) &= f(d_4 p^4 + d_3 p^3 + d_2 p^2 + d_1 p + d_0); \\ \delta_y (F_7 p^7 + F_6 p^6 + \dots + F_1 p + F_0) &= v_p (B_2 p^2 + B_1 p + B_0). \end{aligned} \right\} (4.47)$$

У зв'язку з аналогічністю процедури для всіх рівнянь систем (4.46) і (4.47) приводиться послідовність визначення системи рівнянь першого

порядку (звільнення від коефіцієнта при старшому члені виразів) тільки для випадку передатної функції процесу зустрічного зубофрезерування по обурюючому впливі:

$$\left[\begin{aligned} Y [p^9 + (u_8/u_9)p^8 + (u_7/u_9)p^7 + \dots + (u_1/u_9)p + (u_0/u_9)] &= \\ &= f [(g_7/u_9)p^7 + (g_6/u_9)p^6 + \dots + (g_1/u_9)p + (g_0/u_9)] ; \\ p[Y (p^8 + (u_8/u_9)p^7 + \dots + (u_1/u_9)) - f \cdot ((g_7/u_9)p^6 + (g_6/u_9)p^5 + \dots + (g_1/u_9))] &= \\ &= (g_0/u_9)f - (u_0/u_9) \cdot Y . \end{aligned} \right.$$

$$\left[\begin{aligned} Y [p^8 + (u_8/u_9)p^7 + \dots + (u_1/u_9)] - f \cdot [(g_7/u_9)p^6 + (g_6/u_9)p^5 + \dots + (g_1/u_9)] &= \\ &= Y_1 - (u_0/u_9) Y + (g_0/u_9)f ; \\ p[Y (p^7 + (u_8/u_9)p^6 + \dots + (u_2/u_9)) - f \cdot ((g_7/u_9)p^5 + (g_6/u_9)p^4 + \dots + (g_2/u_9))] &= \\ &= (g_1/u_9)f - (u_1/u_9) \cdot Y . \end{aligned} \right.$$

$$Y [p^2 + (u_8/u_9)p + (u_7/u_9)] - f \cdot (g_7/u_9) = Y + (g_6/u_9)f ;$$

$$p[Y(p + (u_8/u_9))] = (g_7/u_9)f - (u_7/u_9)Y ;$$

$$\left[\begin{aligned} Y[p + (u_8/u_9)] &= Y_8 - (u_7/u_9)Y + (g_7/u_9)f \\ p[Y] &= -(u_8/u_9)Y ; \end{aligned} \right.$$

$$\left[\begin{aligned} Y[p] &= Y_8 - (u_8/u_9)Y \\ Y_9 &= -(u_8/u_9)Y . \end{aligned} \right.$$

Далі наводяться отримані вирази до вигляду системи рівнянь 1-го порядку і, приймаючи обурює вплив $f(t) = 1$ Далі наводяться отримані вирази

до вигляду системи рівнянь 1-го порядку і, приймаючи обурює вплив $и_0 \dots и_9$; $g_0 \dots g_i$, отримують:

$$\left. \begin{aligned} Z[1] &= -V_1 Y[9] + V_2; \\ Z[2] &= Y[1] - V_3 Y[9] + V_4; \\ Z[3] &= Y[3] - V_5 Y[9] + V_6; \end{aligned} \right\} \quad (4.58)$$

$$[9] = Y[8] - V_{17} Y[9] + V_{18}.$$

Виконавши аналогічні процедури для інших рівнянь систем (4.56) і (4.55), визначають ряд систем рівнянь виду (4.58), що дозволяють за допомогою ПК здійснити аналіз впливу окремих елементів структур, показаних на рис. 4.5, а і б для процесів зустрічного зубофрезерування і швидкісного зубофрезерування, на характер перехідного процесу.

На рис. 4.7 наведені спрощені структури об'єкта управління процесу зустрічного зубофрезерування, отримані з узагальненої структурної схеми (рис. 4.7, а) з урахуванням поєднань наступних елементів:

$$a - W_{1y}(p) = 0; \quad б - W_{2y}(p) = 0; \quad в - W_{3y}(p) = 0; \quad г - W_{4y}(p) = 0;$$

$$д - W_{5y}(p) = 0; \quad W_{1y}(p) = 0; \quad e - W_{4y}(p) = 0; \quad W_{2y}(p) = 0;$$

$$ж - W_{3н}(p) = 0; \quad з - T' = 0; \quad W_{3н}(p) = 0; \quad u - W_{3н}(p) = 0;$$

$$T_b = T' = 0; \quad \kappa - W_{3y}(p) = 0; \quad W_{1y}(p) = 0; \quad л - W_{3y}(p) = 0;$$

$$W_{2y}(p) = 0.$$

Аналіз впливу окремих елементів і їх параметрів на характер перехідного процесу показує, що постійні часу T_b и T' , а також ланка $W_{3y}(p)$ несуттєво впливають на динамічні властивості об'єкта управління і в більшості випадків ними можна знехтувати. З огляду на сказане, модель процесу зустрічного зубофрезерування можна спростити і представити

структурою [184, 244] з передавальними функціями по обурює і керуючому впливам (рис. 3.18, *u*):

$$W_{спид}^f(p) = Y(p)/f(p) = W_p^f(p) = W_p^f(p) \cdot W_{y.c.}(p) / [1 + W_p^s(p) \cdot W_{y.c.}(p)] =$$

$$= (g_2 p^2 + g_1 p + g_0) / (l_5 p^5 + l_4 p^4 + \dots + l_0);$$

$$W_{спид}^s(p) = Y(p) \cdot A(p) = W_p^s(p) \cdot W_{y.c.}(p) / [1 + W_p^s(p) \cdot W_{y.c.}(p)] =$$

$$= (c_2 p^2 + c_1 p + c_0) / (l_5 p^5 + l_4 p^4 + \dots + l_0),$$

де $W_p^s(p) = k_p / (T_p p + 1)$; $W_p^i(p) = k_p / (T_y p + 1)$; $W_{y.c.}(p) = W_c(p) =$

$$= W_{2y}(p) - W_{1y}(p) = k_{2c} / (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) - k_{1c} / (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1).$$

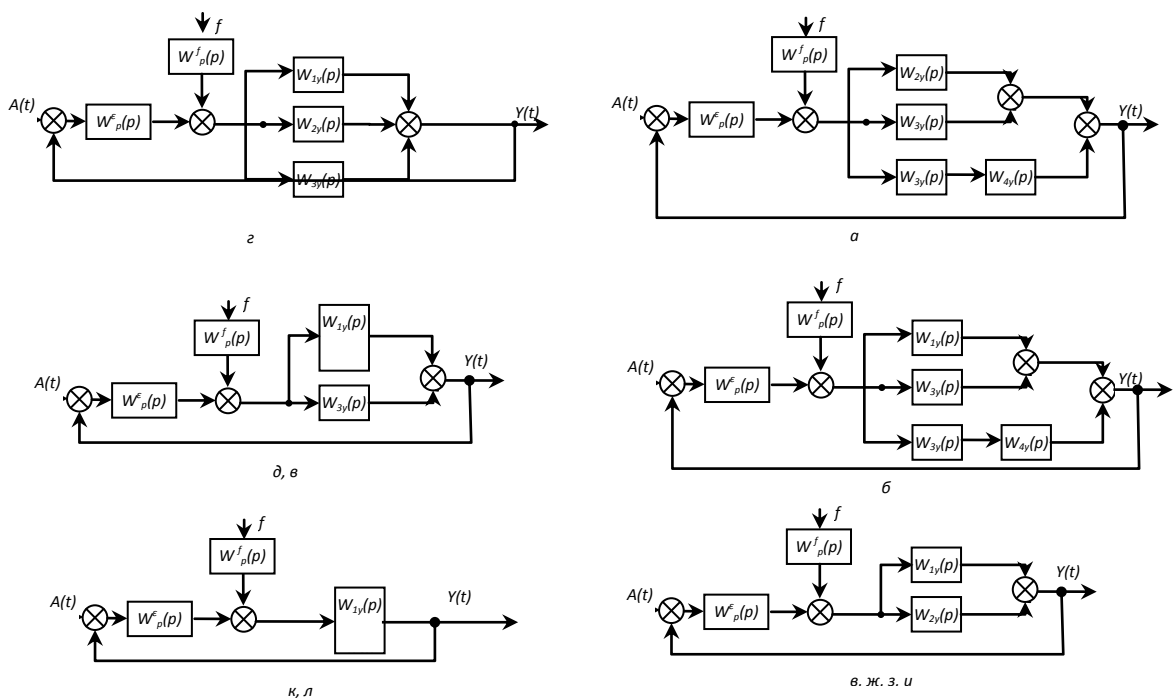


Рисунок 4.7 - Спрощені структури об'єкта управління процесу зустрічного швидкісного зубофрезерування

Практичний інтерес для конкретних видів обробки і умов швидкісного зубофрезерування представляють поєднання елементів структури, показаної на рис. 4.7, б, з наступними значеннями передавальних функцій ланок:

$$a - W_p(p) = k_p; W_p^f(p) = k_p^f; W_y(p) = k_y; б - W_p(p) = k_p/(T_p p + 1);$$

$$W_p^f(p) = k_p^f/(T_p p + 1); W_y(p) = k_y; в - W_p(p) = k_p; W_p^f(p) = k_p^f;$$

$$W_y(p) = k_y/(T_1^2 p^2 + T_p + 1); з - W_p(p) = k_p/(T_p p + 1);$$

$$W_p^f(p) = k_p^l/(T_p p + 1); W_y(p) = k_y/(T_1^2 + T_2 p + 1).$$

Надалі після вибору математичної моделі і структури об'єкта управління на етапі реалізації фізичної моделі здійснюється оцінка адекватності математичної моделі ідентифікованого об'єкта.

4.3 Методика вибору і призначення параметрів процесу відновлення геометрії і фізікомеханічних властивостей циліндричних крупномодульних зубчастих передач

Вирішуючи спільно рівняння (4.13) і (4.27), визначаємо залежність $v = f(t)$ и $v = f(S)$ для забезпечення необхідної точності при призначенні параметрів процесу відновлення геометрії і фізікомеханічних властивостей циліндричних крупномодульних зубчастих передач в умовах максимально досяжної продуктивності у всьому діапазоні зміни параметрів обробки, в т. ч. товщини зрізаного шару і подачі [182, 243]

$$v_{\max}^{(p_y)}(s) = c_v c_p^{xv/xp} / [\tau_{cm}^m (\frac{1}{m} - 1)^m \cdot P_y^{xv/xp} \cdot S^{(y_v - \frac{v^y p}{x_v})}]; \quad (4.59)$$

$$v_{\max}^{(py)}(t) = c_v c_p^{yv/yp} / [t_{cm}^m (\frac{1}{m} - 1)^m \cdot P_y^{yv/yp} \cdot t^{(x_v - \frac{y_v x_p}{y_p})}]. \quad (4.60)$$

Враховуючи, що $x_v < y_v$; а $x > y_p$ можна зробити висновок: $y_v - x_v y_p / x_p > 0$; $x_v - y_v x_p / y_p < 0$.

На рис. 4.8, а кривої 1 показана залежність (4.59); кривої 2 - залежність (4.60), що є геометричним місцем точок, що представляють оптимальні поєднання параметрів зубофрезерування для забезпечення заданої точності при максимально досяжної продуктивності в умовах діючих і енергетичних обмежень.

Обмеження по хвилинній подачі представлено кривою 3 в площині $v = f(S)$; залежність $v = f(S)$ при мінімально допустимій подачі – кривий

4. Спільне рішення рівнянь по мінімально допустимій подачі дозволяє встановити залежність

$$v = A/t^{xp/(1-yv)}, \quad (4.61)$$

$$\text{где } A = [k_p 1000^{yp} c_p t ((\frac{1}{m} - 1)^m \cdot t_{cm}^m \cdot S_{Mmin}^{yv} \cdot \pi^{yv} \cdot D^{yv})]^{1/(1-yv)}.$$

Максимально допустимая подача S_{max} (S_z) обумовлена вимогами до якості поверхневого шару зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс визначається емпіричними залежностями для розрахунку параметрів стану евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс при механічних методах їх обробки.

Швидкісне зубофрезерування фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки після термообробки ТВЧ і спреерной гарту (сталь 34ХНМ) забезпечує:

$$R_a = 4830 \cdot \frac{S_z^{1.69} \cdot t^{0.15}}{V^{1.25} \cdot \rho^{0.14} \cdot Z_1^{0.24} \cdot Z_2^{0.28} \cdot (HRC)^{4.02} \cdot t^{0.32} \cdot K_{\delta\delta}^{1.24}} \cdot \frac{1}{k_m \cdot k_0}; \quad (4.62)$$

$$R_p = 8730 \cdot \frac{S_z^{1.15}}{V^{1.27} \cdot \rho^{0.24} \cdot Z_1^{0.14} \cdot Z_2^{0.17} \cdot (HRC)^{2.82} \cdot t^{0.26} \cdot K_{\delta\delta}^{1.24}} \cdot \frac{1}{k_m \cdot k_0}; \quad (4.63)$$

$$W_z = 5500 \cdot \frac{S_z^{1.01} \cdot t^{0.46} \cdot \rho^{0.16} \cdot \gamma^{0.54}}{V^{1.52} \cdot \rho^{0.24} \cdot Z_1^{0.14} \cdot Z_2^{0.17} \cdot (HRC)^{2.82} \cdot K_{\delta\delta}^{1.24}}; \quad (4.64)$$

$$S_m = 17 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(HRC)^{1.58}}{\rho^{0.24} \cdot Z_1^{0.07} \cdot Z_2^{0.11} \cdot V^{2.04}} \cdot \frac{k_0}{k_m}. \quad (4.65)$$

де S_z – подача на зуб (0,06–0,5 мм); S_o – подача на оборот (0,1–0,5 мм/об); V – швидкість різання при фрезеруванні (0,6 – 5 м/с); t – глибина різання (0,3–2,5 мм); ρ – радіус округлення різальної крайки ($\rho = 0,05$ –0,8 мм); γ – передній кут фрези; RC – твердість оброблюваного зубчастого колеса (HRC 30–60); Z_1 та Z_2 – число зубів нарізається зубчастого колеса і число різальних крайок зубів фрези; k_M – коефіцієнт, що залежить від марки оброблюваного матеріалу; k_0 – коефіцієнт, що залежить від способу формоутворення евольвентних поверхонь циліндричного зубчастого колеса.

Швидкість різання в функції від глибини різання при максимально допустимій подачі (крива 5) визначається виразом (4.32) при $S = S_{max}$.

Робота системи управління на граничних значеннях параметрів зубофрезерування при забезпеченні заданої точності з максимально досяжною продуктивністю в умовах діючих і енергетичних обмежень може знаходитися в екстремальних умовах з можливою нестабільністю процесу формоутворення.

У зв'язку з цим при управлінні технологічними параметрами зубофрезерування необхідно визначити обмеження на допустиму подачу і глибину різання по вібраціям на кордоні області стійкої роботи динамічної верстатної системи (ДВС).

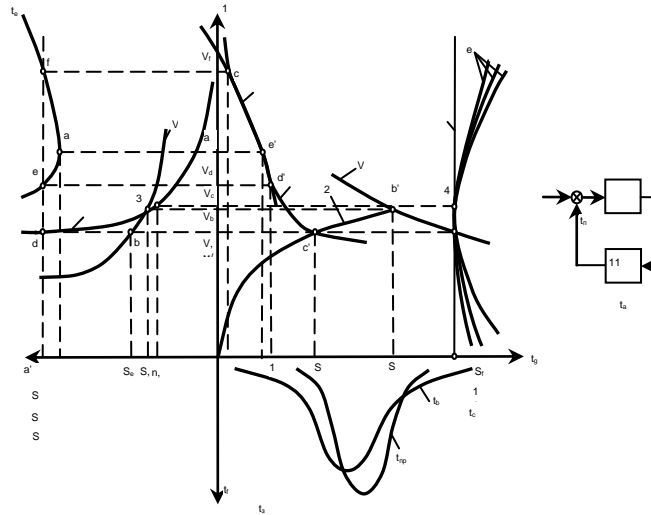


Рисунок 4.8 - Область оптимального управління параметрами
зубофрезерування для забезпечення заданої точності
при максимально досяжній продуктивності (α)
і спрощена схема динамічної системи верстата (б)

На рис. 4.8, б показана спрощена структурна схема замкнутої динамічної системи верстата, елементами якої є пружна динамічна станочная система (ДВС) і параметри зубофрезерування при забезпеченні заданої точності з максимально досяжною продуктивністю. Аналіз динамічної системи верстата дозволяє визначити область стійкої роботи системи ДВС в умовах управління розміром динамічної настройки при максимально досяжній продуктивності.

Передавальні функції пружною динамічної верстатної системи (ДВС) і параметри зубофрезерування при забезпеченні заданої точності з максимально досяжною продуктивністю в операторній формі мають такий вигляд:

$$W_y(p) = Y(p)/P_y(p) = k_y/(T_{2y}p^2 + T_{1y} + 1);$$

$$W_p(p) = P_y(p)/\varepsilon(p) = k_p/(T_p p + 1);$$

де $Y(P)$ – операторний зображення пружного переміщення фрези в радіальному напрямку; $P_y(P)$ – операторний зображення складової сили різання; $\varepsilon(P) = Y^0(P) - Y(P)$, причому $Y^0(P)$ – операторний зображення зміни товщини зрізаного шару α_i , обумовлене зміною динамічної настройки; $T_{2y} = m_y / c_y$; $T_{1y} = n_y / c_y$; $k_y = 1/C_y$ – постійні часу і коефіцієнт передачі динамічної верстатної системи (ДВС) m_y , n_y , c_y – відповідно, маса, коефіцієнт демпфірування і жорсткість динамічної верстатної системи (ДВС) в напрямку осі y ; k_p – коефіцієнт формоутворення поверхневого шару.

Після перетворення рівнянь, отримаємо:

$$v = \frac{aS(T_{2y}\omega^2 - 1)}{T}; \quad t = \frac{(T_{2y}\omega^2 - 1) + T_{1y}^2\omega^2}{(T_{2y}\omega^2 - 1)kk_y}. \quad (4.66)$$

Побудуємо сімейство меж стійкості динамічної системи верстата при зміні ω в межах від $-\infty$ до $+\infty$. Отримаємо геометричні розташування значень глибини різання t від швидкості v при різних фіксованих значеннях величини подачі S з урахуванням мінімального кута ковзання

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{K_{сож} \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi} \quad (\text{криві б}):$$

$$T = \frac{T_{1y}}{kk_y} \left(\frac{v}{aS\xi} + \frac{aS\xi}{vT_{2y}} + \frac{T_{1y}}{T_{2y}} \right). \quad (4.67)$$

Аналіз розташованих кривих $t = f(v)$ для фіксованих значень S показує, що швидкість різання в нижній частині області стійкості невелика і не відповідає сучасним можливостям інструменту, тоді як робота в верхній частині кривих б (рис. 4.8, а) не завжди можлива з -за недостатньої стійкості фрез. У зв'язку з цим слід використовувати діапазон швидкостей різання з урахуванням абсолютної стійкості процесу, розташованої зліва від прямої 7 і є геометричним місцем розташування граничних значень подачі $S_{пр}$. Досягнення системою граничної подачі повинно викликати зменшення подачі на величину, меншу $S_{пр}$. Для визначення значення $S_{пр}$

продифференціюємо вираз (3.80) за швидкістю і прирівняємо похідну нулю. В результаті отримаємо

$$v_{np} = a \cdot S \cdot \xi / \sqrt{T_{2y}}. \quad (4.68)$$

Вирішуючи спільно вираження (4.67) і (4.68), визначимо величину граничної подачі, що забезпечує абсолютну стійкість процесу:

$$S_{np} = T_{1y} \left(2 + \frac{T_{1y}}{\sqrt{T_{2y}}} \right) \left(\frac{1}{kk_y \sqrt{T_{2y}}} \right). \quad (4.69)$$

Нехай $k_p - k_a$ – інтенсивність зміни складової сили різання P_y

від товщини шару, що зрізується $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \varphi$. Жорсткість різання $k_p = kS$. З урахуванням характеристичного рівняння системи після підстановки параметрів T_p і k_v процесу різання і Д-розбиття за параметрами режиму різання v S отримаємо оптимальні значення S і v :

$$\left. \begin{aligned} S &= [T_1^2 \cdot \omega^2 + (T_{2y} \cdot \omega_2 - 1)^2] / [kk_y (T_{2y} \omega^2 - 1)] \\ v &= \frac{[T_{1y}^2 \cdot \omega^2 + (T_{2y} \cdot \omega^2 - 1)^2] a \xi}{T_{1y} \cdot kk_y} \end{aligned} \right\} \quad (4.70)$$

Спільне рішення системи рівнянь (4.70) дозволяє визначити межу стійкості зубофрезерного верстата у вигляді залежності $S = f(v)$ (крива 8):

$$S = v/2(T_{1y/z} \pm \sqrt{T_{1y/z}^2 + 4T_{2y}/(a\xi z)}), \quad (4.71)$$

де $z = (k_y k T_{2y} v) / T_{1y} - a \xi$.

Після підстановки виразу (4.70) в рівняння (4.71) отримуємо залежність, за якою будується крива 9 обмежень швидкості від глибини різання при граничних з точки зору стійкості процесу значеннях подачі. Криві 10; 11 характеризують закони випадкового розподілу похибок в партії η оброблюваних циліндричних зубчастих коліс.

Частіше використовується завдання управління процесом зубообработки в більш узагальненій постановці, що враховує витрати як живої, так і

уречевленої праці: забезпечення необхідної точності обробки при досягненні мінімальної собівартості цього процесу.

собівартість C_T являє собою змінну частину собівартості зуборізної операції, що залежить від режиму різання.

$$C_{yn} = (BC_l / vSt) [1 + (I/B) / T], \quad (4.72)$$

де $C_i = \pi D_{fp} Lh / 1000$; D ; L – відповідно, діаметр фрези і довжина переміщення фрези з урахуванням перебега фрези; h – припуск на обробку; I – сума витрат за період стійкості T , пов'язаних з експлуатацією фрези; B – вартість верстато-хвилини без урахування інструментальної складової.

Задача оптимального керування зводиться до підтримки такого поєднання параметрів t ; S ; v , при якому досягається мінімум собівартості C_{yn} або максимум оціночної функції J_c :

$$J_c = I / C_{yn} = vSt [T / (BT + B\tau_{cm} + I)]. \quad (4.73)$$

Припустимо, що коефіцієнти, що входять у оціночну функцію J_c , для вузького інтервалу часу достовірні і незмінні, а параметри різання не залежать від часу. Тоді, скориставшись степеневі апроксимацією залежності між стійкістю інструмента та параметрів режиму різання та продифференціював вираз (4.74) за період стійкості T , визначимо значення T_3 , якому відповідає максимум J_{cmax} , з виразу (4.24). Економічне значення швидкості різання v_c , при якій досягається T_3 , визначається виразом (4.24). Розглянемо характер зміни показника оптимальності при $t = \text{const}$ (v і S – var). Вираз (4.24) приймає вигляд

$$v_c = c_2 / S^{3\nu}. \quad (4.74)$$

Графічно оціночна функція в цьому випадку інтерпретується поверхнею відгуку в тривимірному просторі, що представляє собою об'ємну модель залежності собівартості від параметрів v ; S . З урахуванням формул

(4.12) і (4.74) визначаємо аналітичне вираження функції собівартості з рівняння (4.75):

$$C_y = c_y/v_c S. \quad (4.75)$$

Отже, оцінна функція зменшується (собівартість зменшується) зі збільшенням твори параметрів $v_c S$, пов'язаних функціональною залежністю (4.74), тобто вираз (4.75) справедливо тільки для тих поєднань v і S , які не порушують умови (4.74). Спільне рішення виразів (4.74) і (4.75) дозволяє визначити характер зміни оцінної функції уздовж лінії інструменту, побудованої за виразом (4.74) і представленої на рис. 4.8, а похилій 1; в результаті залежності $C_{(v)}^{(v)} = f(v_c)$ і $C_{(S)}^{(S)} = f(S)$ (на рис. 4.8, а, відповідно, похилі 2 і 3) можна представити у вигляді

$$\left. \begin{aligned} C_{(v)}^{(v)} &= c_3 v^{(1/yv-1)/c_2^{1/yv}}; \\ C_{(S)}^{(S)} &= c_3/c_2 S^{(1-yv)}. \end{aligned} \right\} \quad (4.76)$$

При $v_c \rightarrow 0$; $S \rightarrow \infty$ функція $C_y \rightarrow 0$. Похила 2 являє собою геометричне місце розташування приватних екстремумів залежностей $C_e = f(v)$ (криві 4) при фіксованих значеннях подачі, причому зі збільшенням S екстремум функції $C_y = f(v)$ зменшується, тобто оптимальні режими різання лежать в області більших подач і малих швидкостей різання. Однак досяжний мінімум функції $C_y = f(v)$ визначається фізико-технологічними і технічними обмеженнями параметрів режимів різання, і область можливих поєднань v і S обмежена: оптимальним можна вважати такий режим різання, при якому найбільше значення оціночної функції J_c буде знаходитися на границі допустимих значень v і S для прогнозування показників якості поверхневого шару з урахуванням , геометричних параметрів і фізико-механічних властивостей за умови переходу пластичного відтиснення матеріалу з оброблюваної поверхні изношених і відновлених великогабаритних зубчастих колесо взаємозв'язку з комплексним параметром стану поверхневого шару, вираженому через параметр шорсткості R_z (4.6).

З урахуванням допустимої потужності N_{cm} на шпинделі верстата

параметри v і S пов'язані функціональною залежністю

$$Y = N_{cm} \tau [6] 20 / (c_p t^x p S^y p) = c_4 / S^y p, \quad (4.77)$$

де η – ККД верстат.

На рис. 4.9, *a* вираз (4.77) представлено похилій 5. Перетин ліній 1 (фрези) і 5 (верстата) визначається параметрами різання v_a і S_a , що забезпечують економічну стійкість інструменту при максимальному завантаженні верстата по потужності. В інтервалі подач $0 < S < S_a$ обмеження по інструменту не дозволяють використовувати можливості верстата по потужності, тоді як при роботі в області $S > S_a$ (наприклад S_b) обмеження по потужності верстата не дозволяють оптимальним чином використовувати можливості інструменту.

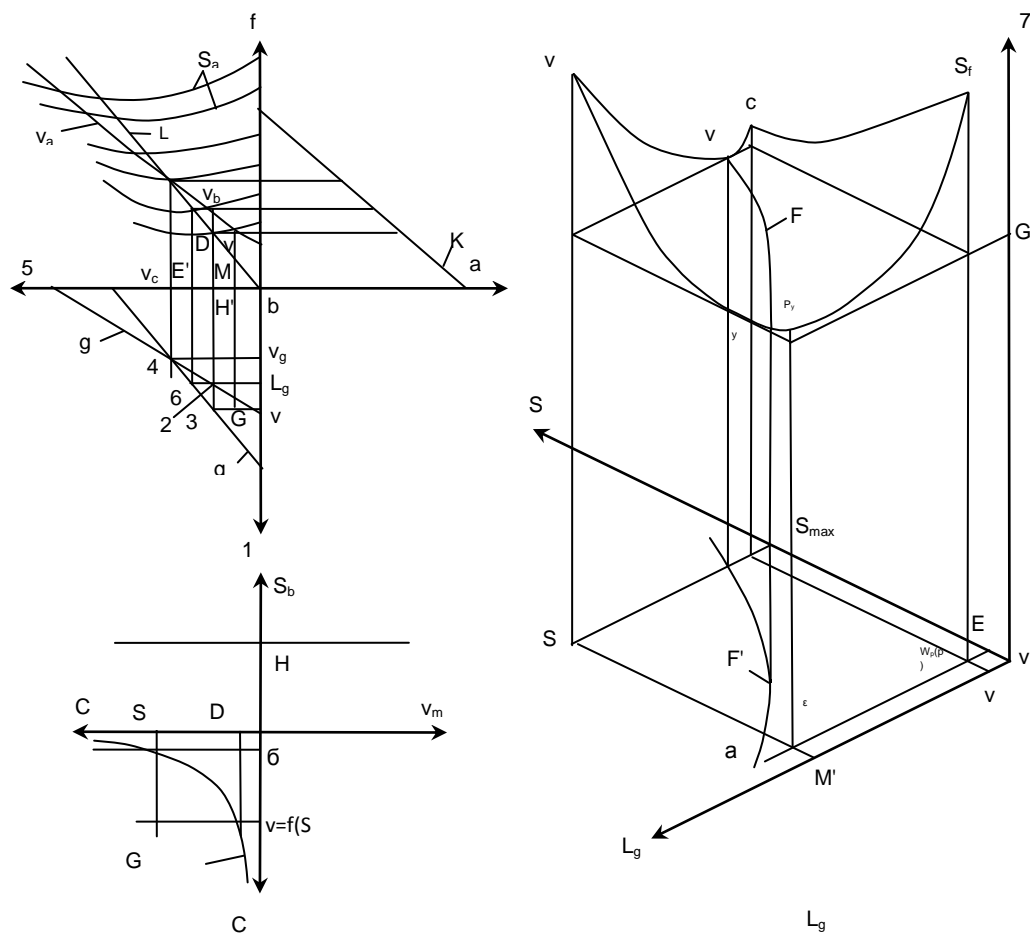


Рисунок 4.9 – графічне представлення приватних оптимумів за собівартістю з урахуванням обмежень (*a*) і екстремальна поверхня відгуку цільової функції (*б*)

Так, у випадку $S = S_b$ необхідно або зменшити подачу $S_b \rightarrow S_j$, щоб зберегти швидкість різання $v_c = v_b$ з великим приватним оптимумом у точці К (лінія б, при цьому $S_k < S_d$) на кривій витрат, побудованої для v_e при $S_j = \text{const}$ з недосяжним оптимумом в точці Е ($P_e < S_k$) з-за обмежень по потужності, або зменшити швидкість різання $v_h \rightarrow v_g$ при незмінній подачі S_b з витратами на операцію $C_i > C_g$. Для порівняння величин S_k і C_i необхідно визначити характер зміни собівартості уздовж лінії 5, з якої випливає, що для установки на оптимальний режим різання доцільно змінювати швидкість різання, а не подачу, тобто $v_b \rightarrow v_g$ при $S = S_b$. Останнє узгоджується з висновками, представленими системою рівнянь (4.32)–(4.33). З урахуванням силових обмежень (4.13) і (4.14), а також умов мінімальної собівартості (4.72) для змінних t ; S та v , відповідно, має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} & \left\{ \begin{aligned} C_3^{(v;S)} = c_1 B \frac{1}{\left(\frac{P_y}{c_p}\right)^{\frac{1}{x}} p v S^{(1-y)p} x p} + \\ + (\tau_{cm} + I/B) v^{(1/m-1)} S^{1/m[xv-m-yp/xp] (xv-m)} / \left[c_c^{\frac{1}{m}} \left(\frac{P_y}{c_p} \right)^{\frac{m-xv}{mxp}} \right] \end{aligned} \right. \\ & \left. \left\{ \begin{aligned} C_3^{(v;t)} = c_1 B 1 / \left[\left(\frac{P_y}{c_p} \right)^{1/yp} v t^{(1-xp/yp)} \right] + \\ + (\tau_{cm} + I/B) v^{(1/m-1)} t^{1/m[xv-m-xp/yp] (yv-m)} / \left[c_c^{\frac{1}{m}} \left(\frac{P_y}{c_p} \right)^{\frac{m-yv}{myv}} \right] \end{aligned} \right. \right\} \quad (4.78) \end{aligned}$$

Екстремальні поверхні, відповідні виразам (4.78), представлені на рис. 4.9, б поверхнями відгуку EFDH і E 'F' 'H'. Граничні точки мають наступні координати:

$$H(v_{min}; S_{min});$$

$$E(v_{min}; S_{max});$$

$$H'(v_{min}; t_{min});$$

$$E'(v_{min}; t_{max});$$

$$F(v_{max}; S_{max});$$

$$D(v_{max}; S_{min});$$

$$F'(v_{max}; \rho_{max});$$

$$D'(v_{max}; \rho_{min}).$$

Областями управління є площини $v - 0 - S$ і $v - 0 - t$. Перетинаючи поверхню відгуку площинами, паралельними площині $v - 0 - S$, отримуємо приватні оптимуми собівартості, так як кожна січна площина для відповідних значень глибини різання t є площиною обмеження подачі S у відповідності з виразами (4.76) при $P_y = const = max$.

Диференціюючи вирази (4.78) за швидкістю, отримуємо рівняння приватних оптимумів

$$\left. \begin{aligned} Y_c^{(s)} &= c_v c^{xv/xp} / [T_c^m P_y^{xv/xp} S^{(yv-yv/xp)}]; \\ Y_c^{(t)} &= c_v c^{yv/yp} / [T_c^m P_y^{yv/yp} S^{(yv-yv/xp)}]. \end{aligned} \right\} \quad (4.79)$$

Зависимость $v_c^{(S)}$ представлена на рис. 3.19, б кривой $7GM$ и является геометрическим местом расположения изображающих точек с минимальными значениями функции $C_3 = f(v; S)$

Вирішуючи попарно вирази (4.78) і (4.79), визначаємо характер зміни функцій (3.94) уздовж кривих приватних оптимумів:

$$\left. \begin{aligned} C_3^{(s)} &= B \cdot c_1 \cdot T_c^m \cdot c_p^{(1-xv)/xp} / [(1-m) \cdot c_v \cdot P_{ymax}^{(1-xv)/xp} \cdot S^{n1/xp}] \\ C_3^{(t)} &= B \cdot c_1 \cdot T_c^m \cdot c_p^{(1-yv)/yp} / [(1-m) \cdot c_v \cdot P_{ymax}^{(1-yv)/yp} \cdot t^{n1/xp}], \end{aligned} \right\} \quad (4.80)$$

$$\text{де } n_1 = x_p - y_v x_p - y_p + y_p x_v; \quad n_2 = y_p - x_v y_p - x_v + x_p y_v.$$

Точність керування пружними переміщеннями системи ДСС розглядаються з урахуванням не тільки динамічних характеристик пружної системи і процесу різання, але і виконавчих елементів. Отримані залежності (4.31)–(4.32); (4.59)–(4.61); (4.69); (4.71); (4.74)–(4.77) і побудовані в координатах t ; S ; v області оптимальних параметрів зубофрезерування

дозволяють оптимізувати управління процесів зубообробки відновлення зношених великогабаритних зубчастих коліс.

4.4. Вибір та призначення системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості

Рішення задачі вибору та призначення системи параметрів поверхневого шару циліндричних зношених та відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості, має базуватися на ретельному аналізі функціонального призначення того або іншого вузла виробу і умов його роботи. При проектуванні важких токарних верстатів з ЧПУ необхідно забезпечити експлуатаційні властивості циліндричних зношених та відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс (втомна міцність, зносостійкість, контактна жорсткість, надійність і точність роботи вузлів і виробу в цілому). Це пов'язано з тим, що в залежності від необхідних експлуатаційних властивостей повинні здійснюватися вибір матеріалів циліндричних зубчастих коліс, призначення точності розмірів і параметрів стану їх поверхневого шару. При цьому необхідно керуватися відповідними залежностями і рекомендаціями, отриманими в результаті теоретичних і експериментальних досліджень. Так, при необхідності забезпечення необхідних значень контактної жорсткості, коефіцієнта тертя, зносостійкості, межі витривалості можна користуватися залежностями, наведеними в розділі 3.

Параметри стану робочих поверхонь після відновлення і точність розмірів призначаються з урахуванням їх функціонування на «робочих осях» (швидкості відносного ковзання, реверсивності зубчастої передачі, умов навантаження, наявності мастила, температурні умови експлуатації тощо). Зазвичай проєктований вузол зубчастих передач важких токарних верстатів з

ЧПУ повинен задовольняти декільком експлуатаційним показникам [182, 184, 193, 244].

Із складових елементів зубчастої передачі визначають ті, які найбільше впливають на її кінцевий ступінь точності, та за рахунок зміни точності яких можна знизити вимоги до ступеня точності зубчастих коліс.

Розглядалася схема зубчастої передачі, з прямокутною системою координат (рис. 4.10).

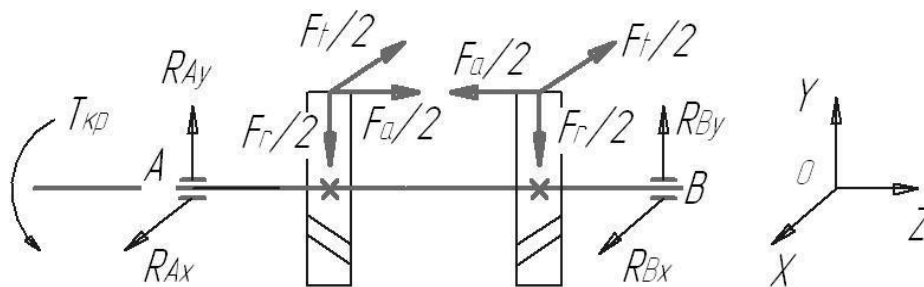


Рисунок 4.10 – Схема зубчастої передачі з прямокутною системою координат

Конструкцію зубчастої передачі, яка використовувалась для аналізу точності зображено на рис. 4.11.

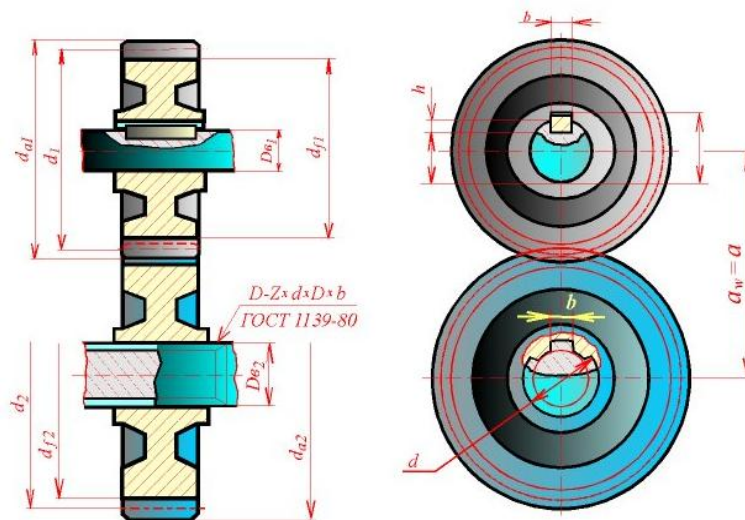


Рисунок 4.11 – Конструкцію зубчастої передачі для аналізу точності

На підставі аналізу конструкції зубчастої передачі визначено відхилення відстані між осями обертання коліс в напрямку осі Y.

$$\Delta y = \frac{1}{2k_y} \sqrt{2 \left(\left(\frac{l_2}{l} \right)^2 - \left(\frac{l_1}{l} \right)^2 \right) (k_n^2 T_n^2 + k_{\text{em}}^2 T_{\text{em}}^2) + \left(\frac{l_2}{l} \right)^2 (k_{\text{в}}^2 T_{\text{в}}^2 + k_{\text{уз}}^3 T_{\text{уз}}^3 + k_{\text{ур}}^2 T_{\text{ур}}^2) + k_{\kappa}^2 T_{\kappa}^2}, \quad (4.81)$$

де k_y – коефіцієнт відносного розсіювання замикаючої ланки розмірного ланцюга; $k_n, k_{\text{em}}, k_{\text{в}}, k_{\text{уз}}, k_{\text{ур}}, k_{\kappa}$ – коефіцієнти відносного розсіювання; T_n – допуск на радіальне биття підшипників; T_{em} – допуск на радіальне биття установчих втулок; $T_{\text{в}}$ – допуск на радіальне биття валу; $T_{\text{уз}}$ – допуск на зазор у шліцевому з'єднанні; $T_{\text{ур}}$ – допуск на радіальне биття шліців валу; T_{κ} – допуск на міжцентрову відстань між осями отворів в корпусі редуктора.

На зміну міжосьової відстані впливає також переміщення осей коліс в напрямку координатної осі Z на величину Δz

$$\Delta z = \frac{1}{2k_z} \sqrt{2 \left(\left(\frac{l_2}{l} \right)^2 - \left(\frac{l_1}{l} \right)^2 \right) (k_n^2 T_n^2 + k_{\text{em}}^2 T_{\text{em}}^2) + \left(\frac{l_2}{l} \right)^2 (k_{\text{в}}^2 T_{\text{в}}^2 + k_{\text{уз}}^3 T_{\text{уз}}^3 + k_{\text{ур}}^2 T_{\text{ур}}^2) + k_{\kappa z}^2 T_{\kappa z}^2}, \quad (4.82)$$

де k_z – коефіцієнт відносного розсіювання замикаючої ланки розмірного ланцюга; $T_{\kappa z}$ – допуск на зміщення осей отворів корпусу редуктора в напрямку осі Z .

Поворот осей зубчастих коліс навколо осі Y призводить до їх перекосу

$$f_{yr} = \frac{1}{k_{fyr}} \sqrt{k_{fynp}^2 f_{ynp}^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{L}{l} \right)^2 (2k_n^2 T_n^2 + k_{\text{в}}^2 T_{\text{в}}^2 + k_{\text{уз}}^2 T_{\text{уз}}^2 + k_{\text{ур}}^2 T_{\text{ур}}^2 + 2k_{\text{em}}^2 T_{\text{em}}^2)}, \quad (4.83)$$

де f_{yr} – перекіс осей зубчастих коліс на базовій відстані L ; k_{fyr} – коефіцієнт відносного розсіювання величини f_{yr} , знаходимо так само як і k_y ; f_{ynp} – допуск на перекіс осей отворів в корпусі на базовій відстані L ; k_{fynp} – коефіцієнт відносного розсіювання величини f_{ynp} .

Поворот осей зубчастих коліс навколо осі Z призводить до їх непаралельності

$$f_{xr} = \frac{1}{k_{f_{xr}}} \sqrt{k_{f_{xnx}}^2 f_{xnn}^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{L}{l} \right)^2 \left(2k_n^2 T_n^2 + k_6^2 T_6^2 + k_{uz}^2 T_{uz}^2 + k_{up}^2 T_{up}^2 + 2k_{6m}^2 T_{6m}^2 \right)}, \quad (4.84)$$

де f_{xr} – перекіс осей зубчастих коліс на базовій відстані L ; $k_{f_{xr}}$ – коефіцієнт відносного розсіювання величини f_{xr} , знаходимо так само як і k_x ; f_{xnp} – допуск на перекіс осей отворів в корпусі на базовій відстані L ; $k_{f_{xnp}}$ – коефіцієнт відносного розсіювання величини f_{xnp} .

Відхилення міжосьової відстані в передачі

$$f_{ar} = \sqrt{(a_w + \Delta y)^2 + \Delta z^2} + (b \cdot f_{xr} / L) - a_w, \quad (4.85)$$

де a_w – номінальне значення міжосьової відстані зубчастої передачі.

Радіальне биття зубчастого колеса

$$F_{rr} = \sqrt{\left(\left(2\sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2} + b \frac{f_{xr}}{L} \right) / 1,2\sqrt{2} \right)^2 + (F_{rr}'')^2}, \quad (4.86)$$

де F_{rr}'' - радіальне биття зубчастого колеса, обумовлене похибкою зубооброблення.

Встановлено вплив конструктивних чинників на точність відновлення циліндричних коліс фрезами. Із запропонованих ГОСТ 1643-81 комплексів контролю зубчастих коліс, були прийняті такі для:

- кінематичної точності - F_{rr} (радіальне биття зубчастого вінця) та F_{vWr} (коливання довжини спільної нормалі);
- плавності роботи - f_{fr} (похибка профілю);
- плавності роботи – W_{AT} (колебание длины общей нормали, является комплексным параметром контроля зубчатого колеса);
- визначення контакту зубців у передачі - $F_{\beta r}$ (похибка напрямку зубця) та відносні розміри сумарної плями контакту за висотою і за довжиною зубця.

Для забезпечення плавності зубчастих передач необхідно отримати граничні відхилення кроку зачеплення (рис. 4.12) відповідно до вимог ГОСТ1643-81.

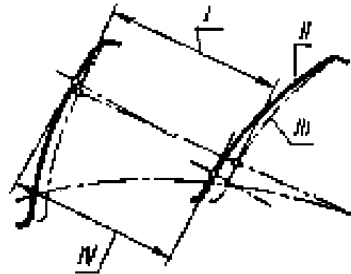


Рисунок 4.12 – Граничні відхилення кроку зачеплення

+ f_{pb} – верхнє відхилення; - f_{pb} – нижнє відхилення; I – номінальний крок зачеплення; II – дійсний профіль зуба; III – номінальний профіль зуба; IV – дійсний номінальний крок

Шумові характеристики високошвидкісних важконавантажених зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс передачах визначається похибкою профілю зуба (рис. 4.13) і середньої довжини загальної нормалі (Рис. 4.14)..



Рисунок 4.13 – Похибка середньої довжини загальної нормалі

I – дійсний торцевий профіль зуба; II – номінальні торцеві профілі зуба;
III – основа окружність;
IV – межі активного профілю зуба

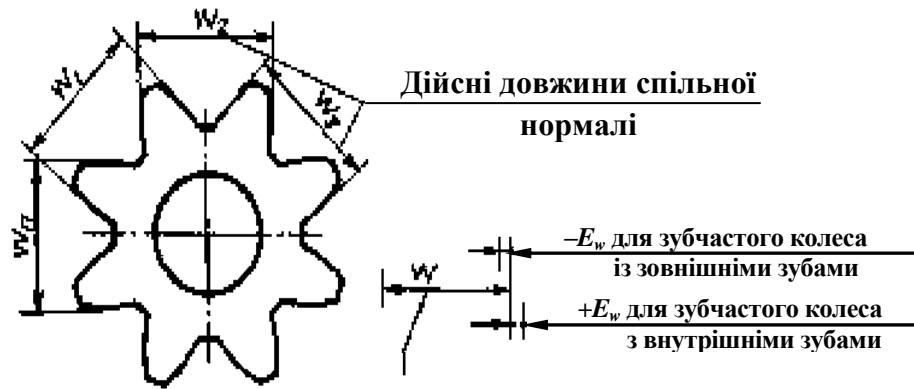


Рисунок 4.13 – – Похибка середньої довжини загальної нормалі

Параметри зносостійкості зубчастих передач, довговічності забезпечуються параметрами відхилення допуску на напрямки зуба F_β (рис. 4.15)

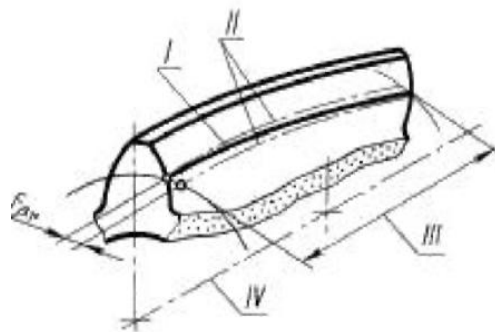


Рисунок 4.15 – Похибка профілю зуба F_β

I – дійсна ділильна лінія зуба; II – номінальна ділильна лінія зуба; III – ширина зубчастого вінця; IV – робоча вісь зубчастого колеса

Структурна схема вирішення завдання показана на рис. 4.16. На основі спільного аналізу умов нормальної експлуатації (блок 1) та технічних умов на виготовлення циліндричних зубчастих коліс (блок 2) здійснюється визначення необхідних експлуатаційних властивостей циліндричних зубчастих коліс і допустимих меж їх зміни (блок 3). Наприклад, якщо сумарна зближення сполучених поверхонь під навантаженням при терті –

ковзанні за весь термін їх служби не повинно перевищувати 16...20 мкм, а величина контактного зближення поверхонь під навантаженням за рахунок пластичних і пружних деформацій їх поверхневих шарів складає 5...6 мкм, то це означає, що знос деталей циліндричних зубчастих коліс за весь термін їх служби не повинен перевищувати 10...14 мкм. Знаючи термін служби важких токарних верстатів з ЧПУ і обчисливши фактичний час роботи розглянутого вузла за весь термін служби T , легко визначити допустиму інтенсивність зношування з'єднання $J = (10...14)/T$, мкм/с.

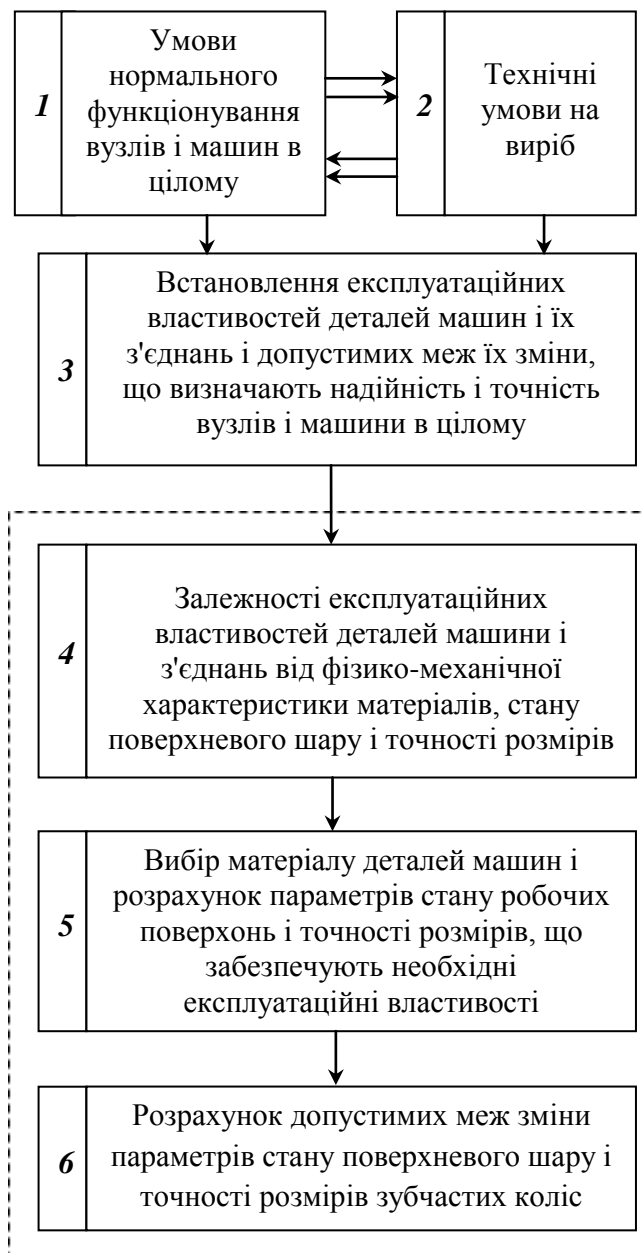


Рисунок 4.16 – Структурна схема вирішення завдання відновлення зубчастих коліс

Таким чином визначаються експлуатаційні властивості циліндричних зубчастих коліс важких токарних верстатів з ЧПК та допустимі межі їх зміни, лімітуючі надійність роботи передньої бабки, механізму поздовжнього та поперечного переміщення супорта, ламелей, задньої бабки верстата в цілому. Перехід від блоків 1-го і 2-го до блоку 3-му є неформалізованою, тобто він не піддається алгоритмізації. Це означає, що на даному етапі проектування вельми важливими факторами є наявні статистичні дані по експлуатації прототипів проєктованих вузлів важких токарних верстатів з ЧПУ.

Висновки до розділу 4

1. Удосконалена узагальнена модель процесу виготовлення циліндричних зубчастих коліс і управлінням процесу формоутворення поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс. В основі аналізу оптимізації процесу як об'єкта управління і вибору класу математичної моделі лежать закономірності протікають у них явищ, а також апріорна інформація про процеси в подібних об'єктах.
2. Встановлено аналіз взаємних зв'язків, що дозволяє виділити основні особливості динамічної системи верстата, замкнутої через процес зубофрезерування багатоконтурної системи з джерелом енергії та впливом основних елементів системи з взаємодією між робочими процесами через пружну систему. У зв'язку з поділом елементами пружної системи ділянок протікання процесів представляється можливим перейти до еквівалентного поданням про динамічній системі верстата як про одноконтурної системи.
3. Розроблена математична модель і структура об'єкта управління з оцінкою адекватності математичної моделі ідентифікованого об'єкта з урахуванням забезпечення параметрів поверхневого шару загартованих циліндричних зубчастих коліс.
4. Розроблено процес імітаційного моделювання роботи циліндричних

зношених та відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс в порівнянні з результатами теоретичних досліджень і даними, отриманими на експериментальних установках і при дослідженні на «робочих осях», з урахуванням масштабного фактора та визначено оптимальні значення параметрів стану робочих поверхонь циліндричних зношених та відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

5. Вибір та призначення системи параметрів поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс, що визначають їх експлуатаційні властивості.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ І ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ ЗУБОФРЕЗЕРУВАННЯ ПРИ ВІДНОВЛЕННЯ ЗНОШЕНИХ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС

5.1 Моделювання процесів формоутворення поверхневого слоя зубчастих коліс з урахуванням внутрішніх зв'язків

Одним з найбільш перспективних є методи оцінювання спектральних характеристик сигналів. Саме якість і достовірність оцінки спектра сигналу мають вирішальний вплив на формування наших уявлень про об'єкт спостереження [243, 244]..

Сутність цих методів пов'язана з моделюванням процесів формоутворення поверхневого шару зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс з урахуванням властивим цим процесам внутрішніх зв'язків за допомогою wavlet-аналізу [273].

Для застосування вейвлет-аналізу розглянемо перетворення Фур'є. Перетворення Фур'є з його нескінченно протяжним тригонометричним базисом адекватно підходить для аналізу стаціонарних сигналів. Для нестаціонарних сигналів (як в нашому випадку) важливим є визначення моменту часу, коли та чи інша частотна характеристика раптово змінилася. Тому базисні функції повинні мати кінцеву область визначення. Якраз такими функціями і є вейвлети. З їх допомогою можна покрити весь простір, використовуючи зміщення по-різному стислих варіантів однієї-єдиної функції. Саме завдяки цьому можна кожен сигнал розкласти в вейвлет-ряд. При цьому кожна частотна компонента досліджується з дозволом, що відповідає вибраному масштабу.

Слід зазначити, що при певних умовах [273] широкосмугова модель може бути апроксимована вузькополосною моделлю. Припустимо, що $X(t)$ – досліджуваний, а $g(t)$ – приймається сигнали. Відповідно до [273] для них

можна записати наступне співвідношення:

$$g(t) \cong \sqrt{S} X[S(t - \tau)], \quad (5.1)$$

де S – параметр, що задає ступінь стиснення вейвлет-функції, що дозволяє за допомогою нормувального коефіцієнта \sqrt{S} ввести розмірність енергії для досліджуваного і проймає сигналу;

τ – параметр, що характеризує час затримки і визначає зміщення вейвлет-функції вздовж осі часу t .

Дослідження проводилися на вертикально-зубофрезерні верстаті мод. 5А342 (рис. 5.12) (потужність головного приводу $N = 16$ кВт).

В процесі обробки визначалося вплив основних факторів - режимів різання, на середню величину крутного моменту $M_{кр,ср}$ і окружний сили різання $P_{окр,ср}$.

Виділення і поділ за частотою сусідніх піків, визначення їх потужності, найбільша статична точність вимірювань, мінімальне спотворення форми в тимчасовій області сигналу і його спектра дозволяють забезпечити оптимальні умови обробки сигналів.

Схема верстатного зачеплення правого корпусу фрези і оброблюваного колеса наведена на рис. 5.1.

Вираз (5.1) описує широкополосну модель.

З урахуванням [273] вузькополосна модель сигналу може бути записана наступним чином:

$$g(t) \cong X(t - \tau) \exp[j\omega_c(S - 1)(t - \tau)], \quad (5.2)$$

де $j = \sqrt{-1}$; ω_c – частота сигналу.

Умова, при якому застосовується вузькополосна модель, може бути представлено в такий спосіб: $2\nu/c \ll 1/TB$, де T – тривалість сигналу; B – ширина смуги; a , ν і c швидкість різання і електромагнітних хвиль,

відповідно. Надалі будемо в основному використовувати широкосмуговий модель сигналу. Слідуючи [193, 244] сигнал малої тривалості має широку смугу (широкосмугова модель), а сигнал з вузькою смугою повинен мати більшу тривалість (вузькополосна модель).

Вейвлет-аналіз є операція перетворення інтегрованої функції модифікованою версією деякого ядра функції [273]. Ядро функції називається базовим вейвлетом, який транслює і стискає (розтягує) досліджуваний сигнал.

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

$$C_g \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|G(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (5.3)$$

де $G(\omega)$ – є перетворення Фур'є $g(t)$; R – дійсні числа.

Постійна C_g є прийнятна постійна для функції $g(t)$ і передбачає вимоги інверсії ВП. Для даної функції $g(t)$ умова $C_g < \infty$ виконується тільки тоді; коли $G(0) = 0$ або $\int_{-\infty}^{\infty} g(t) dt = 0$. Отже, ВП функції $X(t) \in L^2(R)$ по відношенню до функції $g(t)$ записується в такий спосіб:

$$W_g(S, \tau) \equiv \frac{1}{\sqrt{S}} \int_{-\infty}^{\infty} X(t) g^* \left(\frac{t - \tau}{S} \right) dt, \quad (5.4)$$

де $g^* \left(\frac{t - \tau}{S} \right)$ – пов'язаний комплекс вейвлета $g(t)$.

Для ілюстрації можливостей застосуємо вейвлет морлета для визначення резонансних частот в електричному ланцюзі [273]. Задамо його виразом

$$g(t) = e^{j\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (5.5)$$

де ω_0 – частота вейвлета.

Перетворення Фур'є вейвлета (5.5) має наступний вигляд:

$$G(S\omega) = e^{-(S\omega - \omega_0)^2}. \quad (5.6)$$

Ця функція має максимум при $S\omega = \omega_0$.

Вейвлет-аналіз гармонійного сигналу зі змінною амплітудою $A(t)$ і фазою $\varphi(t)t$:

$$x(t) = A(t) \cos(\varphi(t)t) \quad (5.7)$$

дорівнює

$$W(S, \tau) = \sqrt{S} A(t) e^{-(S\varphi(t) - \omega_0)^2} e^{j\varphi(t)\tau}. \quad (5.8)$$

При заданому значенні параметра S (відповідного певній частоті ω_0) модуль сигналу і фаза мають вигляд:

$$|W(S, \tau, \rho)| = \sqrt{S} A(t) e^{-(S\varphi(t) - \omega_0)^2}. \quad (5.9)$$

$$\angle [W(S, \tau, \rho)] = \varphi(t)\tau. \quad (5.10)$$

З огляду на викладене, розглянемо тепер електричний ланцюг, до складу якої входять елементи з лінійними вольт-амперних характеристик і джерелами ЕРС змінного струму з частотою ω_0 . Припустимо, що відбулося включення або відключення будь-якого елементу. Внаслідок лінійного характеру рівнянь, що зв'язують струми і напруги, змушені значення струмів у всіх гілках ланцюга і напруг на будь-яких її ділянках будуть також бути

гармонійними функціями з тією ж частотою ω .

Струм в будь-який з гілок

$$i = i_g + i_{cb}, \quad (5.11)$$

де i_g – вимушена складова струму; i_{cb} – його вільна складова.

У загальному випадку

$$i_{cb} = \sum_{k=1}^N i_k; \quad (5.12)$$

$$i_k = A_k e^{-c_k t} \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (5.13)$$

де A_k ; ω_k ; φ_k – початкова амплітуда, власна частота і фаза згасаючих коливань.

Застосувавши вейвлет-перетворення до вираження (5.11) і вибравши значення параметра S таким, що вплив сусідніх резонансних частот буде незначним, отримаємо

$$\psi(t) = \omega_k t + \varphi_k = \angle[W(S, \tau)] / \tau. \quad (5.14)$$

Продифференціював повну фазу $\psi(t)$ за часом, знаходимо частоту ω_k в вираженні (5.14).

Як математичної моделі опису досліджуваного процесу була прийнята залежність (5.14)

У табл. 5.1 представлені рівні варіювання змінних режимів різання [193, 273].

Таблиця 5.1 – Рівні варіювання режимів різання

Найменування параметру	Рівні варіювання	
	Верхній +	Нижній –
Товщина шару, що зрізається $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ck} \cdot \sin \varphi$	0,2	0,0
Подача фрези S_o , мм/об	2,8	1,4

Швидкість різання V , м/мин	250	100
-------------------------------	-----	-----

Інтервали зміни режимів різання прийняті, виходячи з апіорної інформації забезпечення сталого процесу різання, технічних можливостей важких зубофрезерних верстатів, механічних властивостей матеріалів заготовки і ріжучої частини інструменту.

Процес зубофрезерування через різної кількості одночасно беруть участь в процесі різання зубів фрези нерівномірний. На рис. 5.1 показана схема верстатного зачеплення правого корпусу фрези і оброблюваного колеса.

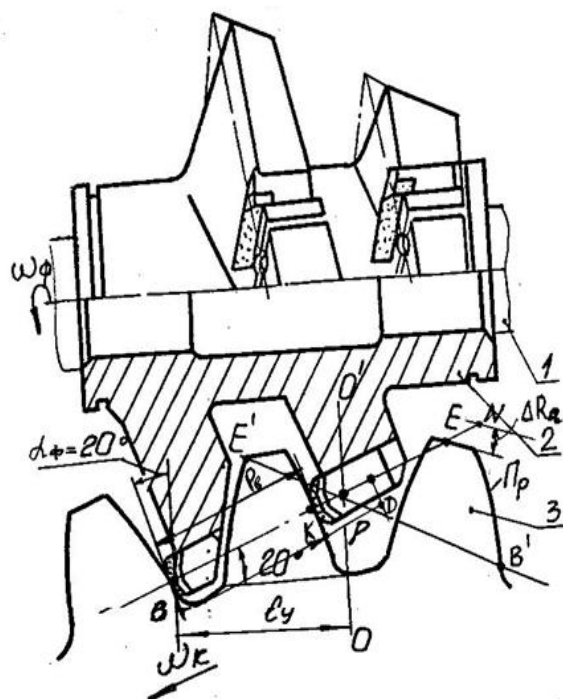


Рисунок 5.1 – Схема верстатного зачеплення правого корпусу фрези і оброблюваного колеса

Аналіз експериментальних досліджень підтвердив адекватність теоретичних висновків (рис. 5.2.) При моделюванні процесу формування поверхневого шару зубчатих коліс з використанням вейвлет-аналізу при зустрічному фрезеруванні, де коефіцієнт нерівномірності фрезерування варіюється в

межах $K_n = 1,5 \dots 1,7$ і визначає макронапружень стан поверхневого шару, що і необхідно враховувати при розрахунках.

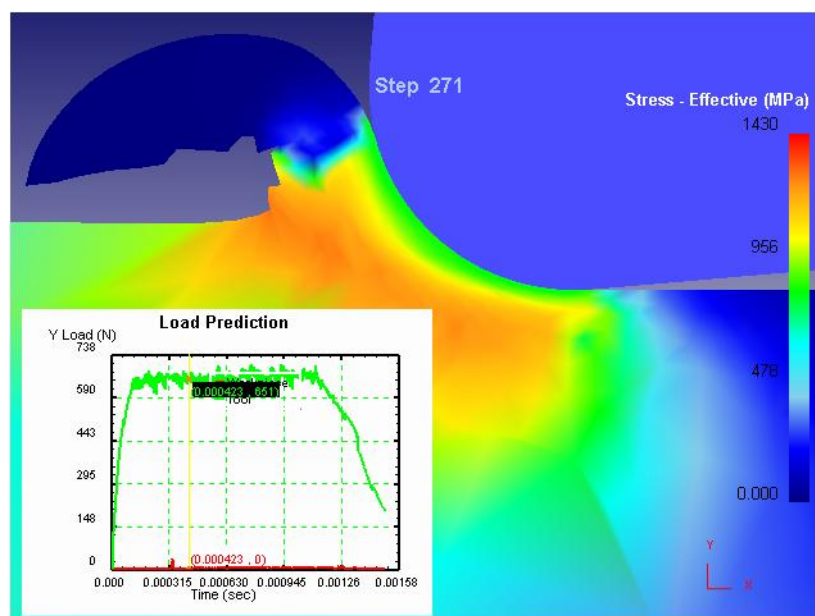


Рисунок 5.2 – Зміна макронапружень поверхневого шару при впровадженні ріжучого клина в оброблюючу поверхню зубчастого колеса

Отримані в результаті аналітичних перетворень з використанням вейвлет-аналізу та експериментальних досліджень частотних змін силових залежностей процесу зубофрезерування і показників якості поверхневого шару зубчастих коліс визначають основні шляхи встановлення основних залежностей забезпечення якості, точності і продуктивності обробки зубчастих коліс.

Класифікація вхідних змінних на основі вейвлет-аналізу використовується для реалізації динамічної моделі обробленої поверхні. Встановлено способи та порядок ідентифікації змінних. Для визначення коефіцієнтів крутного моменту ($K_{Mкр}$) і сил різання (K_x ; K_y ; K_z) при швидкісному зубофрезерування фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки використовуються експериментальні дані.

Розроблена методика дозволяє аналітичним шляхом визначати динамічні характеристики системи для зношених і відновлених

великогабаритних зубчастих коліс.

5.2 Модель прогнозування показників якості у взаємозв'язку з комплексним параметром стану поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс

На основі математичних моделей формування мікрогеометрії і фізико-механічних характеристик поверхневого шару використовується алгоритм [146, 194, 273] визначення параметрів шорсткості поверхні (рис. 5.3).

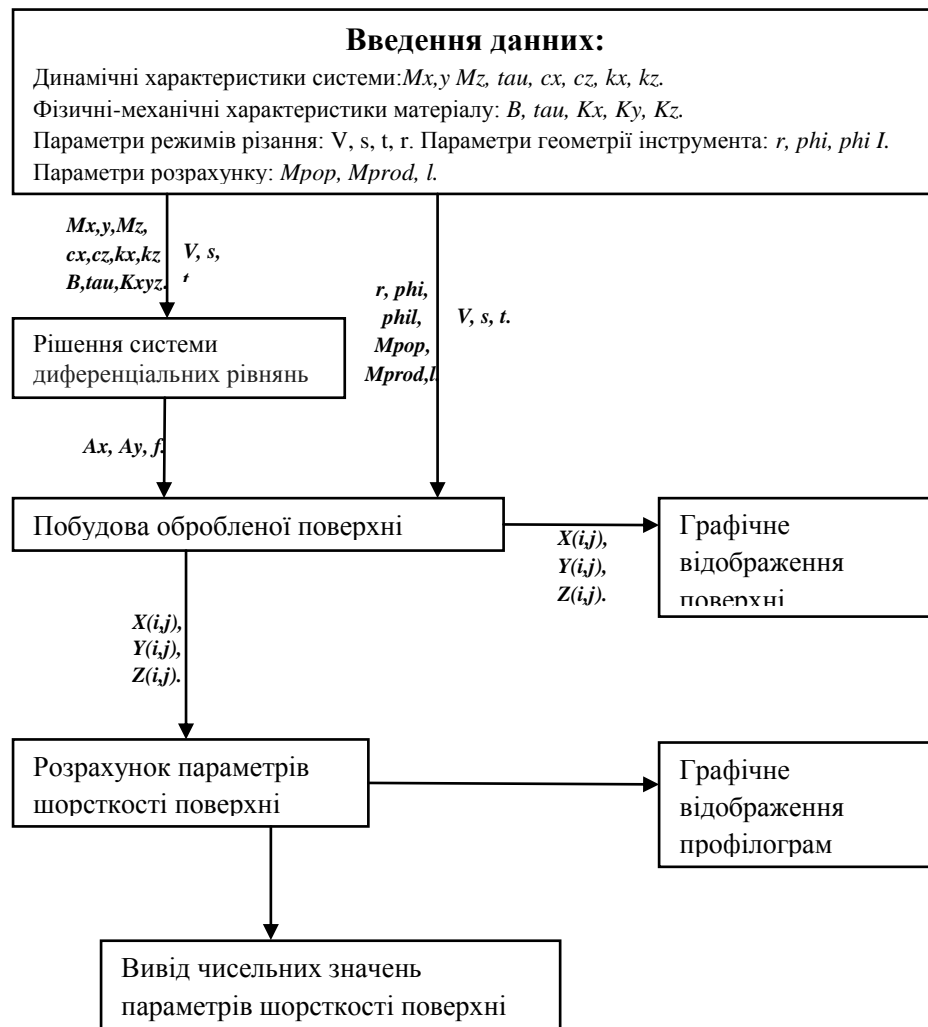


Рисунок 5.3 - Алгоритм визначення параметрів шорсткості на основі математичної моделі формування поверхні з урахуванням коливань системи

У першій частині алгоритму проводиться розрахунок амплітудно-

частотних характеристик домінуючою коливальною системою (рис. 5.4). В результаті проведених досліджень встановлено, що при вирішенні системи диференціальних рівнянь система не відразу приходиться в усталений режим. Тому потрібно визначити значення амплітуд, які при подальшому збільшенні за часом не змінюються на задану величину. Блок «Рішення системи диференціальних рівнянь» розбивається в наступному вигляді (рис. 5.5).

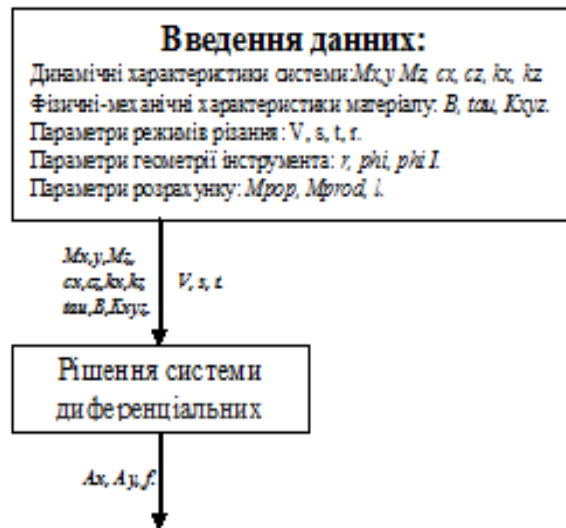


Рисунок 5.4 - Розрахунок амплітудно-частотних характеристик домінуючою коливальною системою

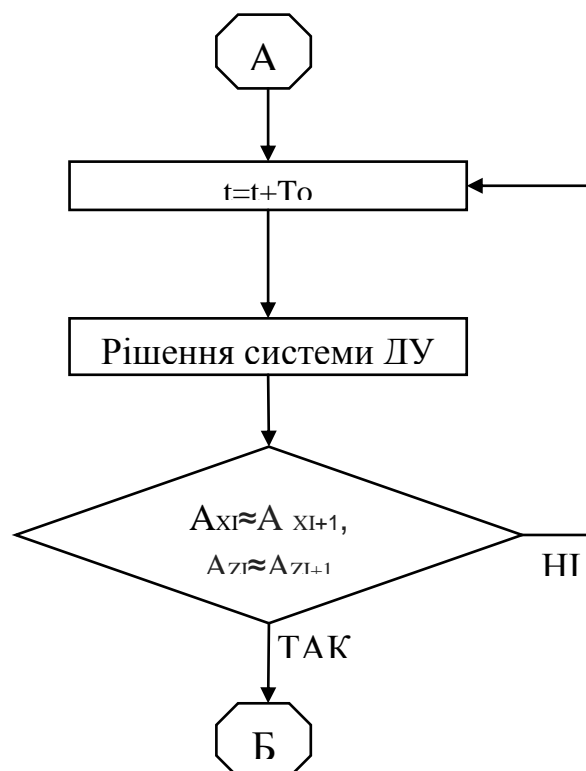


Рисунок 5.5 - Блок-схема визначення сталого режиму

t – початковий час $t = 2T_0$, T_0 – час за один оборот фрези

Наступний крок - визначення середніх амплітуд і частоти коливань домінуючою системи (рис. 5.6).

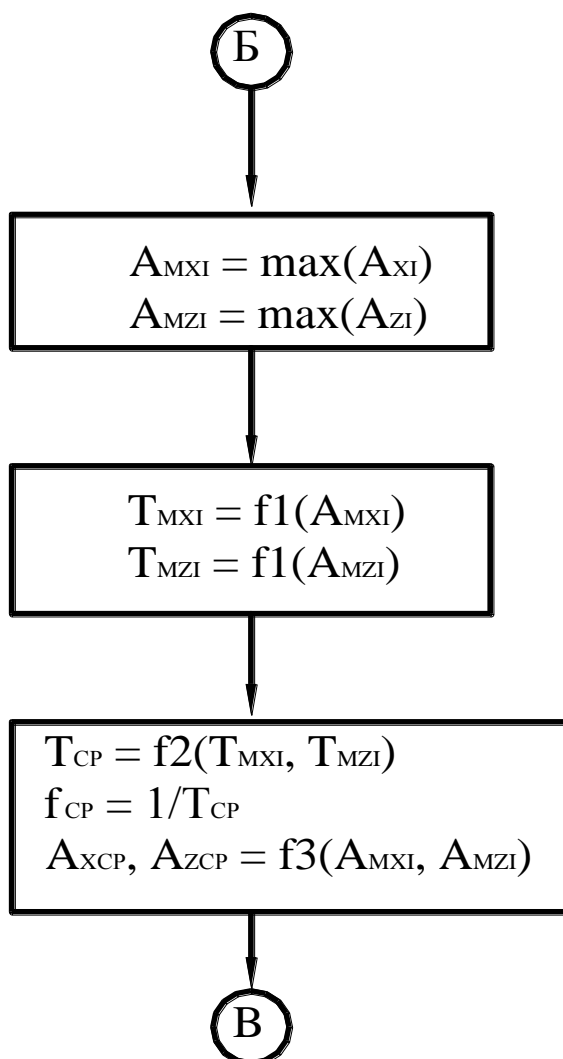


Рисунок 5.6 - Блок-схема знаходження амплітуд і частоти коливань ТС

A_{xi} – масив значень переміщень по OX ; A_{zi} – масив значень переміщень по OZ ;

A_{mxi} – масив значень амплітуд по OX ; A_{mzi} – масив значень амплітуд по OZ ;

T_{mxi} – масив значень амплітуд по OX ; T_{mzi} – масив значень періоду коливань

по OZ ; A_{xcp} – середнє значення амплітуди по OX ; A_{zcp} – середнє значення

амплітуди по OZ ; T_{cp} – середнє значення амплітуди по;

f_{cp} – середнє значення частоти коливань; $f1$; $f2$; $f3$ – підпрограми знаходження значень

Таким чином, блок алгоритму, що описує рішення СДУ має вигляд (рис. 5.7).

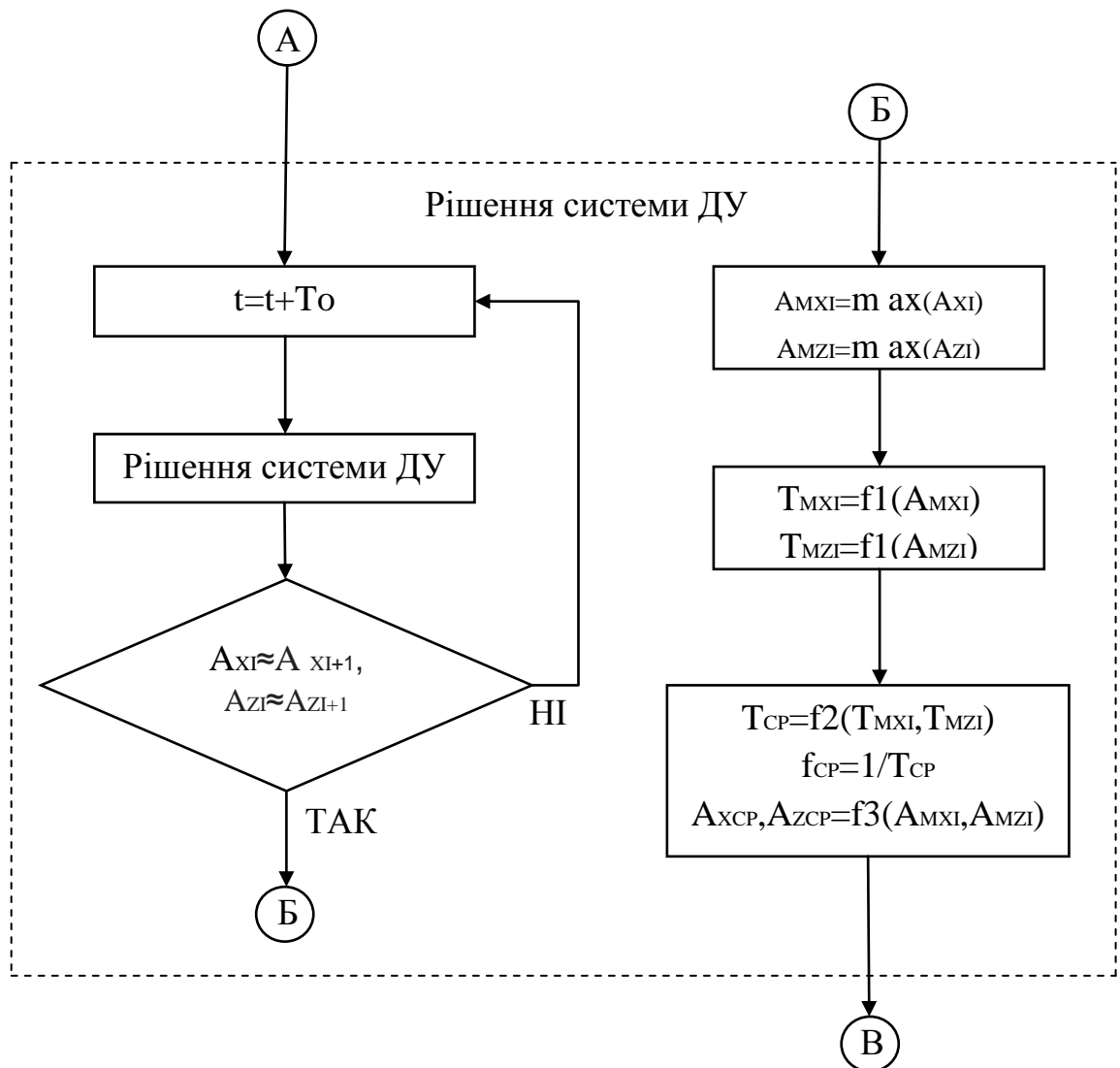


Рисунок 5.7 – Розрахунок амплітудно-частотних характеристик домінуючою коливальні системи

Вихідні дані представляються у вигляді: AX_{CP} ; AZ_{CP} ; f_{CP} .

Побудова масиву точок, що характеризує стан ріжучої кромки інструменту в будь-який момент часу, складається з декількох блоків, що входять один в інший.

У Блоці 1 виробляється обчислення масиву точок, що описує геометрію

різальної крайки інструмента.

У Блоці 2 обчислюється масив точок, що характеризує знаходження сукупності початкових положень ріжучої кромки інструменту в момент часу $t_H = 0$ (початок нового обороту).

У Блоці 3 обчислюється масив точок, що характеризує поверхню в ортогональній системі координат XYZ в момент часу $t \in [0; T_0]$ (рис. 5.8).

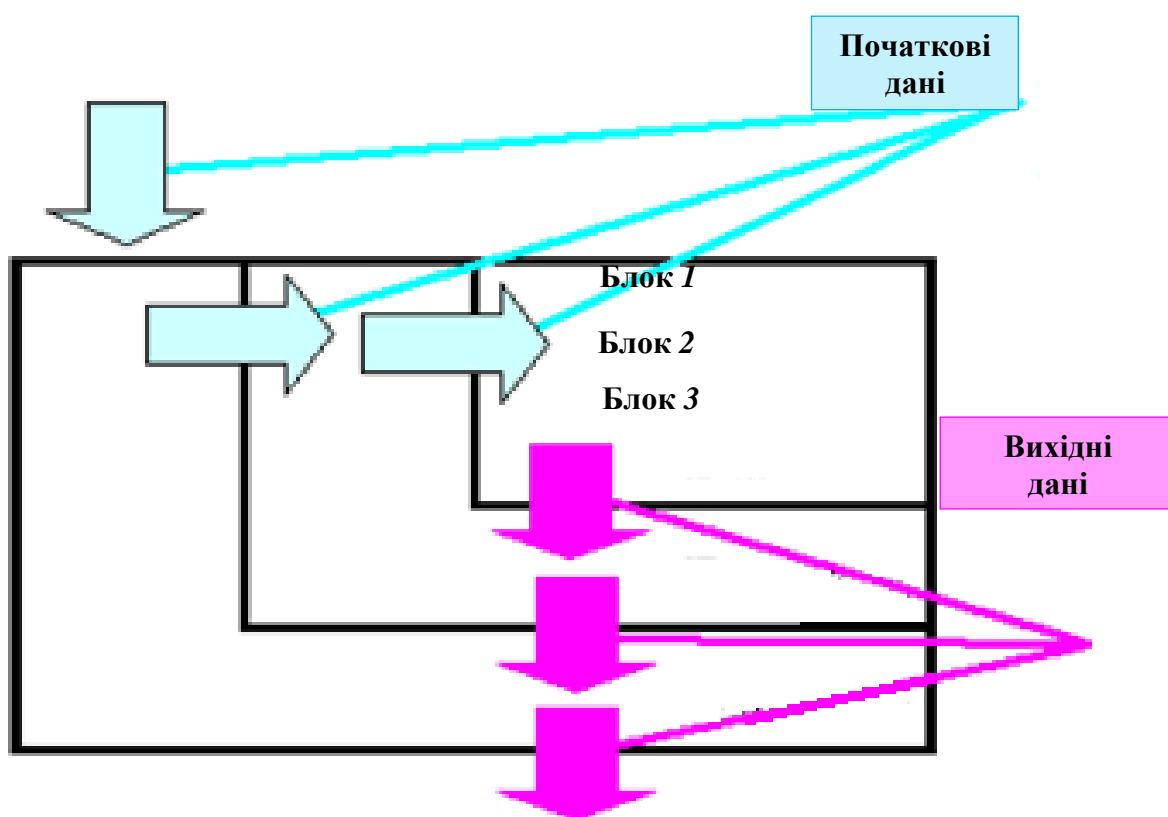


Рисунок 5.8 – Блок-схема обчислення масиву точок в просторовій системі координат

Наступним кроком знаходимо середню лінію, яка, згідно з ГОСТ 2789-73, визначається як базова лінія, що має форму номінального профілю і ділить реальний профіль так, що в межах базової довжини сума квадратів відхилень профілю від цієї лінії мінімальна.

Далі йде формування масивів точок поверхні $X(i; j)$, $Y(i; j)$, $Z(i; j)$ для більш зручного відображення в графічному редакторі (рис 5.9).

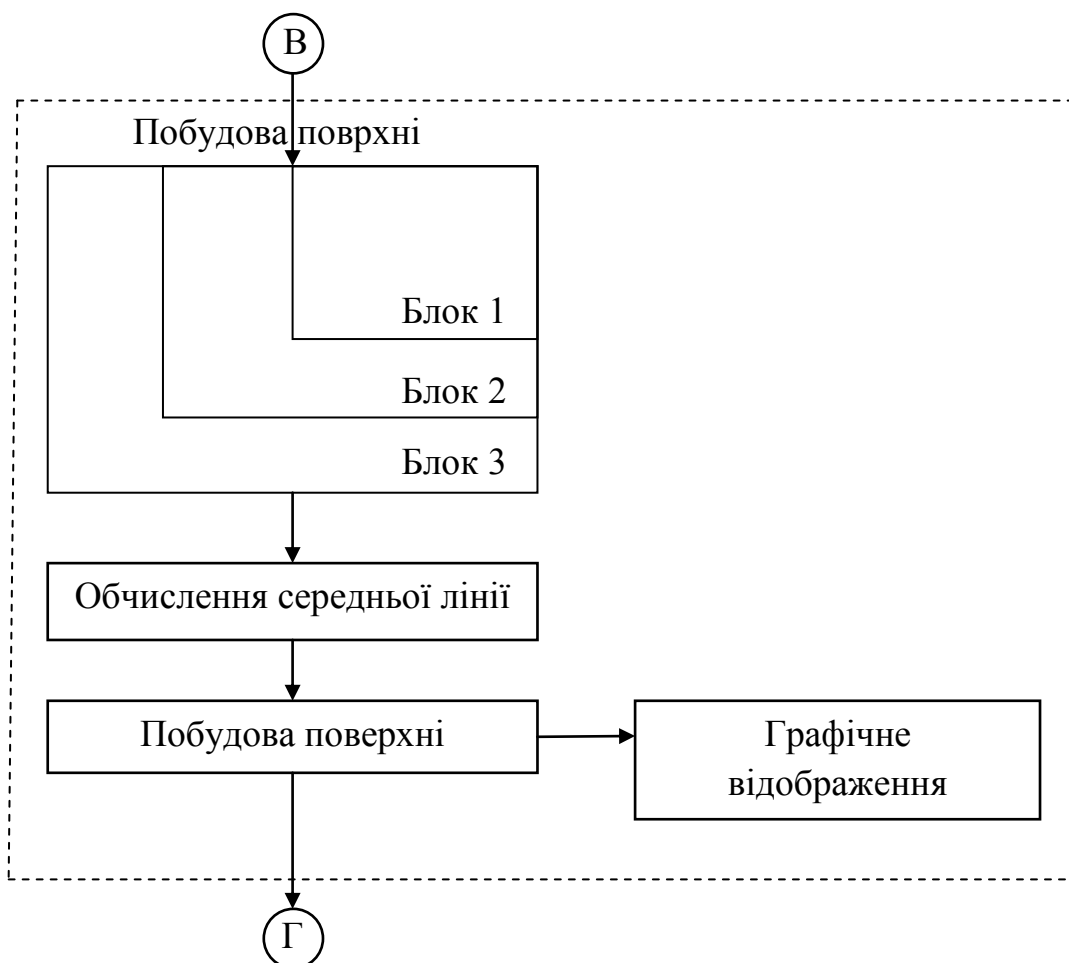


Рисунок 5.9 - Блок-схема другій частині алгоритму

Остання частина алгоритму - знаходження геометричних параметрів якості поверхні. До цих параметрів належать: висота нерівностей профілю по десяти точках R_z ; середня висота нерівностей профілю R_a ; максимальна висота нерівностей R_{max} ; середній крок нерівностей профілю S_m ; крок місцевих виступів профілю S ; відносна опорна довжина по середній лінії t_m .

Для визначення вищевказаних параметрів необхідно вибрати перетину на побудованій поверхні. Для достовірної оцінки поверхні деталі вимірюють подовжню і поперечну шорсткість, т. Е. Паралельно і перпендикулярно

головному руху. Перетин для поперечної шорсткості вибирають в площині XOZ , для поздовжньої шорсткості - в площині YOZ .

Вибираємо перетину за максимальним значенням R_{max} в побудованій поверхні, виводимо графічне відображення геометричних параметрів, вважаємо їх чисельне значення (рис. 5.10).

Для реалізації алгоритму використовується пакет Matlab. Перевага даного пакета полягає в потужному математичному обчислювальному апараті, якісному графічному редакторі і в простоті програмування.

Для знаходження параметрів шорсткості поверхні за допомогою алгоритму ідентифікуються вхідні змінні і встановлюється порядок їх знаходження. Умовно розділяємо вхідні змінні на групи і представляємо їх у вигляді таблиці (табл. 5.2).

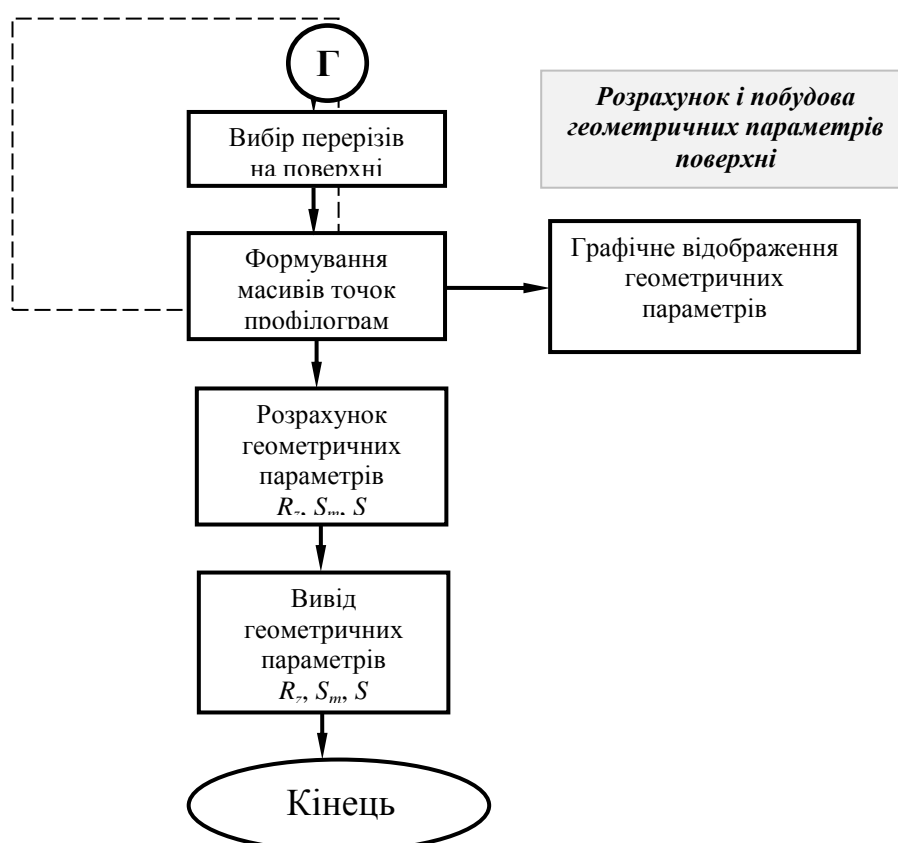


Рисунок 5.10 – Блок-схема третьої частини алгоритму

Таблиця 5.2 – Групи вхідних змінних моделі формування поверхні зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс

Характеристика змінних	Найменування змінних	Значення змінних
Назначаємі змінні	Геометричні характеристики інструменту	$r; \gamma; \varphi; \lambda$
	Режими різання	$V; s; b$
Обумовлені змінні	Динамічні характеристики системи	$Mx; y; z; kx; y; z; cx; y; z$
	Коефіцієнти сил різання	$Kx; y; z$
	Фізико - механічні характеристики матеріалу	$B; \tau$

З табл. 5.2 випливає, що змінні першої групи знаходяться з умов даного дослідження, тому вони задаються заздалегідь. Змінні з другої групи необхідно визначити перед підстановкою в програму комп'ютерного моделювання, створену на базі алгоритму розрахунку параметрів шорсткості.

Зазначимо способи знаходження змінних другої групи (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Методи знаходження змінних другої групи

значення змінні	Спосіб визначення
$B; \tau; Kx; y; z; Mx; y; z; kx; y; z; cx; y; z$	Експериментальний
$Mx; y; z; kx; y; z; cx; y; z$	Аналітичний

Фізико-математичні принципи визначення середніх дотичних напружень (τ_{CP}) наведені в першій частині алгоритму. У другій частині алгоритму використані експериментальні дані, отримані в результаті досліджень О.А.Горленко [185, 194]. для матеріалу 34ХНМ зміна величин середніх дотичних напружень (τ_{CP}) і усадки стружки (ζ) при зміні швидкості різання V ($S = 0,1$ мм/об; $t = 1$ мм) дані в табл. 5.4. При проведенні

експериментальних досліджень використовувався інструмент з наступною геометрією: державка PCLNR 2525K-12, має геометрію: $\alpha = 6^\circ$; $\lambda = 7^\circ$; $\varphi = 95^\circ$; СМП CNMG 120408 BK10XOM, має геометрію: $\alpha = 0^\circ$; $\lambda = 0^\circ$; $\gamma = 13^\circ$; $R = 0.8$ мм; кут при вершині в плані 80° ; підсумкова геометрія ріжучого інструменту: $\alpha = 6^\circ$; $\lambda = 7^\circ$; $\varphi = 95^\circ$; $\varphi_1 = 5^\circ$; $\gamma = 7^\circ$; $R = 0,8$ мм; кут при вершині в плані 80° .

Таблиця 5.4 – значення τ_{CP} і ζ при зміні швидкості різання V при $S = 0.1$ мм/об; $t = 1$ мм; отримані при ортогональному різанні

V , м/мин	100	150	200	250	300
ζ	3,3	3,05	2,8	2,55	2,3
τ_{CP} , МПа	1245,6	1244,7	1243,8	1242,9	1242

Використовуючи методику, наведену в роботі [49] визначимо геометричні і фізико-механічні характеристики різання $\Phi \rightarrow \Phi_n$; $\eta \rightarrow \beta_\alpha$; $\zeta_{ПРЯМ} \rightarrow \zeta_{КОС}$; $\tau_{CP.ПРЯМ} \rightarrow \tau_{CP.КОС}$. Далі за формулами (4.17) ... (4.21), підставляючи геометричні характеристики інструменту, поставлені вище, знайдемо коефіцієнти сил різання K_X ; K_Y ; K_Z (см. табл. 5.5).

Таблиця 5.5 – Значення τ_{CP} і коефіцієнтів сил різання (K_X ; K_Y ; K_Z) при зміні швидкості різання V при $S_{\text{мин}} = f(V)$ мм/мин; $t = 1$ мм; для зустрічного зубофрезерування зубчастого колеса $m=20$ $z=23$

V , м/мин	K_x	K_y	K_z	τ_{CP} , МПа
100	1,6977	1,6084	3,5502	1245,6
150	1,544	1,4307	3,3909	1244,7
200	1,3851	1,2538	3,2313	1243,8
250	1,2196	1,0783	3,0705	1242,9
300	1,0452	0,9052	2,9074	1242

Динамічні характеристики ДСС ($M_{x,z}$; $k_{x,z}$; $C_{x,z}$) ідентифікуються за допомогою динамічних тестів конструкції і обробки результатів вимірювань за допомогою Фур'є-аналізу. Для цього використовується спеціальне обладнання і програмне забезпечення. Для збудження вібрацій може бути використаний цифровий ударний молоток з п'єзоелектричним датчиком сили. Результуючі вібрації вимірюються за допомогою датчиків переміщень, швидкостей і акселерометрів. В даний час є досить велика кількість публікацій [146, 183, 194, 244] за методикою обробки результатів вимірювань за допомогою Фур'є-аналізу. Розроблено спеціальне програмне забезпечення, що реалізує цю методику.

Дана методика дозволяє визначати динамічні характеристики елементів системи будь-якої форми та конфігурації. Однак часто зустрічається випадок, коли маложестких є тіло простої форми, наприклад, черв'ячна фреза, встановлена на оправці (валу). В цьому випадку фрезу можна розглядати як балку. Тоді існує можливість визначити динамічні характеристики аналітичним шляхом.

Для визначення динамічних характеристик балки скористаємося диференціальним рівнянням руху для згинальних коливань, наведеними в роботі [243, 273]. Диференціальне рівняння руху балки:

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

$$\left[\alpha^4 = \frac{\omega^2 m_0}{EJ} \right] \cdot \quad (5.15)$$

Граничні умови для закріпленої балки (5.16):

$$u_{z=0} = 0, \left(\frac{du}{dz}\right)_{z=0} = 0, \left(\frac{d^2u}{dz^2}\right)_{z=1} = 0, \left(\frac{d^3u}{dz^3}\right)_{z=1} = 0, \dots \dots \dots (5.16)$$

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

$$K_1^2(\lambda) - K_2(\lambda)K_4(\lambda) = 0. \quad (5.17)$$

Наведемо до виду

$$\cos \lambda = -\frac{1}{ch \lambda}, \text{ где } \lambda = \alpha \cdot l. \quad (5.18)$$

Графічне рішення цього рівняння показано на рис. 5.11. Корінь рівняння для нашого випадку ($k = 1$) $\lambda l = 1.875$.

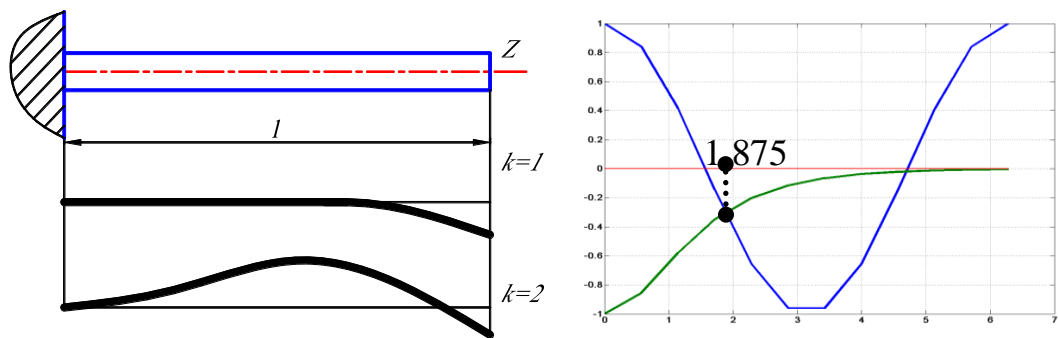


Рисунок 5.11 – Графічне рішення частотного рівняння

Висловимо частоту коливань ω з виразів, що описують потенційну і кінетичну енергії балки:

$$\omega^2 = \lambda_1^4 \cdot \frac{EJ}{M_0 l^4}, \text{ где } \lambda_1 = 1.875 \quad \text{Графич}$$

$$\omega^2 = \frac{1}{M_{\text{пр}} \delta_{\text{п}}}, \text{ где } \delta_{\text{п}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{l^3}{EJ} \quad \text{Расчет}$$

де ω – частота коливань балки, Гц; M_{OB} – узагальнена маса балки, кг; M_0 – маса балки, кг; δ_{II} – податливість балки; l – довжина балки, м; λ_1 – корінь частотного рівняння.

Звідси узагальнена маса:

$$M_{OB} = \frac{3}{\lambda_1^4} \cdot M_0. \quad (5.21)$$

Решта динамічні характеристики знаходяться як жорсткість, Н/м:

$$k = \frac{3EJ}{l^3}, \quad (5.22)$$

где $c = 2\zeta \sqrt{k \cdot M_{OB}}$ – узагальнений коефіцієнт демпфірування; E – модуль пружності, МПа; J – осьовий момент інерції, м⁴; ζ – логарифмічний декремент власних коливань балки; k – жорсткість балки, Н/м.

Величину логарифмічного декременту ζ можна знайти в довідковій літературі або визначити експериментальним шляхом [193; 273]. Наприклад, для оправлення, виготовленої зі сталі 40ХНМ, з параметрами твердості HRC38 ... 42, на яку встановлюється фреза $\zeta = 0.33 \dots 0.34$ [194; 273].

Для знаходження фізико-механічних характеристик матеріалу (В), а також вивчення впливу динамічних характеристик системи і режимів різання на геометричні параметри якості поверхні зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс проведені експериментальні дослідження. Для цих цілей використовувався діагностичний стенд на базі зубообробного комплексу мод. 5А342 [273]. Для проведення експериментальних робіт була встановлена динамометрична платформа. Динамометр також виконує функцію резцодержателя. На супорті встановлено стійка для закріплення для вимірювального датчика профілометра.

До складу стенду входять (рис. 5.12):

акселерометр і трьохканальний вимірювач вібрацій;

динамометр і вимірювач складових сили різання;

багатоканальний аналого-цифровий перетворювач;
персональний комп'ютер і програмне забезпечення прийому і обробки даних.

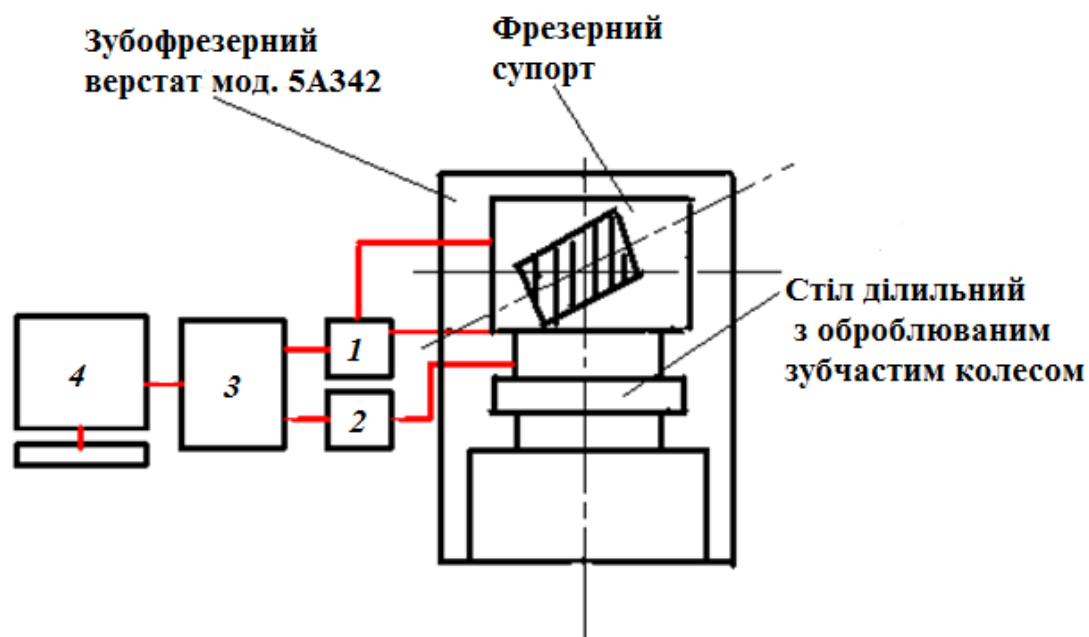


Рисунок 5.12 – Функціональна схема стенду

Основні характеристики застосовуваних пристроїв наведені в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Характеристики застосовуваних реєструючих пристроїв

Найменування	Кількість каналів	Смуга частот, кГц	Рівень сигналу, В
Динамометр Kistler 9257BA	3	0;5	± 5
Вимірювач вібрації ГлобалТест AP2043-50	3	8	± 5
Профілометр-профілограф Miyutoyo Surfrest SJ-301	6	8	± 5

Зубообробляючий комплекс мод. 5А342, оснащений системою вимірювальних і реєструючих пристроїв. Прийом даних може здійснюватися одночасно від декількох джерел, але при цьому загальне число каналів не

перевищує шістнадцяти.

Вимірювач силових параметрів призначений для вимірювання крутять моментів різання при швидкісному зубофрезерування фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки. В діагностичному стенді використовується динамометр фірми Kistler типу 9257BA.

Методика подальшої обробки профілограм і волнограмм полягає в наступному:

в межах кожного базового ділянки l або L визначають максимальну висоту виступу R_p (рис. 5.13);

визначають значення параметра R_z :

$$R_z = \frac{(\sum_{i=1}^5 h_i + \sum_{i=1}^5 h_i^i) \cdot 200}{\gamma_B}, \quad (5.23)$$

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

$$t_m = \frac{\sum_{i=1}^n \eta m t}{l} \cdot 100\%; \quad (5.24)$$

визначають середній крок нерівностей профілю шорсткості по середньої лінії:

$$S_m = \frac{\sum_{i=1}^N S m t}{N} = \frac{2l}{n \gamma_r} \quad (5.25)$$

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:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^N S}{N} = \frac{l}{N \gamma_r}, \quad (5.26)$$

де N – число локальних виступів на базовій довжині l .

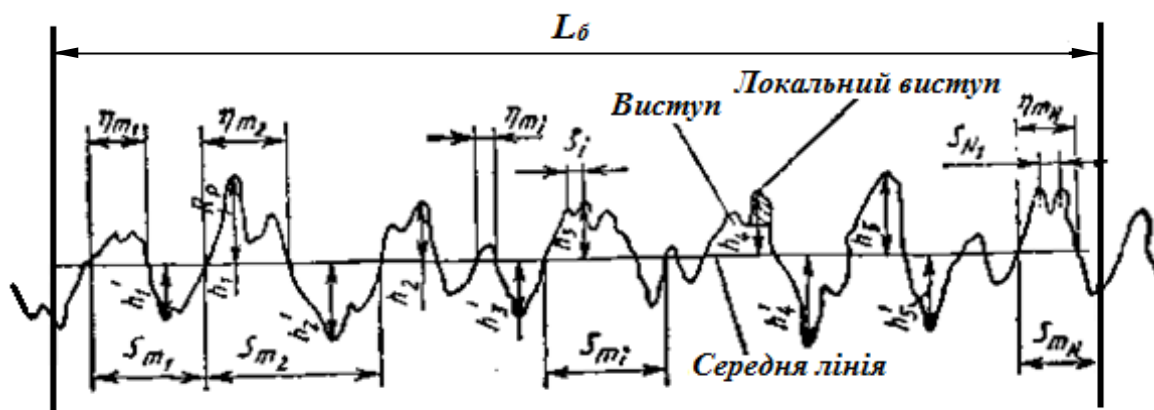


Рисунок 5.13 – Загальний вигляд профілю шорсткості поверхні

Дослідження процесу динаміки чистового зубофрезерування загартованих коліс проводилося за допомогою wavlet-аналізу і дозволило встановити основні залежності щодо забезпечення якості, точності і продуктивності обробки зубчастих коліс.

Якість поверхні при зубофрезерування загартованих зубчастих коліс, точність, продуктивність і надійність динамічної верстатної системи (ДСС) визначається можливістю управління і контролю силових режимом обробки процесу зубофрезерування за допомогою швидкодіючих датчиків фіксування частотних характеристик головного приводу зубообробного верстата і взаємозв'язку з параметрами процесу різання: сили різання P_z , Крутного моменту різання $M_{рез}$, потужності різання $N_{рез}$ [146].

Параметри різання визначають межі граничних режимів роботи для досягнення максимальної продуктивності обладнання і в той же час повинні забезпечувати якість і точність обробки загартованих зубчастих коліс.

Процес зустрічного зубофрезерування пов'язаний з нестабільністю через переривчастого різання, що постійно змінюється припуску, глибини відносного впровадження, яка веде до різання с СОЖ відповідає $a_i/\rho \geq 0,31$ [243, 273].

Товщина шару, що зрізається диференційовано змінюється зі зміною $\Psi_{ск}$ по залежності $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \varphi$, где S_z – подача на зуб; φ – кут профілю зуба фрези.

Переймаючись певними значеннями радіусу ріжучого леза ρ зуба фрези і подачі на зуб S_z , визначаємо мінімальні значення кутів ковзання без МОР і з її застосуванням (3.2) і (3.3):

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi};$$

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \varphi}.$$

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють визначити оптимальні кути ковзання $\Psi_{ск}$, при яких забезпечується стабільність процесу зубофрезерування, необхідні умови по стійкості інструмента і якість оброблюваної поверхні по відношенню до найбільшого кутку контакту зуба фрези Ψ_{max} з оброблюваних зубчастих виробом. Співвідношення між кутом ковзання $\Psi_{ск}$ і найбільшим кутом контакту зуба фрези Ψ_{max} з оброблюваної поверхнею дозволяє встановити ефективність процесу формоутворення через коефіцієнт K_p (без застосування МОР і з МОР) (3.5):

$$K_p = \frac{\sin \Psi_{max} - \sin \Psi_{ск}}{\sin \Psi_{max}} \cdot 100\% .$$

Аналіз зміни коефіцієнта ефективності формоутворення фрезеруванням Крізношених і відновлених великогабаритних зубчастих колесв залежності від режимів різання без застосування МОР і з МОР показав області, що забезпечують нормальний процес формоутворення робочих поверхонь. Сприятливим областю забезпечення параметрів стану поверхневого сляізношених і відновлених великогабаритних зубчастих колесявляється

значення коефіцієнта ефективності фрезерування K_r від 30% до 80%, що регламентується радіусом округлення ріжучого леза інструменту ρ або величиною зносу по задній поверхні, а також режимами різання: подачею, швидкістю різання, параметрами шорсткості, силами різання в залежності від прийнятої схеми різання [146, 180, 181, 184, 185].

5.3 Критерійний метод оцінки впливу теплового балансу на продуктивність, точність і якість формування поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс

Спільне розгляд механічних і теплових явищ при зубофрезерування загартованих зубчастих коліс [180, 183, 243] дозволяє вирішити задачу з теоретичного визначення кута нахилу умовної площини зсуву β_1 . Поперечна усадка стружки

$$k_a = \frac{\cos(\beta_1 - \gamma)}{\sin \beta_1} = \frac{\cos \gamma + B \sin \gamma}{B}, \quad (5.27)$$

де $B = tg\beta_1$ – величина, що характеризує ступінь пластичних деформацій металу, що знімається припуску і поверхневого шару оброблюваної поверхні зубчастого колеса;

γ – передній кут фрези.

З аналізу рівняння балансу механічної і теплової енергій при зубофрезерування матеріалів для величини B може бути отримано наступне теоретичне вираз (без урахування впливу явищ тертя на задній контактній майданчику фрези):

$$B = \frac{(PeB - 2) \operatorname{erf}(0,5\sqrt{PeB}) + 1,125\sqrt{PeB} \cdot e^{(-0,25PeB)}}{\sqrt{PeB} \left[\sqrt{Pe} + 0,325FD^{0,3} (1 - \sin \gamma)^{0,25} \right]} + \frac{0,665 \operatorname{erf}(0,5\sqrt{PeB})}{\sqrt{PeB}} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{0,145 F^{0,8} D^{0,25} \operatorname{erf}^{0,25} \left(0,5 \sqrt{PeB} \right)}{Pe^{0,5} B^{0,2} (1 - \sin \gamma)^{0,95}} + \\
& + \frac{PeB(1 - \sin \gamma)^{0,4} \left[\cos \gamma + \sin \gamma - B(\cos \gamma - \sin \gamma) \right]}{(\cos \gamma + B \sin \gamma) \left[Pe(1 - \sin \gamma)^{0,4} + 0,225 FD^{0,3} \right]} - 1, \quad (5.28)
\end{aligned}$$

де Pe ; F и D – безрозмірні комплекси (критерії подібності), що визначаються виразами:

де Pe ; F и D – безрозмірні комплекси (критерії подібності), що визначаються виразами;

$Pe = \frac{va_1}{a}$ – критерій Пеклі, що характеризує ступінь впливу режимних умов процесу va_1 по порівняно з впливом теплофізичних властивостей оброблюваного матеріалу;

$F = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta_\varepsilon$ – критерій, що відображає вплив геометрії фрези і відносини теплопровідності інструментального та оброблюваного матеріалів;

$D = a_i/b_1$ – критерій, що характеризує геометрію перетину зрізу, без застосування мастила, відповідає $a_i/\rho \geq 0,5$, а зі змазкою – $a_i/\rho \geq 0;31$.

Товщина шару, що зрізається $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \varphi$, де S_z – подача на зуб; φ – кут профілю зуба фрези (Рис. 5.14).

Вхідні в критерії Pe ; F і D і в рівняння (5.104) параметри мають наступні значення і розмірність: V – швидкість різання, м/с; λ_p і λ – коефіцієнти теплопровідності інструментального та оброблюваного матеріалів; Дж/(м-с-град); $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу; м²/с, $c\rho$ – питома об'ємна теплоємність оброблюваного матеріалу; Дж/(м³-град); $\beta = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \gamma)$ – кут загострення

фрези, радий.; α і γ - задній і передній кути фрези, радий.; $\varepsilon = \pi - (\varphi + \varphi_1)$ – кут при вершині фрези, радий.; φ і φ_1 – кут профілю фрези в нормальному перетині, рад.; $erfx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$ - інтеграл ймовірності, функція.

Всі параметри, що входять в рівняння (5.28), є відомими до досвіду. шуканий параметр B входить у багато членів лівої і правої частин рівняння (5.28), і теоретичне визначення цього параметра (усадки стружки) звичайним методом важко. Однак це завдання порівняно легко вирішується за допомогою ПК. Для випадку $B \geq 0,4$, відповідного раціональним режимам зубофрезерування, з рівняння (5.28) отримана простіша теоретична формула [146]

$$B = \frac{mPe^n}{F^k D^p (1 - \sin \gamma)^q}, \quad (5.29)$$

в якій коефіцієнт m і показники ступеня n ; k ; p и q , в залежності від умов виконання процесів зубофрезерування, визначаються емпіричним шляхом. Маючи в своєму розпорядженні відомими до досвіду величинами v ; a_1 ; b_1 ; a ; λ ; λ_p ; β ; ε і γ , аналітично визначаються безрозмірні комплекси Pe ; F ; D ($1 - \sin \gamma$) і далі при обраних значеннях m ; n ; k ; p и q [184] знаходиться величина тангенса кута нахилу площини зсуву B .

Аналіз рівнянь (5.104) і (5.105) дозволяє зробити наступні висновки:

1) при збільшенні теплопровідності інструментального матеріалу λ_p кут нахилу умовної площини зсуву зменшується, а усадка стружки росте.

2) кут нахилу умовної площини зсуву зростає, а усадка стружки зменшується при збільшенні критерію Pe (збільшення v , a_1 та зменшення

$a = \frac{\lambda}{c\rho}$, а також при зростанні переднього γ та заднього α кутів зуба фрези.

Таким чином, процеси зубофрезерування менш теплопровідних оброблюваних матеріалів характеризуються меншими значеннями коефіцієнтів усадки стружки, що підтверджується експериментальним шляхом;

3) інтенсивність впливу комплексу $Pe = \frac{va_1}{a}$ на кут зсуву і усадку стружки поступово знижується в міру зростання його значення (збільшення швидкості різання v ; товщини зрізаного шару при зустрічному зубофрезерування a_1 і зменшення теплофізичних властивостей оброблюваного зубчастого колеса a ;

4) вплив швидкості різання v і товщини зрізу a_i на збільшення B на зниження k_a є різними, так як товщина зрізу a_i входить не тільки в комплекс Pe , але і в комплекс D . Товщина зрізу при зубофрезерування є змінною величиною і залежить від виду фрезерування; радіуса округлення різальної крайки зуба фрези, режимів різання, параметрів врізання, фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу

При зустрічному фрезеруванні зубчастих коліс процес врізання (рис. 5.39.) Теоретично здійснюється з нульової товщини зрізаного шару. При $a = 0$ відбувається тертя ковзання зуба по оброблюваній поверхні і кожний наступний зуб працює по наклепаній поверхні, утвореній попереднім зубом, що призводить до зміни вільної енергії і, отже, до витраті певної частини енергії на тертя.

Встановлено, що велика частина роботи тертя ковзання перетворюється в теплоту, а зі збільшенням поверхневої температури відзначається тенденція зростання зносу ріжучої частини фрези. Тому з метою підвищення ефективності процесу формоутворення при фрезеруванні зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс необхідно визначення мінімального кута ковзання $\Psi_{ск}$ зубів фрези.

Ковзання буде відбуватися на певному куті ковзання $\Psi_{ск}$ до тих пір, поки пластичні деформації не перейдуть в мікрорізання і безпосередньо

різання, т. е. коли товщина зрізу (a_i) не досягне певного значення величини відносного впровадження ріжучим інструментом, що має радіус округлення ріжучого леза ρ .

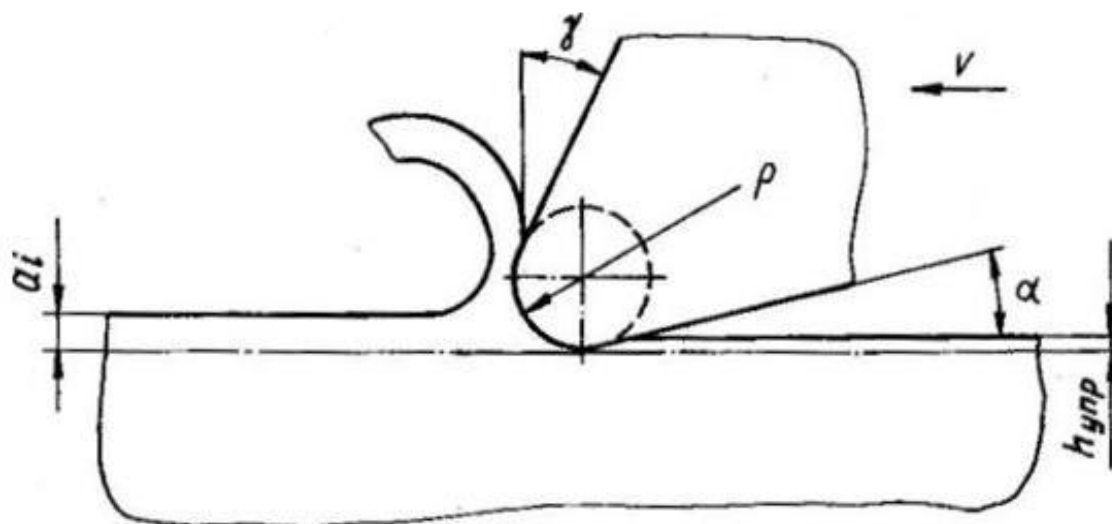


Рисунок 5.14 – Співвідношення між товщиною шару, що зрізається a_i і радіусом округлення різальної крайки зуба фрези ρ

Визначення мінімальних кутів ковзання при обробці зубчастих крупномодульних коліс методом фрезерування, виходячи з фізико-хімічних процесів механіки тертя, дозволяє значно підвищити ефективність процесу формоутворення зубів і експлуатаційні властивості їх поверхонь.

Рішення завдання про теоретичному визначенні кута зсуву β_1 (усадки k_a) при змінній товщині шару, що зрізається дозволяє теоретично розраховувати всі інші найважливіші параметри процесів зубофрезерування, які розглядаються на підставі досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених при допущенні, що механічна енергія при різанні повністю перетворюється в теплову. З урахуванням того допущення рівняння механічної і теплової енергій записується у вигляді

$$P_z \cdot v = Q = Q_c + Q_o + Q_p, \quad (5.30)$$

де P_z - окружна складова сили різання, н; v – швидкість різання, м/с; Q – загальна кількість теплоти, Дж/с; Q_c , Q_d і Q_p – теплота стружки, деталі і фрези, Дж/с.

Рівняння (5.30) трансформує розрахунок балансу тепла при зубофрезерування сталі 45 і 34ХНМ, відповідно, фрезами з пластинками з твердих сплавів Т15К6 і ВК8.

З отриманих результатів аналізу балансу теплоти випливають такі висновки:

- при збільшенні критерію P_z (режимів v та a_1) кількості теплоти Q ; Q_c ; Q_d і Q_p збільшуються;

- зважаючи на те що Q_d та Q_p зростають зі збільшенням P_z повільніше, ніж зростає загальна кількість теплоти Q , відносні значення Q_d/Q і Q_p/Q зменшуються, а збільшується Q_c/Q .

При обробці сталі 45 фрезами Т14К8 в стружку при розрахункових умовах йде від 37,9 до 87,2 % теплоти; в деталь – від 47,4 до 11,9 % та в фрезу – від 14,7 до 0,9 %;

при обробці сталі 34ХНМ фрезами ВК8 відсоток йде в фрезу теплоти значно вище, ніж при обробці сталі 45, і може досягати при $Pe < 10$ 30–40 %. При величинах $Pe > 60$ цей відсоток також вище і становить 5...7 %. Кількість теплоти Q_d/Q при великих Pe також вище, ніж при обробці сталі 45.

Наведені результати теоретичного дослідження балансу тепла при зубофрезерування в основі своїй досить добре узгоджуються з результатами експериментального і теоретичного досліджень інших авторів [146, 181].

Диференційовано вирішуючи рівність (5.30) [185], Отримаємо рівняння енергій, що включає в себе температуру процесу зубофрезерування:

$$P_z v = 1,85 \lambda b_1 \theta Pe^{0,65} E^{0,05} + m \lambda b_1 \theta \frac{Pe^n E^{0,04}}{\sin^{0,25} \alpha \sin^{0,08} \gamma} + 0,6625 \lambda b_1 \theta \frac{FD^{0,3} E^{0,175}}{\sin^{0,165} \alpha} \cdot (5.31)$$

Розрахунок балансу тепла по рівнянню (5.31) при реальних значеннях критеріїв подібності: $Pe = 50$; $F = 2$; $D = 0,05$; $E = 0,03$; и $\gamma = \alpha = 10^0$ дозволив отримати наступні результати:

$$Q_c = 86; Q_d = 11,6 \text{ и } Q_p = 2,4.$$

Загальне рівняння оброблюваності крупномодульних загартованих зубчастих коліс є багатокритеріальній функцією.

Рівняння (5.31) показує, що обробляється матеріалів визначається широким комплексом відомих до досвіду параметрів і факторів $(\lambda, cp, \lambda_p, a_1, b_1, \beta, \varepsilon, \alpha, \rho_1, \varphi)$ і ін., а також співвідношенням сил і температур, що розвиваються при зубофрезерування ($P_z / 0$).

Рівняння балансу енергій (5.31) дозволяє встановити зв'язок швидкості різання, що входить в критерій P_z , з різними технологічними параметрами зубофрезерування зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс.

Методом подібності [185] рівняння (5.31) приводиться до вигляду

$$\frac{1}{A} = \frac{kE^{0,1}}{\sqrt{Pe \sin^{0,05} \alpha}} + 0,6625 \frac{FD^{0,3} E^{0,175}}{Pe \sin^{0,165} \alpha}, \quad (5.32)$$

де $A = \frac{a_1 b_1 cp \theta}{P_z}$ – енергетичний критерій, що характеризує собою

теплову активність стружки по відношенню до всієї виділяється в зоні зубофрезерування теплоті; k – коефіцієнт, що враховує погрішність заміни

$Pe^{0,43}$ на \sqrt{Pe} , визначається емпірично (Табл. 5.7).

Теоретичне критеріальне рівняння (5.32) встановлює залежність $Pe = f(A)$, яка в подвійній логарифмічній сітці представляється у вигляді прямої лінії або ламаної лінії з двома прямолінійними відрізками.

З метою перевірки точності критеріального рівняння (5.32) виконано порівняння критеріальних залежностей $Pe = f(A)$, отриманих розрахунковим методом за рівнянням (5.32) і експериментальним шляхом. Результати розрахунків і дослідів наведені на рис. 5.41–5.43.

Аналіз наведених результатів зіставлення дозволяє зробити висновок про цілком задовільною точності критеріального рівняння (5.32) і доцільності його використання при розробці розрахункового методу визначення режимів різання.

Таблиця 5.7 – Визначення коефіцієнта k

Pe	k	Pe	K
1	2,85	40	3,7
2	3	50	3,75
5	3,2	76	3,85
10	3,3	100	3,9
20	3,5	150	4,05
30	3,6	200	4,1

Швидкість зубофрезерування за рівнянням (5.32) визначається двома шляхами.

1. 1. Розрахунково-графічним методом з встановленням статичної залежності $Pe = C_1 A^n$ і отриманням формули для швидкості різання у вигляді

$$v = \frac{C_1 a}{a_1} \left(\frac{a_1 b_1 C_\rho \theta}{P_z} \right)^n \quad (5.33)$$

де C_1 і n – числові величини (рис. 5.15).

Наприклад, на основі даних, наведених на рис. 5.15-5.17, отримані наступні рівняння оброблюваності спрощеного виду:
при обробці сталі 34ХНМ фрезами Т30К4

$$v = \frac{9a}{a_1} \left(\frac{a_1 b_1 C_p \theta}{P_z} \right)^{2,3}; \quad (5.34)$$

при обробці сталі 34ХНМ фрезами Р6М5

$$v = \frac{10,95a}{a_1} \left(\frac{a_1 b_1 c p \theta}{P_z} \right)^{2,0}; \quad (5.35)$$

при обробці сталі 45 фрезами Т5К10

$$v = \frac{8,35a}{a_1} \left(\frac{a_1 b_1 c p \theta}{P_z} \right)^{2,0}. \quad (5.36)$$

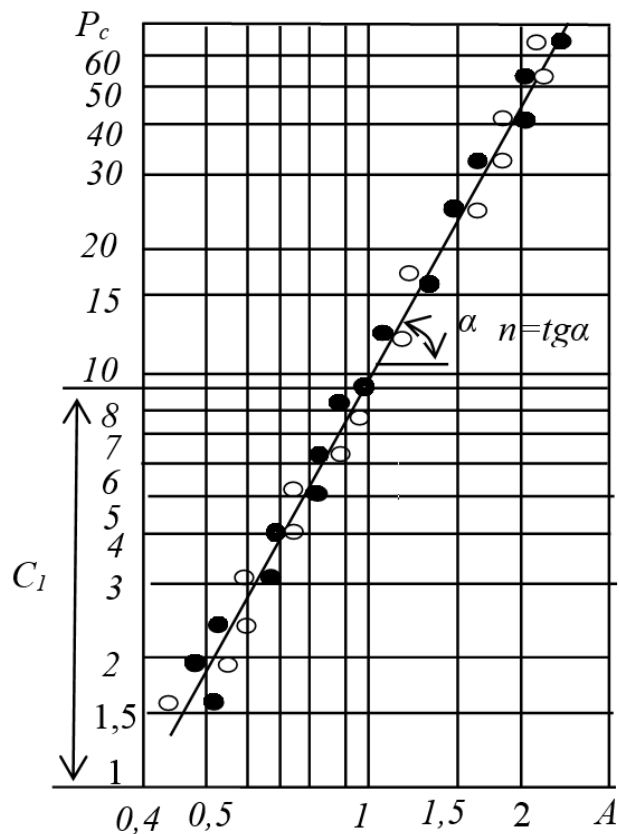


Рисунок 5.15 – Порівняння досвідчених і розрахункових критеріальних залежностей $Pe = f(A)$ при зубофрезерування зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс зі сталі 34ХНМ фрезами Т30К4

● – розрахункові точки; ○ – досвідчені точки

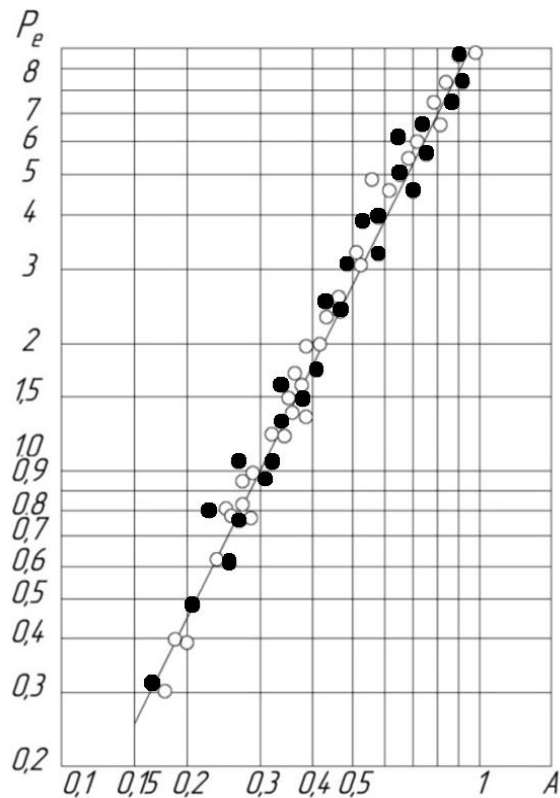


Рисунок 5.16 – Порівняння досвідчених і розрахункових критеріальних залежностей $Pe = f(A)$ при зубообробці сталі 45 фрезами P6M5
 ● – розрахункові точки; ○ – дослідні точки

2. Розрахунковим методом з використанням рішення рівняння (5.37) щодо критерію Pe в наступному вигляді:

$$Pe = \frac{k^2 A^2 E^{0.2}}{4 \sin^{0.1} \alpha} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2,65 F D^{0.3}}{k^2 A E^{0.025} \sin^{0.065} \alpha}} \right)^2. \quad (5.37)$$

Для визначення коефіцієнта k з рівняння (5.37) розраховується критерій P , а потім по знайденому значенню Pe вибирається значення k .

Рівняння (5.37) містить швидкість різання лише в критерії $Pe = \frac{va_1}{a}$.

Вирішуючи рівняння (5.37) щодо швидкості різання v і підставляючи замість критеріїв подібності їх відповідні вирази, отримаємо загальну формулу оброблюваності сталей і сплавів в наступному вигляді:

$$v = \frac{k^2 \lambda c p a_1 b_1^2 E^{0.2}}{4 \sin^{0.1} \alpha} \left(\frac{\theta}{P_z} \right)^2 \times \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2,65 \lambda_p \beta \varepsilon \left(\frac{a_1}{b_1} \right)^{0.3}}{k^2 a_1 b_1 \lambda c p E^{0.025} \sin^{0.065} \alpha} \cdot \frac{P_z}{\theta}} \right]^2. \quad (5.38)$$

Рівняння (5.38) показує, що обробляється матеріалів визначається широким комплексом відомих до досвіду параметрів і факторів $(\lambda, c p, \lambda_p, a_1, b_1, \beta, \varepsilon, \alpha, \rho_1, \varphi)$ і ін., а також співвідношенням сил і температур, що розвиваються при зубофрезерування (P_z/θ) .

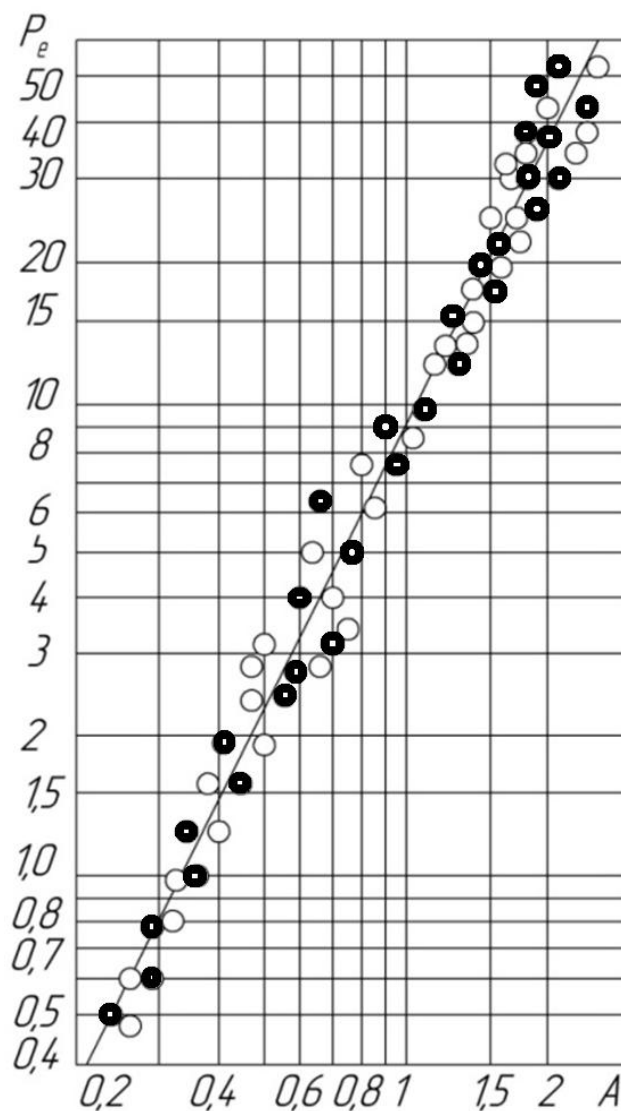


Рисунок 5.17 – Порівняння досвідчених і розрахункових критеріальних залежностей $Pe = f(A)$ при зубообробці сталі 45 фрезами T5K10

● – розрахункові точки; ○ – дослідні точки

5.4 Методика оцінки впливу вібрацій на процес формоутворення поверхневого шару при зубонарізуванні зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс

При чистової і швидкісній зубообробки виникають вібрації, які викликають відхилення параметрів поверхневого шару зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс [184, 273], джерелом яких є:

1. Зміна радіуса округлення різальної крайки зубів зуборізної фрези – ρ при змінному знятті припуску при зустрічному фрезеруванні;
2. Швидкості різання – V ;
3. Подачі – S_{\min} , S_o ;
4. Геометричні параметри зубооброблюючих фрез;
5. Поєднання, величини і співвідношення параметрів радіусу округлення різальної крайки зубів зуборізної фрези – ρ , швидкість різання – V , подачі – S_{\min} , S_o .

Відповідно до технологічних режимами різання в стані сталого режиму зубообробки будь-яке з цих відхилень може сприяти зміні кількісних і якісних показників параметрів поверхневого шару зубчастих коліс і сил, що діють на зуборізну фрезу. Залежно від напрямку і фази відхилень діючі сили можуть або гасити, або порушувати вібрацію.

Система, виведена імпульсом сили з рівноваги, зазвичай вібує з загасанням коливань. Однак, якщо зміни сил різання значні і протистоять демпфуюча ефекту, то вони можуть викликати зростання амплітуди вібрації; встановлюється рівновага демпфуючих і збуджуючих сил. Вібрація, що виникає в такому випадку, називається самозбуджується.

Вібрація, порушується в будь-якому одному напрямку, може привести до зміни умов формоутворення. Це, в свою чергу, призводить до зміни сил не тільки в напрямку вібрації, але також і в напрямках, ортогональних до неї.

Отже, спільно можуть поєднуватися кілька видів коливань. Ця обставина і підсилює ефект самозбуджується вібрації (автоколивання).

У багатьох випадках фреза рухається по поверхнях, які були раніше вже оброблені цією фрезою. Якщо вібрація виникла при попередньому робочому ході, то обробляється поверхню буде хвилеподібною, що викличе зміна сили різання. Залежно від фазового співвідношення може відбутися збільшення хвилястості поверхні. Кілька наступних робочих ходів викликають збільшення цієї регенеративної вібрації.

При зубофрезерованні циліндричних зношених і відновлюваних зубчастих коліс спостерігається чотири основні типи вібрації (коливань).

1. Вільна вібрація (власні коливання) системи виникає внаслідок будь-яких ударних впливів. Ця вібрація буде затухати внаслідок демпфуючого дії верстата.

2. Вимушені коливання, порушені від стороннього джерела, а не від процесу різання. Ці коливання можуть виникати внаслідок дисбалансу приводу верстата або під дією зовнішньої динамічного навантаження. Такі коливання зазвичай не досягають резонансної частоти системи верстат - інструмент - заготовка.

3. Вимушені коливання, порушені під час процесу зустрічного зубофрезерування. Процес зустрічного зубофрезерування має властиву йому періодичність, яка призводить до вимушених коливань (наприклад, процес утворення переривчастої елементної стружки в співвідношенні з радіусом округлення різальної крайки зубів зуборізної фрези – ρ).

4. Самозбуджується вібрація (руйнуюча). Явище, при якому вібраційне рух, що виникає в процесі різання, створює енергію для збереження вібрації. Це явище може розглядатися як негативне демпфірування.

Типи вібрацій досліджений в системі з одним ступенем свободи при масі $m=M$ на пружному елементі з жорсткістю k і з зусиллям демпфірування g ,

Якщо маса рухається з прискоренням \ddot{x} під дією прикладеної сили $F(t)$, то рівняння рівноваги має такий вигляд:

$$m \cdot \ddot{x} = -g \cdot \dot{x} - k \cdot x + F(t); \quad (5.39)$$

або

$$m \cdot \ddot{x} + g \cdot \dot{x} + k \cdot x = F(t) \quad (5.40)$$

Допускається, що пружний елемент має поворотну силу, пропорційну зміщенню \dot{x} , в той час як віброгасники має демпфуючу силу, пропорційну швидкості \dot{x} .

Складні системи з багатьма ступенями свободи і нелінійними демпфірувальними і поворотними силами можуть бути приведені до простих, описуваних (5.40).

Зазначена форма рівняння адекватно застосовна для опису вібрацій при зубофрезерування циліндричних зношених і відновлюваних зубчастих коліс.

Фізична модель показана на рис. 5.18. Коливання викликалися горизонтальним переміщенням заготовки. Заготівля під час зустрічного зубофрерування зміщується на фіксовану відстань a . Розглядаючи силу як функцію глибини різання, отримаємо наступне рівняння руху:

$$m \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k \cdot (x + a) = F [d - x \cdot (t + h)] \quad (5.41)$$

де t , c і k – постійні величини вібрації (маса, коефіцієнт демпфірування і жорсткість); t – час зсуву на величину x та k – відставання сили по фазі.

Допускаючи, що $\frac{c}{m} = 2 \cdot n$, $\frac{k}{m} = p^2$, $x \cdot (t - h) = x_h$ рівняння (5.21) можна записати

в такий спосіб:

$$\ddot{x} + 2 \cdot n \cdot \dot{x} + p^2 - \left[\frac{1}{m} \cdot F \cdot (d - x_h) - \frac{k}{m} \cdot a \right] = 0 \quad (5.42)$$

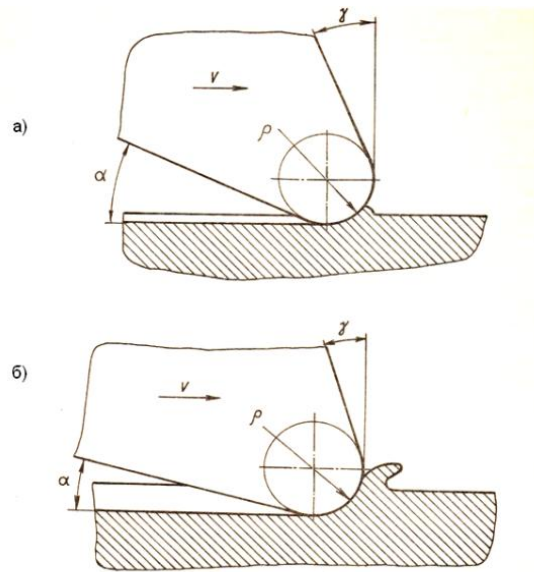


Рисунок 5.18 – Система вібрації з одним ступенем свободи

а) - період початку виникнення вібрації, б) – період фази завершення вібрації

Беручи, що горизонтальна складова сили різання являє собою лінійну функцію

$$[F \cdot (d - x_h)] = K \cdot (d - x_h), \quad (5.43)$$

і для середнього положення, в якому зміщення заготовки одно а й глибина різання d ,

$$K \cdot d = k \cdot a. \quad (5.44)$$

Використовуючи метод для дослідження автоколивань отримаємо наступне рішення при зубофрезеруванні:

$$x = x_0 \cdot e^{zt}, z = \alpha + j \cdot \omega, \quad (5.45)$$

де ω — декремент (при $\alpha < 0$) або інкремент (при $\alpha > 0$) коливання; ω — частота та $j = \sqrt{-1}$.

Підставляючи ці величини в (5.45), отримаємо

$$z^2 + 2 \cdot n \cdot z + p^2 + \lambda \cdot e^{-z \cdot h} = 0. \quad (5.46)$$

Дійсні та уявні частини наступні:

$$p^2 - \omega^2 + \alpha^2 + 2 \cdot n \cdot a + \lambda \cdot e^{h \cdot \alpha} \cdot \cos \omega h = 0; \quad (5.47)$$

Підставляя (5.44) і (5.45) в (5.46), маємо

$$\ddot{x} + 2 \cdot n \cdot \dot{x} + p^2 + \lambda \cdot x_h = 0, \quad (5.48)$$

де $\lambda = \frac{k}{m}$.

$$2 \cdot (a + n) - \lambda \cdot e^{-h \cdot \alpha} \cdot \sin \omega h = 0. \quad (5.49)$$

Розглядаючи гармонійні коливання ($a = 0$), отримаємо

$$p^2 - \omega^2 + \lambda \cdot \cos \omega h = 0; \quad (5.50)$$

$$2 \cdot n \cdot \omega - \lambda \cdot \sin \omega h = 0. \quad (5.51)$$

Гармонійні коливання можуть існувати лише в тому випадку, якщо

$$\omega_1 = \omega(\lambda, n, h, p); \quad (5.52)$$

$$g(\lambda, n, h, p) = 0, \quad (5.53)$$

ці рівняння справедливі одночасно.

Розглянемо величини λ , n , h і p , задовольняють (5.51). беручи параметри n , h і p в вигляді фіксованих величин, λ повинна мати певну величину λ_1 для гармонійних коливань. Ця величина (величина гармоніки) має наступний вигляд з (5.51):

$$\lambda_1 = \frac{2 \cdot n \cdot \omega_1}{\sin \omega_1 \cdot h}, \quad (5.54)$$

де ω_1 – частота гармонійних коливань.

В цьому випадку $\alpha = 0$, $\omega = \omega_1$ і $z = j\omega_1$.

Введемо приріст $\Delta\lambda$:

$$\lambda = \lambda_1 + \Delta\lambda; z = j\omega_1 + \Delta z; \Delta z = \Delta\alpha + j\Delta\omega$$

Підставляючи отримані величини в (5.54) і розділяючи дійсні та уявні частини, після перетворень отримаємо

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda_1^2 h + 2n(p^2 + \omega_1^2)}{\lambda_1 [(2n - \lambda_1 h \cos(\omega_1 h))^2 + (2\omega_1 + \lambda_1 h \sin \omega_1 h)^2]}. \quad (5.55)$$

Права частина цього рівняння завжди позитивна, отже, коливання посилюються при $\Delta\lambda > 0$, слабшають при $\Delta\lambda < 0$ і є гармонійними лише при $\Delta\lambda = 0$.

Подібним чином можна показати, що гармонійні коливання можуть бути лише при певних значеннях параметрів n , h і p . Таким чином, в загальному

випадку (5.52) буде описувати коливання з зменшується або з амплітудою. Останній випадок відповідає вібраціям при швидкісному зубофрезеруванні.

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. 5.19, б) (ε – кут між вектором сили різання і перпендикуляром).



Рисунок 5.19 – Модель вібрації з багатьма ступенями свободи:

a – зміна товщини зрізу; *б* – 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

$$X_i = P \cos(\gamma_i - \varepsilon) \frac{1}{k_i} \frac{\Omega_i^2}{\Omega_i^2 - \omega^2 + 2jg_i\omega}, \quad (5.56)$$

де $j = \sqrt{-1}$.

Для розгляду самозбуджується вібрації необхідно визначити складову амплітуди в напрямку u :

$$Y_i = P \cos(\gamma_i - \varepsilon) \cos \gamma_i \frac{1}{k_i} \frac{\Omega_i^2}{\Omega_i^2 - \omega^2 + 2jg_i\omega}. \quad (5.57)$$

Термін

$$U_1 = \cos(\gamma_i - \varepsilon) \cos \gamma_i, \quad (5.58)$$

називається коефіцієнтом направленності.

Змінюється сила $P(\omega)$ діє одночасно на всі n види власних коливань.

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

$$Y = \sum_{i=1}^n Y_i = P \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{k_i} \frac{\Omega_i^2}{\Omega_i^2 - \omega^2 + 2jg_i\omega} = PF, \quad (5.59)$$

де

$$F(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{k_i} \frac{\Omega_i^2}{\Omega_i^2 - \omega^2 + 2jg_i\omega}. \quad (5.60)$$

Для визначення критерію стабільності можна записати приватна з

(5.56):

$$q = \frac{Y}{Y_0} = \frac{F(\omega)}{F(\omega) + 1/r}, \quad (5.61)$$

де $F(\omega)$ являє собою комплексне число так, що також є комплексним.

Якщо $|q| > 1$, тоді Y більше Y_0 і, таким чином, хвилястість збільшується з часом, т. е. система нестійка. Якщо $|q| < 1$, система стійка. Вираз $|q| = 1$, є межа стабільності.

Запишемо дійсну і уявну частини $F(\omega)$

$$F(\omega) = G(\omega) + jH(\omega). \quad (5.62)$$

Межа стабільності визначається з рівняння

$$|q| = 1 = \left| \frac{G(\omega) + jH(\omega)}{G(\omega) + 1/r + jH(\omega)} \right|. \quad (5.63)$$

Поділ правій частині рівняння на дійсну і уявну величини дає умова стабільності як

$$-\frac{1}{r_{1im}} = G(\omega_{1im}). \quad (5.64)$$

Функція $G(\omega)$ являє собою дійсну частину $F(\omega)$ і для системи з одним ступенем свободи має вигляд

$$G(\omega) = \frac{U}{k} \frac{\Omega_i^2 - \omega^2}{(\Omega_i^2 - \omega^2) + 4g^2 \omega^2}; \quad (5.65)$$

$$dP = k_1 dS + k_2 dr + k_3 d\psi, \quad (5.66)$$

де k_1, k_2 і k_3 – динамічні коефіцієнти.

Зміна сили різання dP от зміни товщини зрізу dS , подачі dr і швидкості $d\psi$ ($d\psi$) є зміна кутів швидкості обертання фрези і (5.66) може бути представлено як

$$dP = k_1 dS + \frac{2\pi K}{\psi} dr + \left[K_\phi - \frac{2\pi K}{\psi} S_0 \right] d\psi, \quad (5.67)$$

де $K = k_3 - k_1$ і k_3, k_ϕ – статичні коефіцієнти, що відповідають товщині зрізу і швидкості, відповідно. S_0 – товщина зрізу в стійкому стані (або середня товщина).

Якщо крива, утворена вершиною зуба фрези, являє собою $x(t)$, то крива на вільній поверхні, утворена при попередньому обороті, $x(t - T)$, де T – час одного обороту фрези.

Отже,

$$dS = x(t) - x(t - T). \quad (5.68)$$

Зміна швидкості \underline{dS} є незначним і може не враховуватися. Таким чином, підставляючи \underline{dS} в (5.67), отримаємо

$$dP = k_1^*[x(t) - x(t - T)] + \frac{2\pi k^*}{\psi}. \quad (5.69)$$

Це рівняння може бути застосовано для опису вібрацій з урахуванням зміни константи в залежності від геометрії елементів вібраційної системи:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + gx = -dP. \quad (5.70)$$

Розглянемо елементи еквівалентної динамічної системи. Підставляючи (5.69) замість \underline{dP} , отримаємо:

$$m\ddot{x} + \left(c + \frac{2\pi k^*}{\psi}\right)\dot{x} + (g + k_1)x - k_1 x(t - T) = 0, \quad (5.71)$$

що представляє собою лінійне диференціальне рівняння другого порядку, яке буде мати наступне рішення:

$$x = Ae^{\delta t} \cos \omega t. \quad (5.72)$$

Якщо показник ступеня $\delta > 0$, то амплітуда буде зростати. З іншого боку, якщо $\delta < 0$, то амплітуда вібрації буде зменшуватися. Таким чином, значення $\delta = 0$ представляє межа стабільності. Для даного випадку (5.72) набирає вигляду

$$x_{lim} = A \cos \omega t. \quad (5.73)$$

Підставляючи отриману величину x в (5.71), визначаємо k_x як функцію ψ для межі стабільності.

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. 5.20) у вигляді допоміжного контуру.

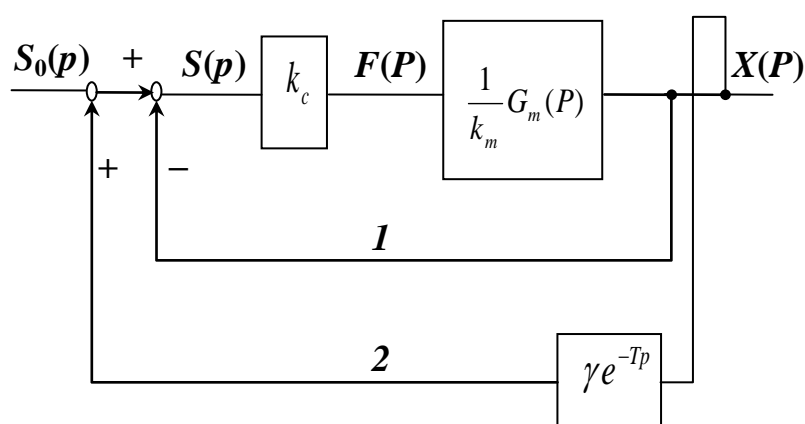


Рисунок 5.20 – Контур-аналог динамічного процесу різання

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

Передавальна функція від $S_o(p)$ до $S(p)$ визначається безпосередньо з контуру-аналога динамічного процесу різання (рис. 5.20). Таким чином:

$$\frac{x(p)}{x_o(p)} = \frac{1}{1 + (1 - \nu \cdot e^{r/p}) \cdot (k_c / k_m) \cdot G_m(p)} \quad (5.74)$$

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

Висновки до розділу 5

1. Розроблено процес моделювання роботи зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс.

2. Створені високопродуктивні процеси формоутворення зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс, які базуються на комплексному використанні основних принципів: 1) відсутність жорсткої кінематичного зв'язку між рухом різання - обертанням інструменту і рухами формоутворення; 2) застосування дискових спеціальних немодульних фрез діаметром 300 ... 450 мм; 3) оптимізації процесів зубообробки варіюванням коефіцієнта профільного формоутворення з урахуванням жорсткості динамічної верстатної системи.

3. Вперше визначили і математично описано взаємозв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс на основі ОЦІНКИ показників якості поверхонь, що дозволило вирішити основну проблему зубообробки - забезпечення продуктивності, точності та якості Відновлення великогабаритних зубчастих коліс.

4. Розроблено методику щодо забезпечення якості обробленої поверхні, виключення рисок, відшаровування поверхневого шару, забезпечення рівноважного стану поверхневого шару з регламентуванням кута ковзання $\Psi_{ск}$, для чого розглянуті фізико-хімічні процеси механіки взаємодії оброблюваних зубчастих виробів та інструменту.

5. Розроблено математичну модель прогнозування структури і параметрів систем зубообробки крупномодульних зубчастих коліс; запропоновано загальні принципи моделювання оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс.

6. Удосконалено розрахунок залишкових напружень; обумовлених структурними і фазовими перетвореннями ґрунтується на розрахунку температурних залишкових напруг і залишкових напружень, обумовлених силовим впливом на поверхневий шар.

РОЗДІЛ 6

ІНСТРУМЕНТАЛЬНЕ ОСНАЩЕННЯ ПРИ ІНТЕНСИВНОЇ І ВИСОКОЯКІСНОЇ ЗУБООБРОБКИ ВСТАНОВЛЕНИХ ЗАГОРТОВАНИХ КРУПНОМОДУЛЬНИХ ЗАБЧАСТИХ КОЛІС

6.1 Оптимізація відновлення великогабаритних зубчастих вінців підвищеної точності.

В процесі експлуатації гірничодобувних комплексів, шахтного підйомного обладнання, важких транспортних засобів, їх робочі властивості поступово погіршуються через зношування в т.ч. великогабаритних зубчастих приводів підвищеної точності. У таких великогабаритних зубчастих передачах з'являються відмови і несправності, які усувають при різних видах ремонтів. Для забезпечення якісного ремонту пропонується нова оптимізація відновлення великогабаритних зубчастих вінців підвищеної точності.

При відновленні зношених зубів наплавленням у зубчастих коліс великого діаметра до 15м і модулі більш 10мм наплавляють зношену сторону кожного зуба. Високу зносостійкість і міцність, що наплавляються поверхонь зубів дає застосування сплавів типів сормайт і сталініт. Тонкий шар сормайт наносять на раніше наплавлену за допомогою присадочного матеріалу і спустошену поверхню (рис. 6.1). Після наплавлення сормайтом зуби [146, 243, 273]. попередньо фрезерують спеціальними черв'ячними фрезами з «протуберанцем» і остаточно обробляють спеціальними фрезами, оснащеними твердосплавними пластинками.

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



а)

б)

Рисунок 6.1 - Зношені великогабаритні зубчасті колеса: а - ізношеное циліндричне зубчасте колесо; б - наплавлення ізношеного циліндричного зубчастого колеса

Втомне викришування робочих поверхонь зубів, яке зазвичай виникає поблизу початкової окружності колеса на ніжці зуба є основним видом руйнування закритих передач. Причиною є змінні контактні напруги на поверхні зубів σ_H , під дією яких з'являються первинні тріщини, що ростуть тріщини, сколювання, раковини, що відкололися частки металу з поверхні зубів (рис. 6.2). Нерідко утворення тріщини біля основи призводить до утворення відколів, що призводить до підвищення контактного тиску і порушення роботи передачі [184, 243, 273]. У відкритих передачах поверхневі шари стираються раніше, ніж в них з'являються втомні тріщини, тому вищерблення з'являється досить рідко.

Відома відновлення точних великогабаритних циліндричних зубчастих вінців, де на стадії попередньої обробки зубів коліс під загартування і остаточну лезову швидкісну зубообробки застосовують первинні чорнові фрази з модифікованим профілем головки зуба з «протуберанцем.» [182, 194].

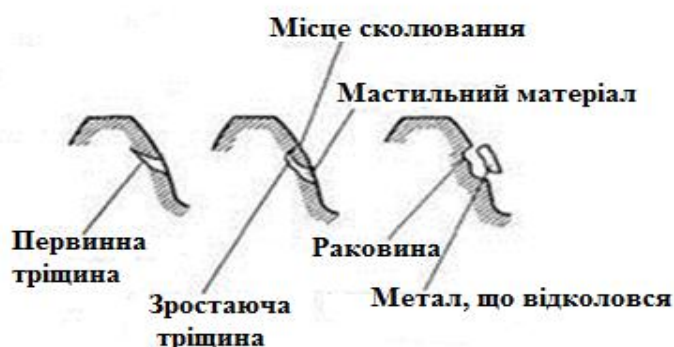


Рисунок 6.2 - Схема формування тріщини на евольвентній поверхні зубів великогабаритних зубчастих вінців

Для цієї мети головка зуба фрези (Рис. 6.3, а) на невеликій ділянці біля самої вершини має відмінний від стандартного $\alpha_0 = 20^\circ$ кут профілю, а товщина зуба занижена на величину припуску Δ (Рис. 6.3, б), необхідного для подальшої остаточної операції.

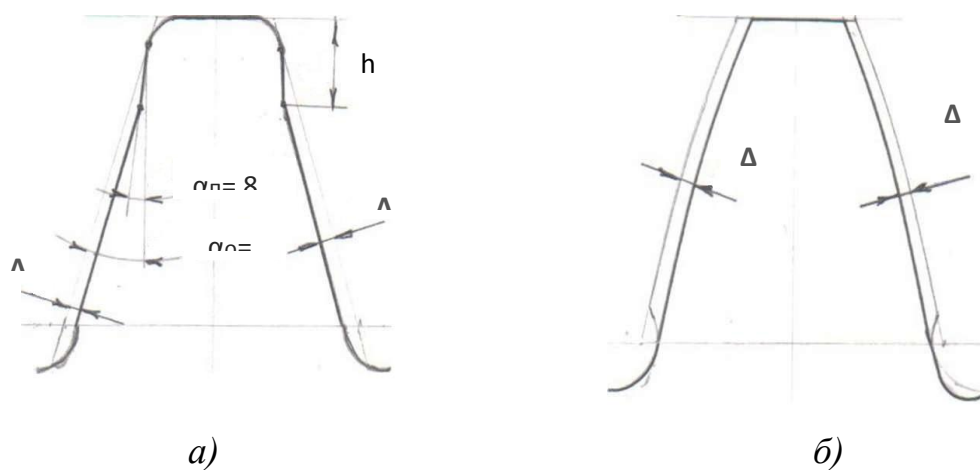


Рисунок 6.3 - Попереднє нарізування зубів колеса: а - зуб черв'ячної фрези з «протуберанцем»; б - зуб колеса оброблений з припуском - Δ : h - висота «протуберанця», α_0 - кут вихідного профілю, α_p - кут профілю «протуберанця»

Після обробки такої фрезою на бічних поверхнях зубів колеса залишається необхідний припуск Δ (Рис.3, б), а денця зубів обробляються в міру. Звільнення вершин чистового інструменту, наприклад, шліфувального круга, від участі в різанні по денця, сприяє поліпшенню процесу різання. Знижуються радіальні сили різання, зменшуються вібрації і віджимання інструменту, а отже, підвищується його стійкість і якість оброблених зубів.

Недоліком фрез з «протуберанцем» є, то що на ділянці профілю зуба зниженням кутом ($\alpha_3 = 1,5^\circ - 2^\circ$), одержуваного при затилованні.

Можливість застосування розробленої технології попередньої обробки на зубах великого модуля ($m = 20 - 25$ мм) вперше була успішно випробувана при зубонарізуванні зношеного і відновленого великогабаритного зубчастого вінця $D_a = 8058$ мм, $m = 28$ мм; $Z_k = 284$; $\beta_0 = 6^\circ 25'$; $b_3 = 1000$ мм, сталь 35ХМЛ; 220-260 НВ; ступінь точності 8-В ГОСТ1643-81, використовуваного в унікальному рудорозмольному млині мод. МБ 90х30.

Зубофрезування здійснювалося на спеціальному важкому вертикально зубофрезерні Верстаті мод. КУ-306 (Рис. 6.4), з діаметром робочої планшайби 8000 мм. Для чорнового нарізування зубів використовували швидкорізальної червячну фрезу «Прогрес» [180, 244, 273], що має подовжений забірний конус ($l_k = 350$ мм) і збільшене розмір отвору - $\phi 100H7$. На зубах фрези (Рис. 6.5), що мають повний по висоті профіль, виконаний «протуберанець» за схемою рис.6.3, а, на зубах забірною конуса виконані стружкорозділительні канавки. Наявність канавки дозволяє розділити коробчаті стружки, тобто уникнути скрутних умов різання. Це підвищує стійкість інструменту.

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. Машинне час нарізання вінця за один прохід склало 110 годин.

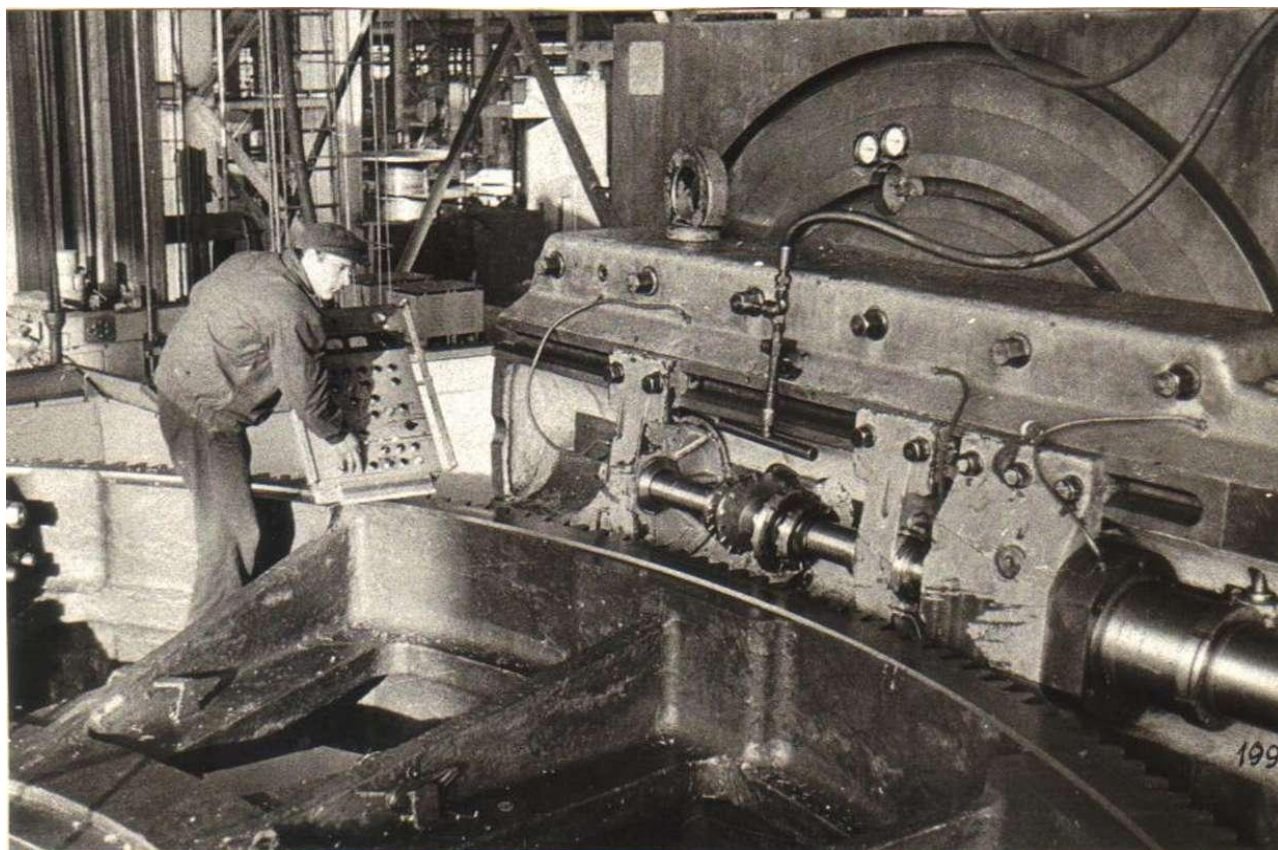


Рисунок 6.4 - Відновлення зубчатого вінця $m = 28$ мм; $z_k = 284$, $D_a = 8058,4$ мм рудорозмольного млини мод.МБ90х30

Для порівняння: машинне час обробки цього вінця фрезами інших конструкцій, наприклад заводу «Фрезер», становить 350 годин.

Для чистової обробки зубів за один прохід застосовували спеціальну черв'ячна фрезу $m = 28$ (Рис. 6.5), оснащену твердосплавними напайними пластинами зі сплаву ВК 10-ХОМ [146, 183, 273].

Напрямок фрезерування використовували зустрічну, режими різання: $t = 0,6$ мм, $S_{\phi} = 3,86$ мм / об; $n_{\phi} = 0,33$ сек⁻¹.

Машинне час чистової обробки вінця склало 65 годин. Максимальний знос окремих зубів фрези після зазначеного безперервного часу роботи не перевищив 0,3 мм, що в 4-5 разів менше, ніж при аналогічній обробки швидкорізальними фрезами. Про високу стійкості фрези свідчить і те, що різниця товщини зубів обробленого вінця у верхнього і нижнього торців ($I_3 =$

1000 мм) не перевищила 0,06 мм. Вимірювання параметрів точності нарізаних зубів накладними приладами показало, що за відхиленнями окружного кроку зубів і кроку зачеплення вінець відповідає 8-го ступеня точності по ГОСТ 1643-81.

Чорновий і чистовий зубообробки після відновлення зубів великогабаритних вінців чорновими фрезами «Прогрес» з «протуберанцем» і чистовими твердосплавними фрезами (рис.6.5) спеціальної конструкції.

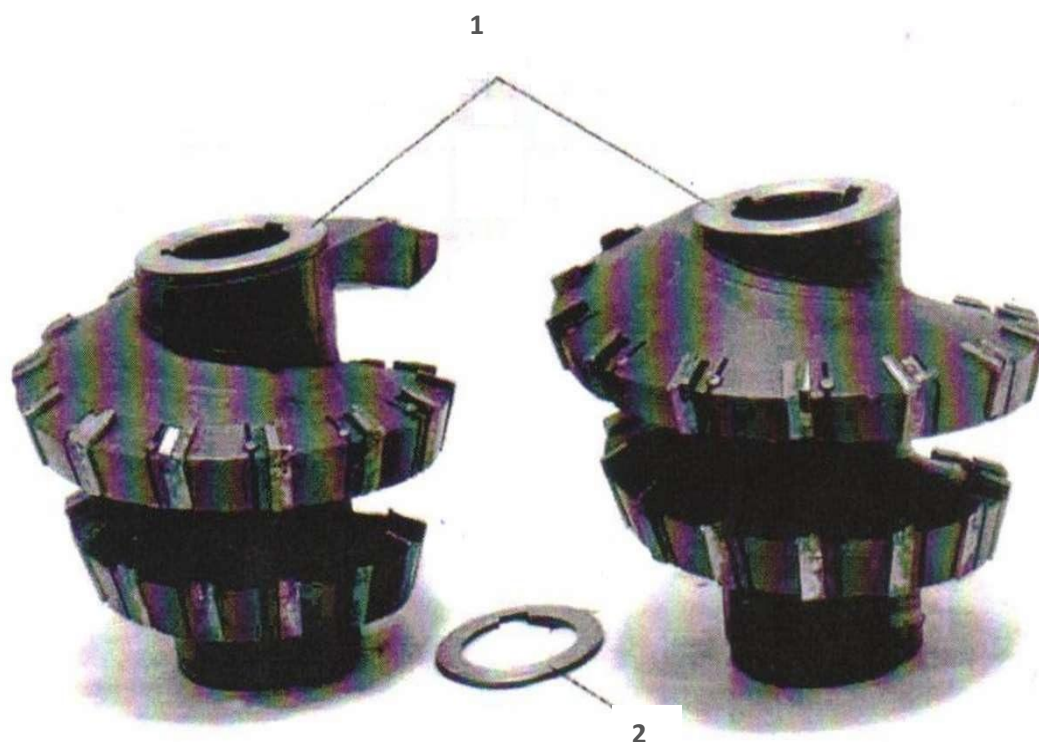


Рисунок 6.5 - Спеціальна червячна двокорпусна фреза двостороннього різання $m = 28$ мм; $\alpha_f = 19^\circ 20'$.

1-корпусу фрези; 2 дистанційне кільце

Обробка проводилася на вертикально-зубофрезерні Верстати мод. ННА-750А фірми «Шібаура» (Японія) (рис. 6.6) зустрічним фрезеруванням з застосуванням охолоджувальної рідини масло «Індустріальне-20». Чистове нарізування вінця $m = 20$ мм; $Z_k = 268$; $\beta_3 = 5^\circ 15'$; $b = 700$ мм; сталь 35ЛШ; 140-160 НВ здійснюється за один прохід при режимах різання: $t = 0,9$ мм; $S_{\phi} = 4,72$ мм / об; $n_{\phi} = 0,5$ сек-1; $V_{рез.} = 32$ м / хв.

Машинне час чистової обробки одного вінця становить 24 години, що в 1,8 рази менше, ніж при обробці швидкорізальною фрезою (рис. 6.7).

На рис. 6.8 показані стружки, зрізані при чистової обробки зубів швидкорізальною фрезою без застосування чорнової прорезки фрезою з «протуберанцем». Як видно, більшість зубів чистової фрези зрізає коробчаті стружки, тобто має місце обмежений процес різання. При цьому периметр стружок приблизно дорівнює половині периметра зуба колеса, що при модулі зубів $m = 20$ мм становить 45-48 мм. Вершини окремих зубів фрези зрізають з дна западин (рис.6.8, край ний ряд праворуч) потовщені стружки, що підвищує радіальні сили різання і призводить до вібрацій і віджимання інструменту, підвищує знос зубів (Рис. 6.9).

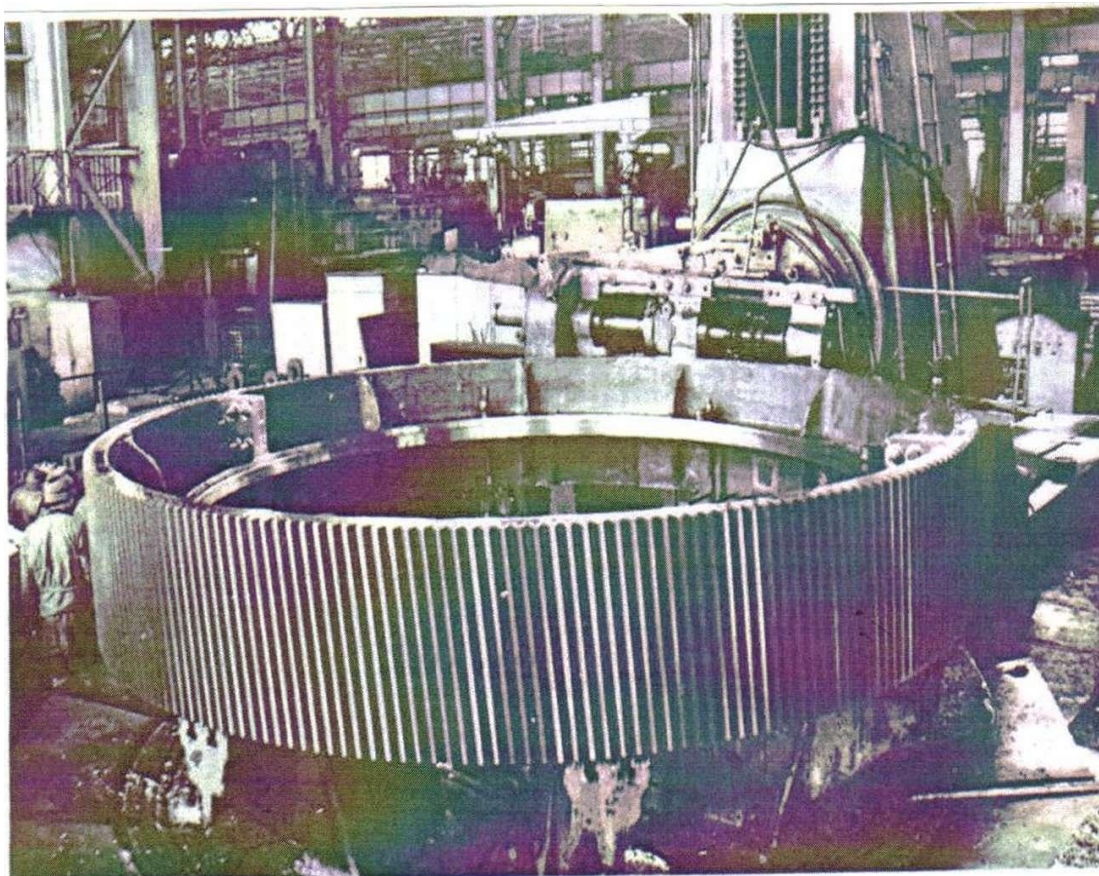


Рисунок 6.6 - чистове нарізування зубів вінця $m = 20$ мм; $Z_k = 268$; $\beta_3 = 5^\circ 15'$; $b = 700$ мм; 140 ... 160 НВ на верстаті мод. ННА-750 (Японія)

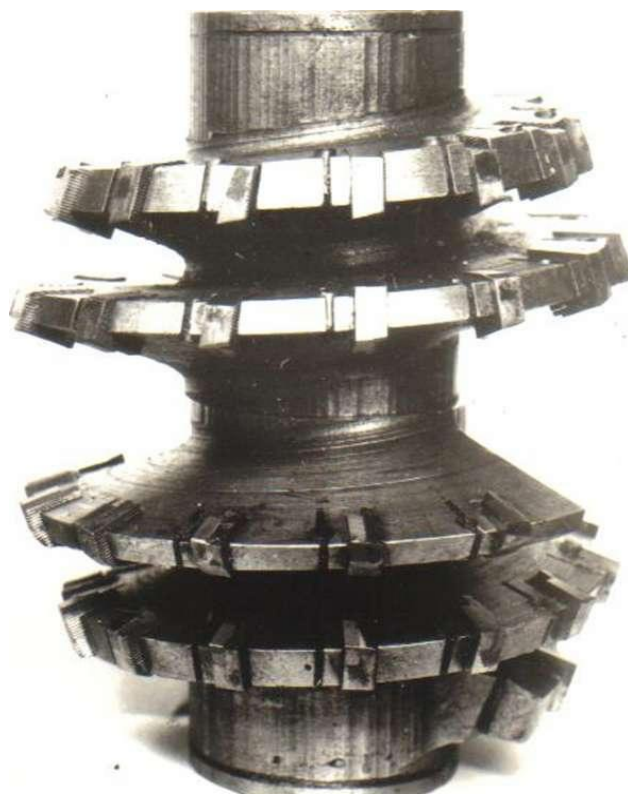


Рисунок 6.7 - Чистова черв'ячна твердосплавна фреза $m = 20$ мм

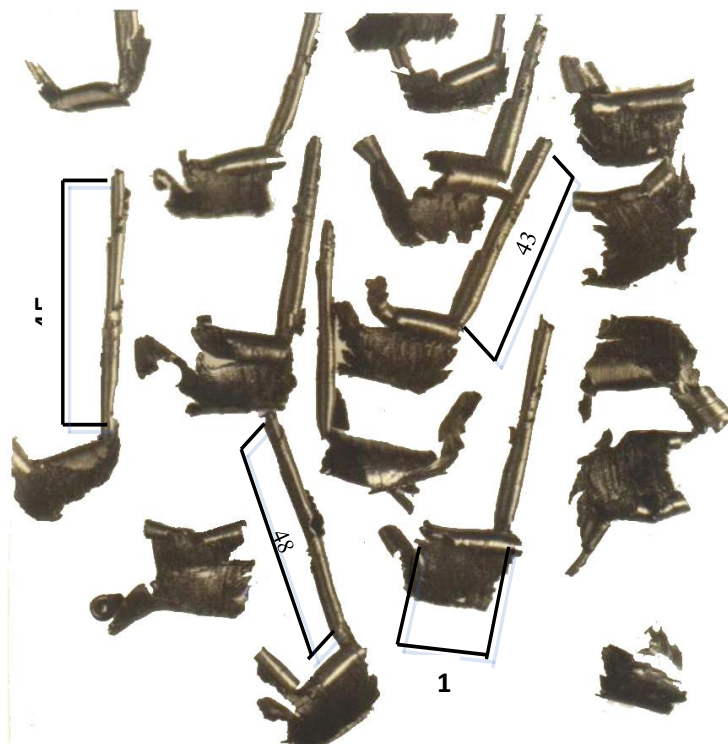


Рисунок 6.8 - Стружки зрізані чистовою фрезою $m = 20$ мм без прорізки зубів фрезою з «протуберанцем»

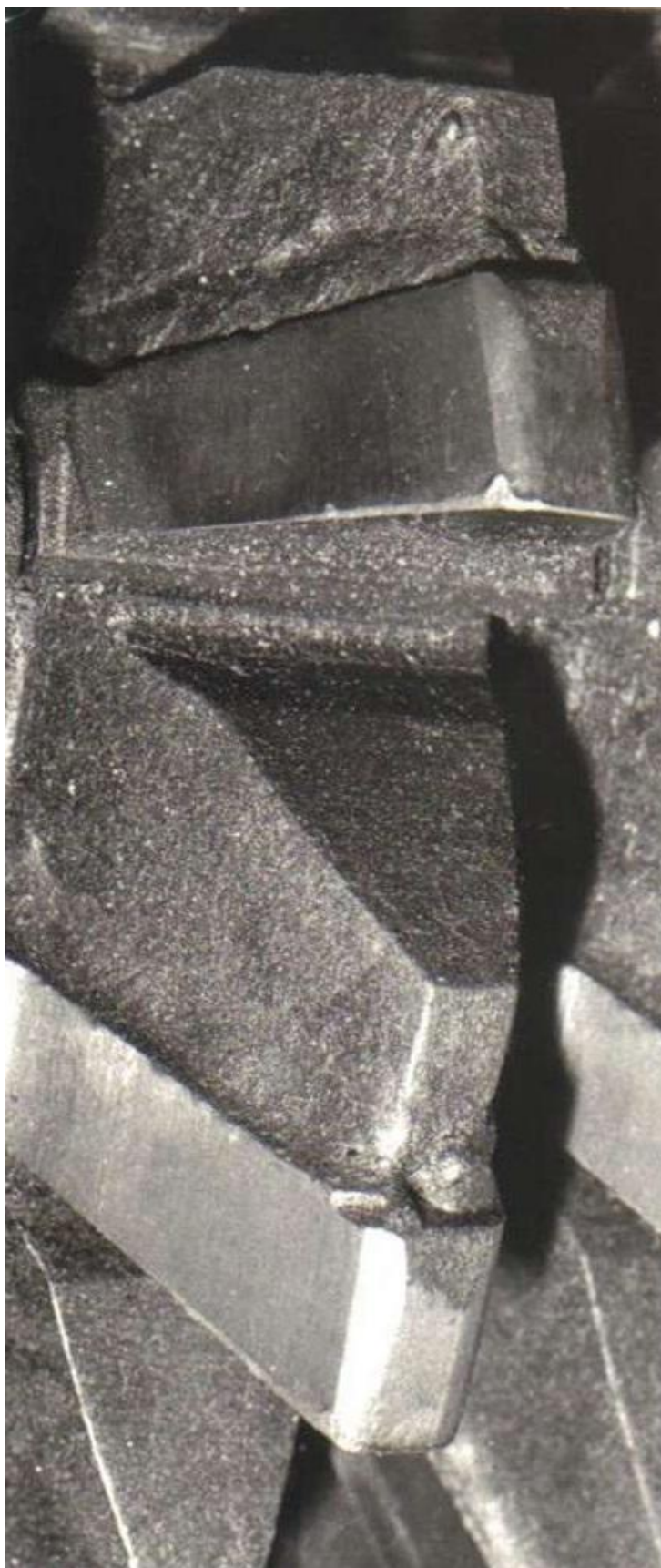


Рисунок 6.9 - Підвищений знос зубів чистової швидкорізальної фрези збірно-звареної конструкції

На рис. 6.10 показані стружки, зрізані чистовою твердосплавних фрезою (рис. 6.7). Як видно, коробчаті стружки відсутні, а довжина стружок не перевищує 10-16 мм при довжині ріжучої кромки зуба фрези 20 мм. У розроблених конструкцій фрез довжина ріжучої крайки зубів не перевищує 20 мм і однакова в діапазоні модулів $m = 12-65$ мм. При цьому число зубів фрези в 1,5-2 рази більше, ніж у фрез інших конструкцій.

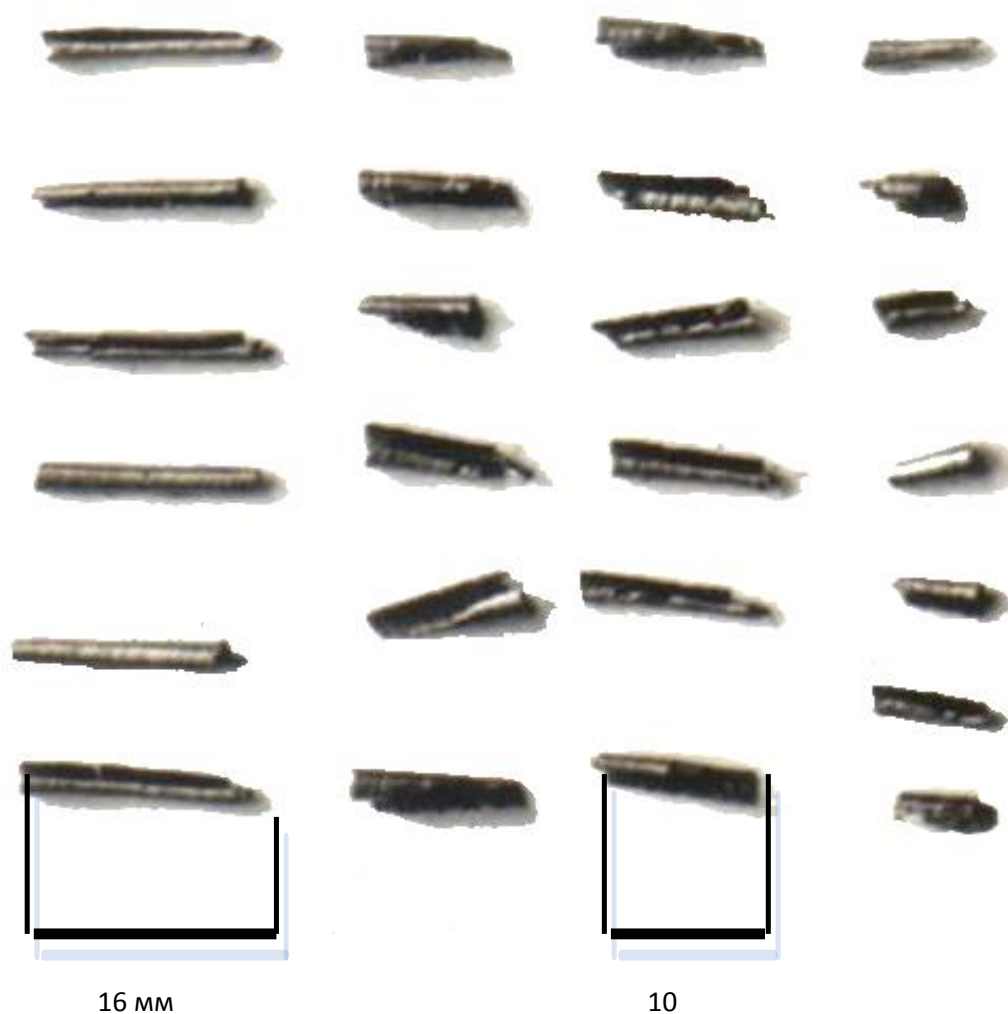


Рисунок 6.10 - Стружки, зрізані чистовою твердосплавною фрезою $m = 20$ мм

Стружки (рис. 6.10) компактно скручені, а тильна їх сторона блискуча, що говорить про вільному процесі різання, незначних зусиллях і деформаціях в системі ВПД.

З метою подальшого вдосконалення інструменту розроблені черв'ячні твердосплавні фрези (Рис. 6.11) $m = 12 - 65$ мм, оснащені твердосплавними неперетачуємою поворотними пластинками зі сплаву ВК 10-ХОМ.

Розрахунок і проектування черв'ячних твердосплавних фрез, оснащених неперетачуємою поворотними пластинками, здійснюється моделюванням з отриманням твердотільної моделі в програмі SOLID WORKS. Далі проводиться розробка керуючої програми для обробки пазів під тангенціально розташовані пластинки на верстаті з ЧПУ фірми «Ferrari» (Італія). Машинне час фрезерування пазів одного корпусу фрези становить $T_{\text{маи}} = 16-20$ н.годин.

Подальша інтенсифікація чистової зубообробки зношених і відновлених великогабаритних зубчастих вінців можлива за рахунок підвищення західності черв'ячних фрез.

У практиці зубообробки крупномодульних багатозахідних черв'ячних фрез ($m > 12$) стандартного виконання не набули поширення через складність їхнього виготовлення, порівняльного малого числа ріжучих зубів і ін. (рис.6.12).



Рисунок 6.11 - Правий корпус спеціальної твердосплавної фрези $m = 20$ мм, оснащеної твердосплавними неперетачуємою поворотними пластинками зі сплаву ВК 10-ХОМ

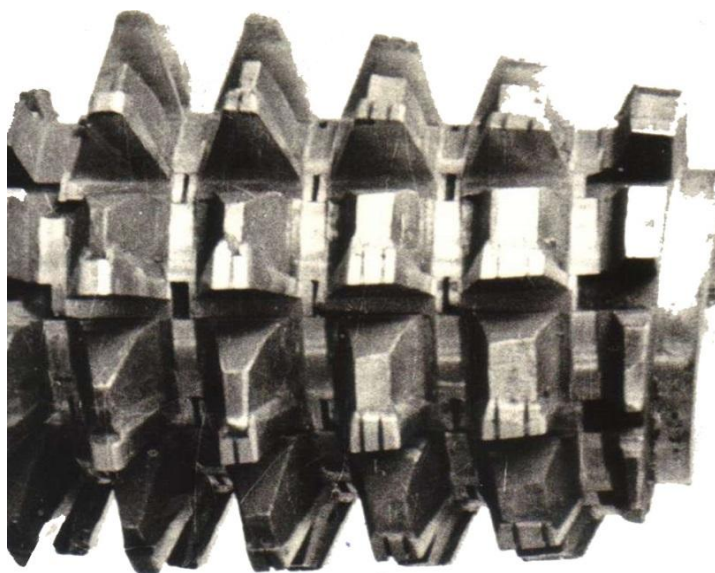


Рисунок 6.12 - Черв'ячна чорнова фреза $m = 28$ мм «Прогрес» з «протуберанцем» і стружкоделітельніми канавками на зубах і забірного конуса

Розроблені дві конструкції фрез: спеціальна двокорпусна і універсальна однокорпусна [181, 243, 273]. Відмінною особливістю двукорпусної спеціальної фрези, є зміщення (Рис. 6.13), перших заходів А щодо почав друге заходів Б на кут $Q = 180^\circ$. Кут профілю зубів такої фрези залежить від числа зубів оброблюваного колеса ($\alpha_n = 5^\circ 19' 30''$), а діапазони вживаності її визначаються так само, як і для однозахідних спеціальних фрез [273].

Перший візит фрези 1 (рис. 6.13) обробляє праву бокову поверхню зубів колеса уздовж активної ділянки ВЕ верстатної лінії зачеплення ВЕ, а другий захід 2 - обробляє ліву бічну поверхню зубів на ділянці В'Е'. Кут конуса гвинтової нарізки заходів дорівнює верстатного кутку зачеплення пари "інструмент - деталь", в даному випадку $\alpha_n = 200$. З рис. 6.13, видно, що обробка нижніх граничних точок В і В1 евольвентних поверхонь зубів відбувається в момент, коли зуб колеса, розташований на міжосьовій перпендикулярі, відхилений вліво або вправо на кут β_k .

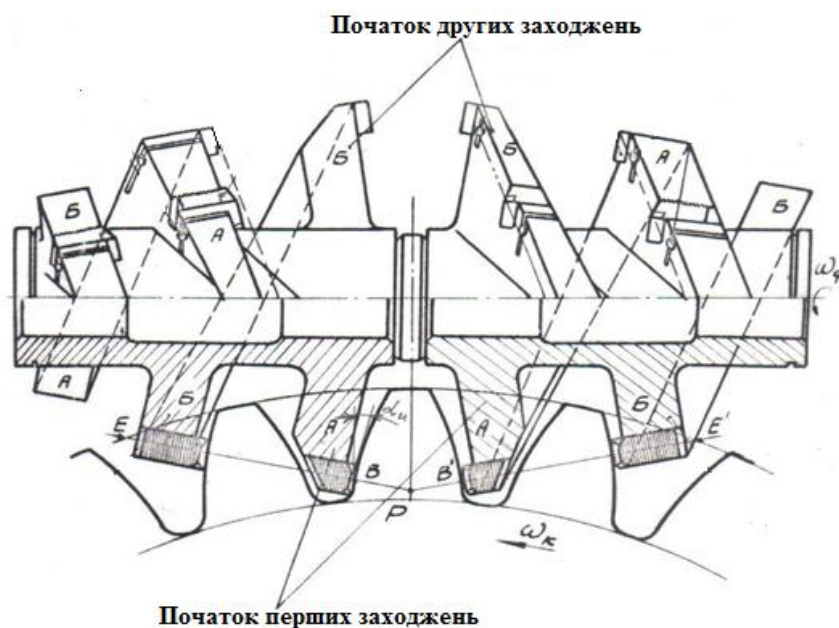


Рисунок 6.13 - Принципова конструкція двухкорпусной двухзаходной спеціальної фрези ($\alpha u = 5^\circ - 19^\circ 30'$)

Відповідно, виходячи з кінематики зачеплення інструменту і деталі, почала заходів фрези (рис. 6.13) повинні бути зміщені на кут θ_3 .

Визначимо кути β_k і θ_3 :

$$\beta_k = \sigma_B - (\gamma_2 - \mu_y) = \sigma_B - \left(\frac{360^\circ}{z_k} - \mu_y \right), \quad (6.1)$$

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

$$\mu_y = \arcsin \frac{l_y}{r_g}, \quad (6.2)$$

де r_g - радіус основного кола зубів колеса.

Виходячи з кінематики верстатного зачеплення двухзаходной фрези кут θ_3 определяется по залежності:

$$\theta_3 = \beta_k z_k = \left(\sigma_B - \frac{360^\circ}{z_k} + \mu_k \right) z_k. \quad (6.3)$$

Як і кути σ_v , γ_2 , μ_k , кут θ_3 завісіть тільки від числа зубів Z_k оброблюваного колеса. Межі зміни кутів в діапазоні чисел зубів $Z_k = 30-200$ представлені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1 - Зміни кута зсуву заходів θ_3

Z_k	30	60	100	150	200
θ_3	$104^039'$	$103^039'$	$103^025'$	$103^019'$	$103^014'$

Як видно з табл. 6.1, зі збільшенням числа зубів колеса z_k кут θ_3 зменшується. Зміни кута θ_3 в діапазоні $z_k = 30-200$ незначно і становить всього $1025'$. Тому досить виготовити фрезу з кутом зсуву заходів $\theta_3=104^039'$ і можна обробити нею колеса всього діапазону чисел зубів.

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

$$h_\epsilon = 2r_k \cos\left(\beta - \frac{\gamma_\epsilon}{2}\right) \sin \frac{\gamma_\epsilon}{z_k} - r_\phi \sin \gamma_\epsilon \sin \beta_y, \quad (6.4)$$

де r_k - радіус обертання точки зуба колеса, поєднаної з відповідною точкою на зубі фрези; r_ϕ - радіус обертання даної точки на зубі фрези; β - центральний кут, відповідний відстані від верстатної осі до розглянутих точок сполученої пари інструмент - деталь; γ - розглянутий кут формування хвилі; β_y - кут установки фрези в супорті верстата в робочому положенні.

Розрахуємо по (6.4) величину хвилястості в разі обробки колеса однозахідна черв'ячної фрезою при стандартній схемі різання і двухзахідна однокорпусною фрезою, основні конструктивні параметри яких дано в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 - Конструктивні параметри черв'ячних фрез

Найменування параметрів фрези	Значення параметрів	
	однозахідна стандартна (СТП 48-15-70)	двухзахідна однокорпусна
Зовнішній діаметр D , мм	295	295
Число зубів на довжині одного витка нарізки z_{ϕ}	10	18
Кут профілю зубів α_u	20^0	20^0
Кут підйому витка τ	$4^046'$	$9^028'40''$
Радіус обертання зуба фрези, формує хвилястість у вершини зуба колеса r_{ϕ} , мм	104,24	103,19

Розрахунки проведені за умови однакової подачі $S = 4$ мм / об інструментів і при обробці прямозубих зубчастих коліс з модулем $m = 20$ мм і числами зубів $z_k = 40$ і $z_k = 200$. Розрахункові значення величини хвилястості отримані у вершин зубів колеса, тобто в місцях, де вона має найбільшу величину. Результати розрахунків представлені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 - Розрахункові значення висоти хвилястості h_b

Конструкція фрези	h_b , мкм	
	$Z_k=40$	$Z_k=200$
Однозахідна стандартна	35	27
Двухзахідна однокорпусна	70	58

З даних табл. 6.3 видно, що двухзахідна фреза утворює на обробленій поверхні хвилястість, в два рази більшу, ніж стандартна однозахідна фреза. Це пояснюється більшою кривизною траєкторії руху її зубів в процесі обробки. За своєю величиною хвилястість не перевищує допуск на профіль зубів коліс по 8-9 ступенів точності по ГОСТ 1643-81, що цілком прийнятно для попередньої їх обробки під подальше зубошліфування або інші види чистової обробки.

Застосування при чистовому зубофрезерованні черв'ячних твердосплавних фрез дозволяє підвищити продуктивність обробки в 2 - 3 рази в порівнянні з швидкорізальними фрезами інших конструкцій і отримати необхідну якість і точність виготовлення зношених і відновлених великогабаритних зубчастих вінців.

Розроблено та впроваджено оптимізацію відновлення великогабаритних зубчастих вінців підвищеної точності із застосуванням конструкції спеціальних і універсальних одне - і двухзаходних твердосплавних фрез як з переточувати ріжучими елементами, так і з непереточуваними поворотними пластинками.

6.2 Ремонт і відновлення крупномодульних загартованих зубчастих коліс методом високошвидкісної лезвийної обробки

Процес ремонту і відновлення великогабаритних зубчастих коліс приводів крокуючих екскаваторів, рудорозмельних млинів, кульових млинів для помелу вугілля є актуальним напрямком через відносно малого терміну служби коліс, які працюють в агресивно абразивному середовищі, і, при цьому, високою собівартістю і трудомісткістю їхнього виготовлення. Теоретично при значному числі зубів (200 ... 400), модулем від 12 до 65 мм зношені зуби коліс можна відновити за допомогою кутової корекції, але з виготовленням нової провідної шестерні при постійному міжцентровій відстані.

При реверсивній роботі великогабаритного зубчастого колеса зуб зношується по лівому і правому профілю, зміщення інструменту при відновленні для модуля $m = 28$ мм може становити $h = 30$ мм, що є неприпустимим зменшить перетин і міцність основи зуба і зовнішній діаметр зубчастого вінця. Ремонт і відновлення зубів наплавленням під шаром флюсу збільшує час наплавлення через малу довжину наплавляються валиків і необхідності після нанесення кожного валика ретельно виконувати зачистку

западини зубів від шлаку [273]. І при сучасних інноваційних х ремонту і відновлення зубів коліс, наплавку веде з підкладкою в 2-4 шари, в залежності від матеріалу зубчастого колеса і необхідних параметрів твердості поверхневого шару зубів коліс.

Застосування електрошлакового наплавлення зубів з використанням плавиться мундштука для великогабаритних коліс викликає деформації зубів [273]. При наплавленні зношених зубів в середовищі вуглекислого газу з подальшою механічною обробкою вінцових коліс виготовляються з литої середньовуглецеву сталь з утримання вуглецю (0,4 ... 0,5)% через швидке термічного нагріву і охолодження можлива поява гартівних структур з високою твердістю і низькою пластичністю . При накладенні наступних валиків температура нагріву цієї зони не вище критичної, тому перекристалізації не відбувається, а ефект відпустки проявляється слабо.

Для попереднього і остаточного проходу зубообробки коліс великого модуля ($m = 12-65$ мм) запропонований метод переривчастого обкату з використанням дискових немодульних фрез (розміри фрези не залежить від модуля оброблюваних зубів), оснащених керамічними пластинками і спеціальними фрезерні супорти [273].

Метод переривчастого обкату використовується на зубостругальних і зубошліфувальних верстатах і має ту перевагу, що в момент робочого ходу інструменту заготівля або нерухома, або робить незначний поворот, тобто обробка протікає в порівнянні з методом обкатки, в більш жорстких умовах.

Крім того, при цьому методі частота обертання інструменту не пов'язана кінематично частотою обертання заготовки, що дозволяє використовувати в якості ріжучих матеріалів кераміку і надтверді матеріали, тобто збільшити швидкість різання в 3-4 рази (до 5-8 м / сек) і забезпечити підвищення продуктивності обробки при високій якості обробленої поверхні зубів. Обробка проходить при збільшеному в порівнянні з черв'ячною фрезою, кількістю разів, профілюючих евольвентної поверхню зубів, що формує високу їх точність і низьку шорсткість.

Для реалізації нової високошвидкісної зубообробки були прийняті два напрямки. Перше полягало в розробці нескладних за конструкцією спеціальних фрезерних супортів, що встановлюються на зубостругальних верстатах фірми «МААГ» (Швейцарія). Друге враховувало вкрай мале число заводів, що мають верстати фірми «МААГ», і тому передбачало спільно з ВАТ «КЗТС» (м. Коломна) розробку, виготовлення і впровадження на заводах галузі спеціальних фрезерних супортів до широко поширеним вертикально-зубофрезерні верстати [180, 184, 244].

Для обох напрямків була обрана найбільш проста по реалізації схема різання, представлена на рис. 6.14.

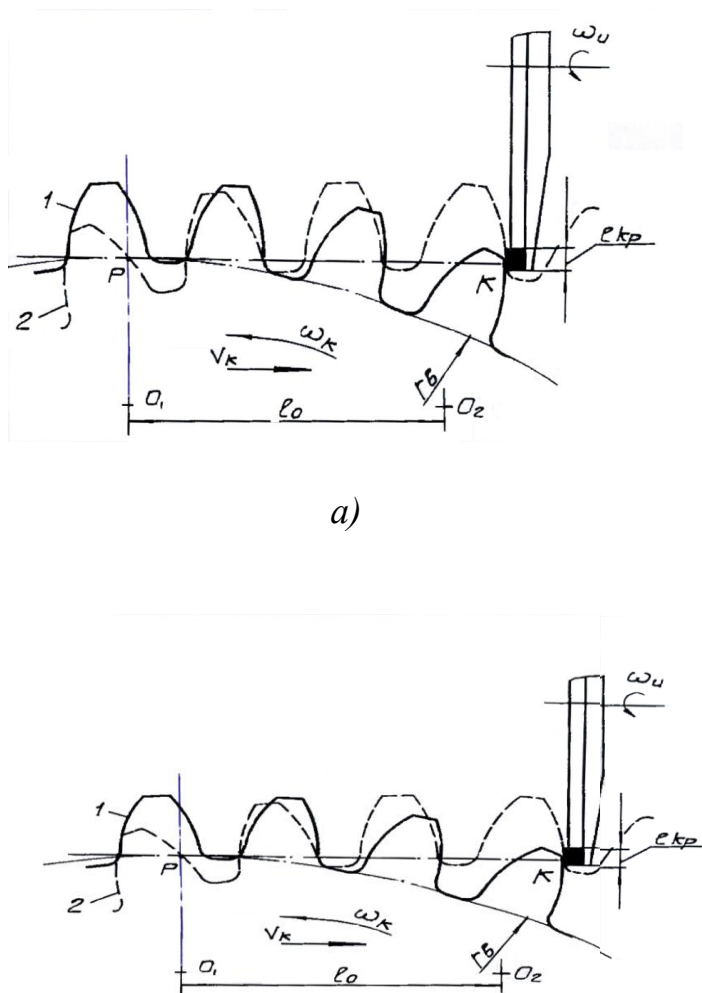


Рисунок 6.14 - Схема різання для спеціальних супортів

а) - початкове положення колеса; б) - кінцеве положення колеса після обробки одного профілю зубів

Згідно зі схемою, як верстатної лінії зачеплення пари інструмент-деталь використовується нормаль до евольвент РК, розташована горизонтально. Профільний кут зубів інструменту - дискової фрези, близький до $\alpha_i = 0^\circ$. Фреза в початковий момент обробки розташована зі зміщенням щодо осі колеса на відстані l_0 , який визначається по залежності

$$l_0 = r_b \cdot X \operatorname{tg} \alpha_a, \quad (6.5)$$

де r_b - радіус основного кола зубів колеса; α_a - кут профілю евольвенти на вершині зуба.

Обробка правої і лівої бічних поверхонь зубів колеса здійснюється окремо, обробка ведеться за два підходу.

Обрана схема дозволяє оснастити дискові фрези 4-х-гранями керамічними пластинками з розмірами $12,7 \times 12,7$ мм або елементами з надтвердих матеріалів. Інструмент при цьому не вимагає заточування, зручний в експлуатації та ремонті. Так як обробка евольвентних поверхонь зубів проводиться практично одними і тими ж ділянками пластин, то це підвищує точність обробки профілю зубів.

На рис. 6.15 показана робоча конструкція спеціального супорта, що встановлюється на зубостругальних верстатах [146, 193, 243]. Супорт складається з електродвигуна 1; клинопасової передачі 2, шпинделя 3, дискової фрези 4, опорної плити 5. Фрезерний супорт встановлюється на повзунові верстата замість супорта, що несе зубостругальний гребінку. Залежно від того, яку сторону зубів необхідно обробити, на супорті встановлюють фрезу ліворіжуча або праворіжуча.

В процесі обробки дискова фреза здійснює зворотно-поступальний рух вгору-вниз, аналогічно руху зубостругальний гребінки.

Після обробки однієї бічної поверхні всіх зубів колеса на супорті змінюється, наприклад, ліворіжуча фреза на праворіжуча, змінюється напрямок обертання і хід колеса на зворотні і проводиться обробка іншої бічної поверхні зубів.

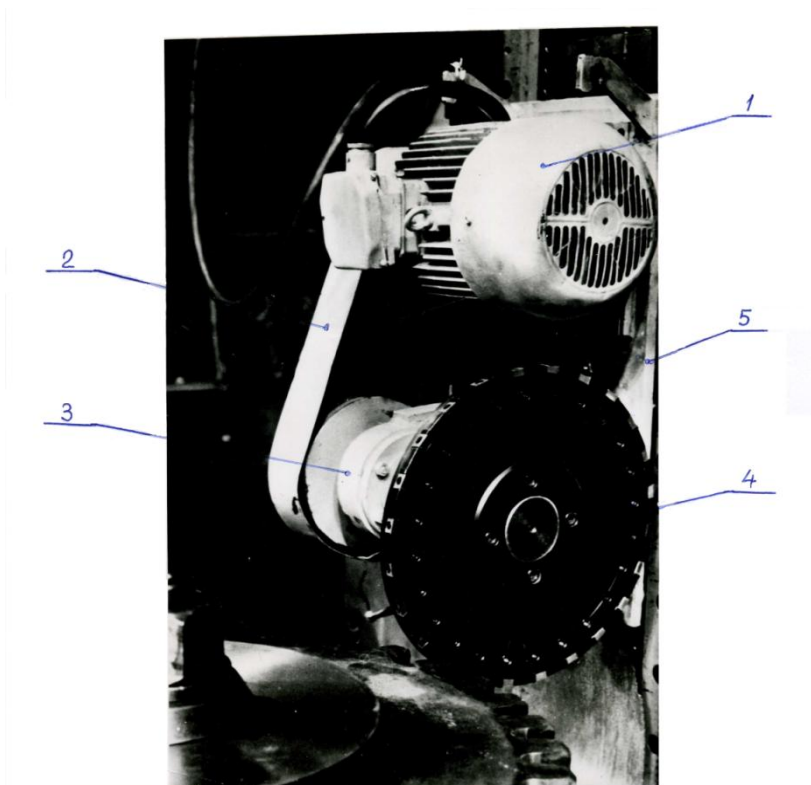


Рисунок 6.15 – Робоча конструкція спец супорта до зубостогального верстата фірми «МАОГ»

Первинне впровадження ремонту і відновлення зубатих коліс при чистової обробки загартованих коліс з використанням зубостругальний верстата вироблялося в виробничих умовах при обробці коліс псевдопланетарного редуктора з наступними характеристиками: $m=28$ мм; $z_1=1$; $z_2=24$; $z_3=32$; $b=400$; $\beta_0=0^\circ$; сталь 34ХМЮА; HRC 48...54.

Зубообробка проводилася на зубостругальному верстаті (рис. 6.2) фірми «МАОГ» (Швейцарія) моделі HS-450/500.

Відповідно до технічних вимог точність коліс повинна була відповідати за нормами кінематичної точності, плавності і контакту - 8-го ступеня. Разом з тим, у зв'язку з високими вимогами по згинальній і контактній міцності, шліфування зубів, з метою виключення пріжогов і мікротріщин, не допускалася.

Режими різання при обробці коліс використовувалися наступні.

Чернової прохід: глибина різання - 0,4-0,6 мм; число подвійних ходів інструменту за один цикл обробки - 80; швидкість руху повзуна - 6 м / хв; частота обертання фрези – 250хв^{-1} ; швидкість різання - 320 м / хв.

Чистої прихід: глибина різання - 0,3 мм; число подвійних ходів інструменту за цикл обробки - 80; швидкість руху повзуна - 6 м / хв; частота обертання фрези – 250хв^{-1} ; швидкість різання - 320 м / хв.

Обробка велася без застосування змазує-охолоджуючих рідин. Напрямок фрезерування зустрічний.

Процес обробки протікав плавно, без вібрацій інструменту, супорта і заготовки. Машинне час обробки склало 8 годин. Максимальний знос пластин після чистового проходу не перевищував 0,2-0,3 мм.

Контроль параметрів точності обробки коліс проводився з використанням таких приладів: універсальна вимірювальна машина мод. PSFU -1600 фірми «Клінгельберг» (ФРН), накладної прилад для вимірювання шорсткості поверхні фірми «Суртронік» (Англія). Результати вимірювань представлені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Точність обробки колес

Вимірювальний параметр	Відхилення параметра, мкм	Степінь точності за ГОСТ 1643-81
Окружний крок зубців	9-12	5
Крок зачеплення	27-32	7
Профіль зуба	22-29	7
Напрямок зубців	30-34	7
Шорсткість зубців	0,6-0,8	7

На рис. 6.16 показаний загальний вигляд загартованого зубчастого колеса $m = 28$ мм, $z_1 = 24$, обробленого за новою технологією.

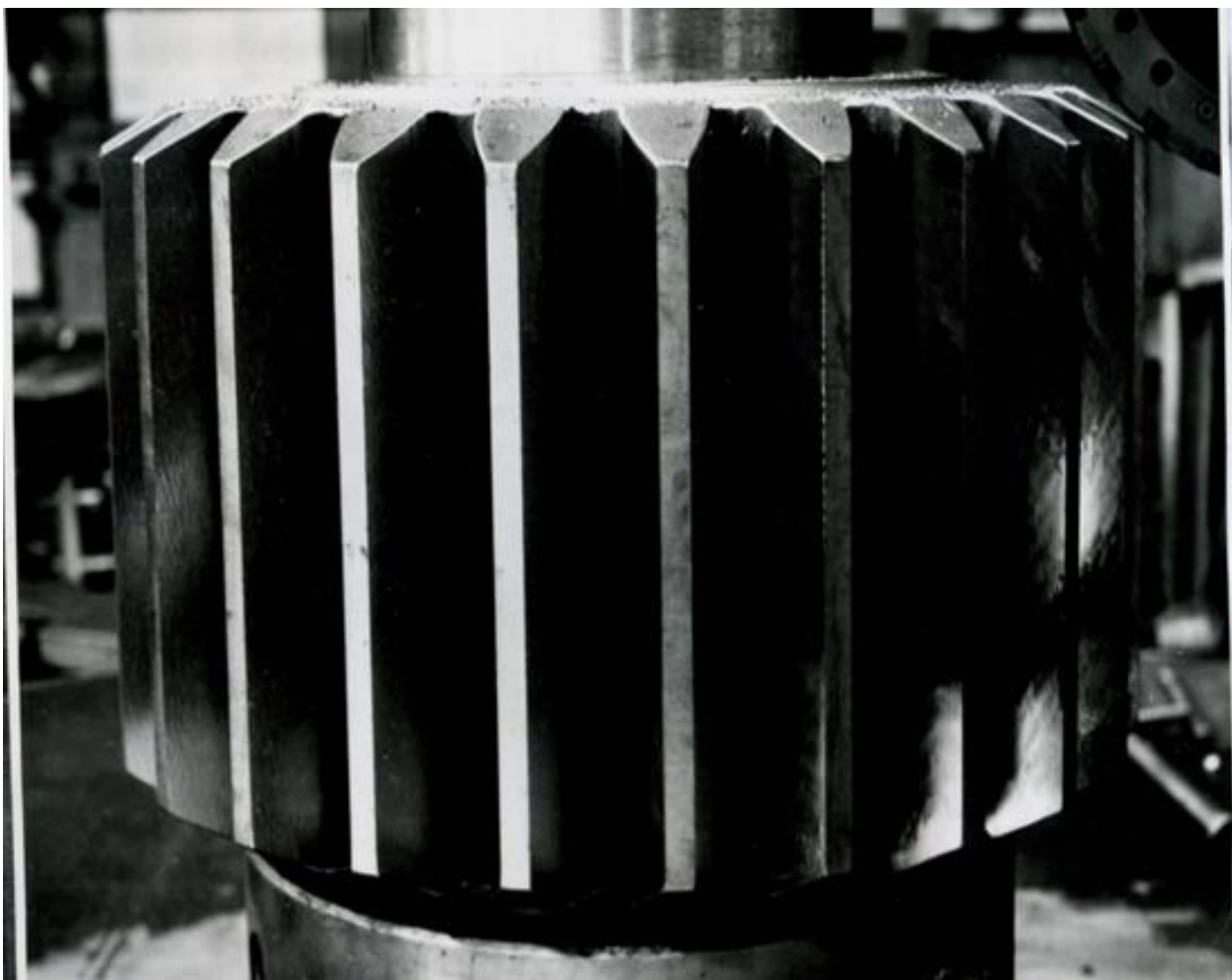


Рисунок 6.16 - Зубчате колесо $m = 28$ мм, $z_1 = 24$, оброблене за новою лезвійною обробкою після наплавлення зубів

Для дослідження якості поверхневого шару з зубів оброблених коліс були вирізані зразки. Нетравлений зразки зубів поміщали в металографічний мікроскоп «Neophot-21» (Англія). В результаті візуальних спостережень на оброблених поверхнях прижоги не були виявлені. Мікротріщини і інші дефекти виявлені не були. Травлення зразків зубів, а також шлифов проводилося в 4% розчині азотної кислоти в етиловому спирті.

На трусних зразках прижоги і мікротріщини виявлені не були [184, 244].

Металографічні дослідження зразків (шлифов) дозволили зробити наступні висновки: структура зразків ферритно-перлитная.

Поверхнева мікротвердість вимірювалась на приладі «ПМТ-3» при навантаженні 20 гс інтервалом по глибині 0,02.

Вимірювання мікротвердості показав наявність наклепаного шару глибиною 0,04 ($H_{0,196} = 2260-2340 \text{ Н / мм}^2$). Результати вимірів наведені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Мікротвердість образцов зубьев

Глибина заміру , мм	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
Мікротвердість, МПа	2260	2340	2040	2040	2040	1950	1950

Наявність наклепу свідчить про присутність в поверхневому шарі залишкових напружень стиску.

У порівнянні з процесом зубошліфування, при якому в поверхневому шарі деталі створюються розтягують напруги, лезова обробка, як бачимо, більш сприятлива. Стискають напруги підвищують зносостійкість деталей, контрактну і згинальну міцність зубчастих передач.

Промислове впровадження процесу нової лезвийної обробки загартованих коліс після наплавлення з використанням зубостругальних верстатів (Рис. 6.17), було також проведено для вінців діаметром до 8м.

Обробка зубів відбувається при узгоджених рухах обертання столу із заготівлею і тангенціального переміщення каретки з інструментом.

Супорт призначався, в першу чергу, для чистової обробки відновлених загартованих коліс і приводних шестерень рудо і вуглерозмельних млинів замість зубошліфування і з метою виключення кооперації виробництва або придбання імпортного дорогого зубошліфувальні обладнання.

Відповідно до прийнятої схеми різання (рис. 6.1) для обробки правої або лівої бічних поверхонь зубів-встановлюють і закріплюють у спеціальному супорті, відповідно, праву або ліву фрезу.

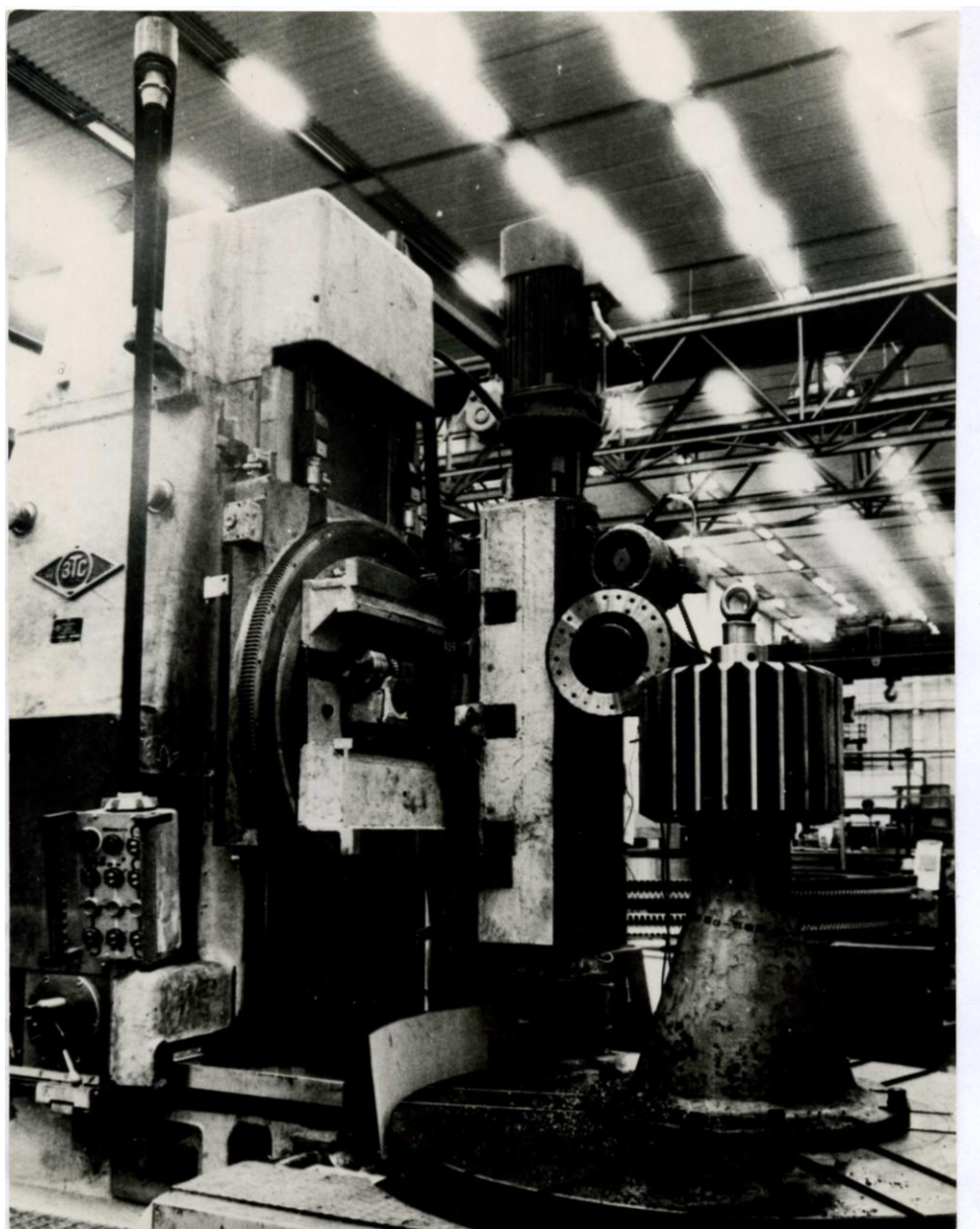


Рисунок 6.17 – Обробка загартованого колеса $m=20$ мм, $z=29$ з використанням спеціального супорта для вертикально-фрузерувального верстата мод. 5А342П

Дискові фрези одностороннього і двостороннього різання були оснащені 4-х гранями поворотними пластинами розміром 12,7x12,7 мм, з кераміки марки ВОК-71.

Оброблялися загартовані зубчасті колеса з наступною характеристикою: $m = 20\text{мм}$ $z_k = 29$; $b = 420\text{ мм}$, $\beta_0 = 5^\circ 38'$; сталь 45; HRC 50 ... 55.

Чистове зубонарізування здійснювалося зустрічним і попутним фрезеруванням на кожен подвійний хід інструмента без зміни охолодження.

Режими різання наступні:

- глибина резанія- 0,25-0,35 мм;
- число подвійних ходів інструменту за один цикл обробки -80 дв.х .;
- швидкість руху повзуна-6 м / хв;
- частота обертання фрези-250 хв-1;
- швидкість переміщення інструментальної каретки 8м / хв.

Машинне час обробки колеса склало бчасов, що в 6-7 разів менше, ніж у випадку застосування зубошліфування. По різниці сусідніх окружних кроків зубів і кроку зачеплення колесо відповідно 7-го ступеня точності по ГОСТ 1643-81. Шорсткість оброблених поверхонь зубів перебувала в межах Ra 2,5-1,25 мкм. Встановлено, що новий технологічний процес чистової зубообработки по точності і якстю не поступається Зубошліфування, але в 3-4 разів більш продуктивний і виключає придбання за імпортом важких зубошліфувальних верстатів.

Для скорочення допоміжного часу зубообработки за рахунок усунення переустановлень дискових фрез на спецуппорте розроблена дискова фреза двостороннього різання (рис. 6.18), що дозволяє вести обробку обох бічних поверхонь зубів колеса [193].

Відмінною особливістю фрези двостороннього різання є наявність другого ряду ріжучих пластин, зміщених щодо першого ряду на половину окружного кроку. В процесі обробки спочатку одним рядом пластин обробляють одну з бічних поверхонь зубів колеса, наприклад, праву, а потім, після реверсу колеса і напрямки тангенціального переміщення каретки з інструментом, обробляють другу - ліву бічну поверхню.

Така конструкція дискової фрези дозволяє скоротити номенклатуру зуборізних інструментів і економити допоміжний час на переустановку інструменту [244, 273].

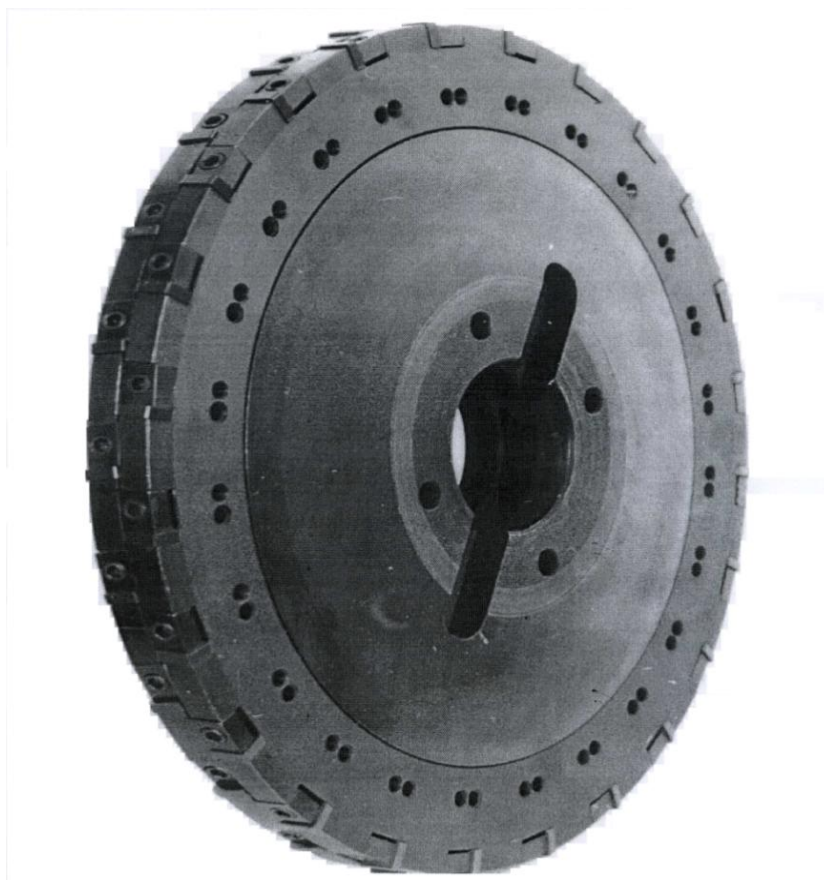


Рисунок 6.18 - Дискова фреза двостороннього різання $m = 20-36$ мм

Впровадження нової технології зубообробки ремонтних і відновлених великогабаритних зубчастих коліс дозволяє в 3-4 рази знизити трудомісткість чистової операції, а також виключає необхідність придбання за імпортом дорогих і малопродуктивних зубошліфувальних верстатів. При цьому якість поверхні зубів вище, ніж в разі зубошліфування, тому що виключаються такі дефекти, як прижоги, мікротріщини, а в поверхневому шарі утворюються сприятливі напруги стиснення.

Експлуатація ремонтних і відновлених великогабаритних зубчастих коліс показала, що термін служби коліс того ж порядку що і нових.

6.3 Поліпшення характеристик поверхневого шару зубів відновлених і зношених великогабаритних зубчастих коліс методом відновлення накатними роликами

У зв'язку з тим, що при зубофрезерування крупномодульних і великогабаритних ($\varnothing 4000 \dots 12500$ мм) коліс не вдається отримати шорсткість обробленої поверхні зубів $Rz < 20$ мкм на досить ефективних режимах різання; запропонований інструмент - черв'ячний накатник для обробно-зміцнюючої обробки зубів поверхнево-пластичним деформуванням.

Підвищений абразивний знос великих відкритих зубчастих передач зажадав проведення робіт по розробці методів поліпшення характеристик поверхневого шару зубів.

Для крупномодульних ($m = 20 \dots 36$ мм) і великогабаритних ($\varnothing 4000, \dots 12500$ мм) зубчастих вінців, використовуваних в вугле- і рудорозмельних млинах, екскаваторах і т. П., В якості фінішної обробки зубів після зубофрезерування доцільно застосувати поверхневе пластичне деформування (ППД).

З цією метою створені різні конструкції черв'ячних Накатників, які працюють методом «обкатки» і встановлюються на важких зубофрезерних верстатах аналогічно черв'ячним фрез.

На рис. 6.19 показаний загальний вигляд черв'ячного накатника [146, 244] і схема взаємодії накатного елемента інструменту з бічною поверхнею зуба оброблюваного колеса. Черв'ячний накатник (рис. 2.43, а) складається з лівого 1 і правого 2 корпусів, що мають гвинтові конічні виступи А і Б одного напрямку. Корпуси 1 і 2 встановлені на оправці 3 з можливістю зворотно-поступального переміщення уздовж шпонок 4 і 5. Накатні елементи 6, наприклад шарикопідшипники, осі обертання яких перпендикулярні конічній утворює гвинтових виступів А і Б, закріплені на периферійній частині виступів гвинтами 7 і захищені від можливого засмічення прокладками 8 і 9. на оправці 3 встановлені силові пружини 10 і 11 і

натискний диск 12. Необхідна відстань між корпусами забезпечується прокладкою 13. Обробка зубчастого колеса 14 виробляється на зубофрезерних станках після операції чистового зубонарізування наступним чином: перед обкаткою підтискають пружини 10 і 11, забезпечуючи необхідне зусилля накатування, при цьому корпусу 1 і 2 щільно притиснуті до прокладання 13, інструмент радіально вводять в зачеплення з колесом 14 до появи контакту накатних елементів 6 з зубами колеса 14, пружини 10 і 11 стискаються і між прокладкою 13 і корпусами 1 і 2 з'являється зазор, необхідний для зворотно-поступальних переміщень корпусів 1 і 2 по шпонки 4 і 5.

В процесі накатки (рис. 6.19, б) накатні елементи 6 послідовно, один за іншим, контактують з бічними поверхнями зубів колеса 14 по лініях зачеплення BE і B_1E_1 , забезпечуючи повну обробку евольвентного профілю з кожного боку зуба.

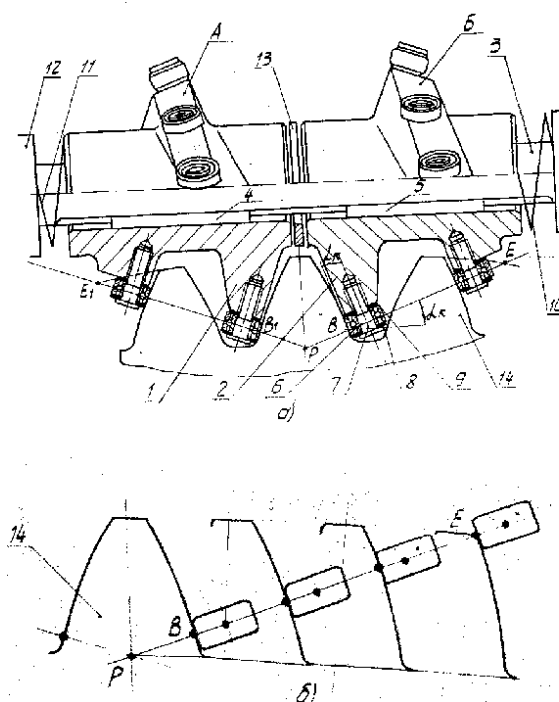


Рисунок 6.19 - Черв'ячний накатник для обробно-зміцнюючої обробки зубчастих коліс ППД

а - загальний вигляд інструменту; б - схема взаємодії накатного елемента з бічною поверхнею зуба колеса

Черв'ячний накатник може бути виконаний у вигляді двох циліндричних корпусів. Вони несуть накатні елементи у вигляді конічних роликів, розташованих по гвинтовій лінії (рис. 6.20) [273].

Така конструкція більш технологічна при виготовленні корпусів інструменту і дозволяє збільшити кількість накатних елементів - роликів [273]. Радіус кривизни евольвенти по висоті зуба не постійний і змінюється від максимального на вершині до мінімального біля основи.

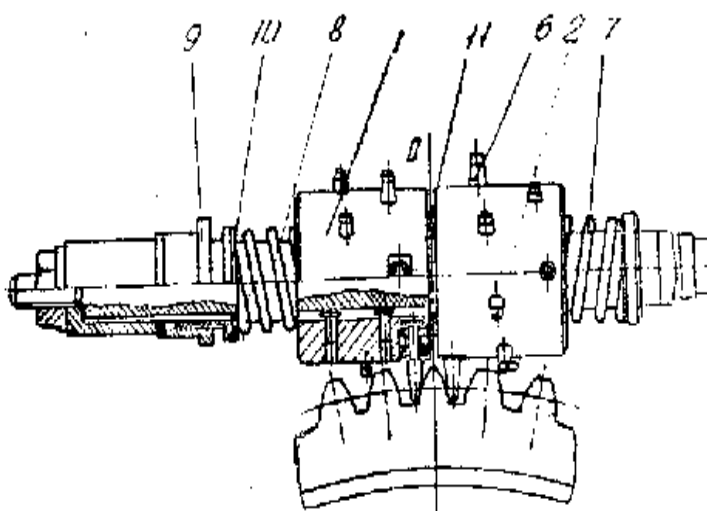


Рисунок 6.20 - Черв'ячний накатник з конічними накатними роликами

У разі обробки зубів накатними елементами постійної кривизни отримуємо неоднакові питомі контактні тиску по всьому профілю зубів, т. Е. Одні ділянки зуба отримують надлишкову деформацію, а інші - недостатню. З метою вирівнювання питомих контактних тисків запропонована конструкція черв'ячного накатника [194], у якого накатні елементи виконані з різними радіусами кривизни і встановлені вздовж гвинтових поверхонь так, що накатні елементи з великими значеннями радіусів розташовані на великих діаметрах конусних поверхонь корпусів, а радіуси кривизни елементів визначені за формулою

$$\frac{1}{\rho} = \left(\frac{\pi \sigma}{\Pi p} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{\eta}{(1,5p)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{\rho_0}, \quad (6.6)$$

де ρ - радіус кривизни робочих поверхонь накатних елементів;

σ - контактні тиску;

P - зусилля, що діє на накатну інструмент;

η - пружна постійна матеріалу ролика і колеса;

ρ_s - радіус кривизни евольвенти зуба в зоні контакту;

Pr - таблична функція, що залежить від співвідношення і.

Обробка таким накатником підвищує якість колеса за рахунок вирівнювання питомих контактних тисків по всьому профілю зубів і отримання однорідної поверхні.

У конструкціях черв'ячних Накатників профільний кут накатних елементів α_n залежить від числа зубів оброблюваного зубчастого колеса, т. Е. Інструмент має обмежену застосовність за кількістю оброблюваних зубів:

$$\alpha_H = \alpha_B - \sigma_B, \quad (6.7)$$

де α_B - кут тиску евольвенти крайньої нижньої точки; σ_B - половина кутовий товщини зуба колеса в крайній нижній точці евольвенти.

Діапазони використання таких накатників, а також конструктивні прийоми, що розширюють їх застосування, описані в роботі [243, 273] і аналогічні використанню спеціальних черв'ячних фрез.

Конструктивно черв'ячний накатник може бути виконаний і для обробки зубчастих коліс за універсальною схемою. У цьому випадку це буде універсальний інструмент, накатні елементи якого мають профільний кут = 20° , і він буде придатний для обробки коліс з будь-яким числом зубів [184]. Причому, для послідовної обробки правої і лівої бічних поверхонь зубів колеса достатнього одного корпусу черв'ячного накатника.

Промислове впровадження процесу зубообработки відновлення коліс методом обробки ППД здійснювалося верстаті мод. 5355С при обробці зубчастого вінця (рис. 6.21): $m = 20$ мм; $z = 244$; $\beta = 5^\circ 38' 02''$; $b = 500$ мм - зі сталі 35ХМЛ; твердість робочих поверхонь зубів НВ160 ... 220.



Рисунок 6.21 - Обробка ППД зубчастого вінця $m = 20$ мм; $z = 244$; $\beta = 5^{\circ}38'02''$; $b = 500$ мм

Зуби попередньо нарізалися на вертикальному зубофрезерні Верстаті мод. 5355С. Обробка черв'ячним накатником (рис. 6.22 і 6.23) велася при різних умовах і режимах з тим, щоб визначити оптимальні значення швидкості, подачі і зусилля обкатки з умов зниження шорсткості.

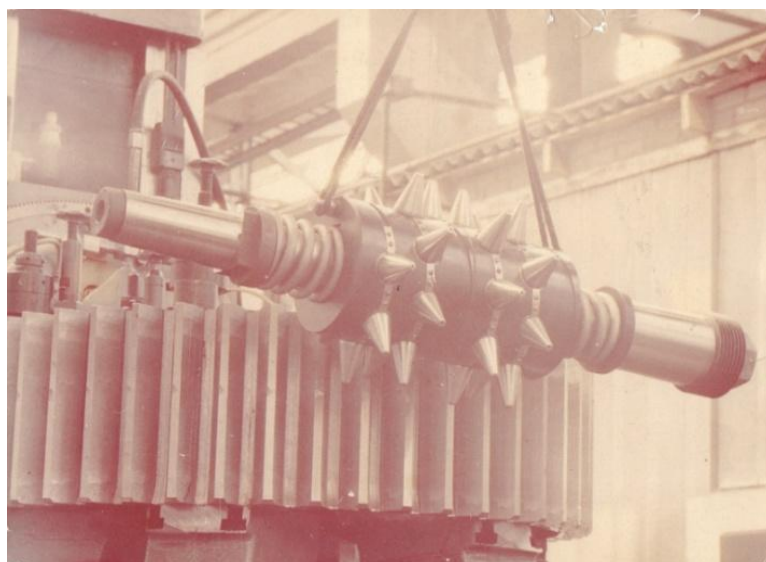


Рисунок 6.22 – Встановлення черв'ячного накатника, $m = 20$ мм, з конічними накатними роликками для накатки зубців циліндричного зубчастого колеса.

Характеристика випробувань наведена в табл. 6.6.

Таблиця 6.6 – Результати виробничих випробувань черв'ячних накатників

Номер досліду	Режим обробки			
	n , об/хв	V , м/хв	S , мм/об.ст.	P , Н
1	14	17,1	2,54	1 650
2	28	34,2	12	1 650
3	28	34,2	6	1 650
4	28	34,2	7,5	1 650
5	28	34,2	7,5	1 300
6	28	34,2	7,5	1 000
7	21	24	7,72	800

Споживана верстатом потужність, судячи зі свідчень амперметра, практично не відрізнялася від потужності, споживаної верстатом на холостому ході. Для зниження динамічних завантажень, що з'являються при вході роликів в зачеплення між корпусами накатника, було вставлено мірне кільце. Процес обкатки на всіх режимах відбувався плавно, без вібрацій і ударів. Як мастильно-охолоджувальної рідини використовувалося масло «Індустріальне-20» [134].

На першому етапі досліджень були призначені екстремальні значення режимів обкатки: $V = 17,1$ м / хв; $V = 34,2$ м / хв; $S = 2,54$ мм / об .; $S = 12$ мм / об. і зусилля $P = 1 650$ Н. Це дозволило прискорено визначити діапазон їх варіювання.

Візуальний аналіз якості поверхневого шару за показниками шорсткості, наявності слідів обробки, освіти завалів на торцевих і вершинних ділянках зубів показав, що в досвіді і шорсткість обкатаній поверхні різко знижувалася в порівнянні з шорсткістю зубів, отриманої в результаті чистого зубофрезерування. Спостерігалось утворення незначних напливів на вершинних ділянках зубів (в межах 0,3 ... 0,4 мм); були помітні відблиски від залишаються роликми слідів на оброблених поверхнях зубів.

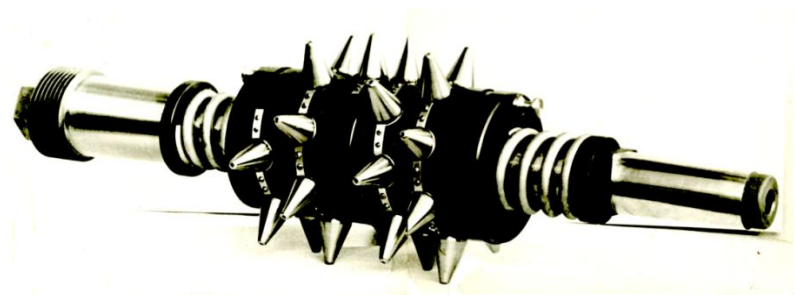


Рисунок 6.23 – Черв'ячний накатник, $m = 20$ мм, з конічними накатними роликами

Оптимальні режими обкатки в залежності від технічного стану важкого зубофрезерного верстата становлять: подача інструменту $S = 7 \dots 8$ 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.

6.4 Особливості підвищення якості відновлення крупномодульних зубчастих коліс спреерной загартуванням

Найважливішою проблемою важкого машинобудування на сучасному етапі є підвищення якості продукції, що випускається, в тому числі поверхневому загартуванню зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс (рис. 1).

Фактори, що впливають на глибину і ступеня зміцнення поверхневого шару в значній мірі залежить від багатьох чинників і в першу чергу від способів загартування [146, 183, 185].

Сучасні вимоги щодо збільшення твердості робочих поверхонь зубів зубчастих коліс є одним з найбільш ефективних і актуальних напрямків підвищення здатності навантаження і довговічності зубчастих передач і редукторів при одночасному зниженні їх розмірів [180, 181, 273].

В процесі роботи зубчастих коліс одночасно відбувається тертя кочення і тертя ковзання, що викликають знос і руйнування робочих поверхонь зубів. Це супроводжується порушенням правильності зачеплення,

зростанням шуму, падінням к.к.д., виникненням динамічного навантаження і т. д.

При сверхдопустімом спрацювання зубів зубчастих вінців ($m > 26$) і коліс барабанів ($m > 20$) не допускається залишати їх в механізмах. Величина зносу не повинна перевищувати нормативну більш ніж на $0,17m$.

Граничний знос зубів зубчастих коліс складає $(0,1 - 0,24)m$, де m - нормальний модуль. Для зубчастих коліс з загартованими зубами граничний знос складає $0,8$ товщини цементованого шару.

При викрашування робочої поверхні зуба і інших порушеннях профілю понад допустимі норми, колеса і шестерні підлягають заміні.

Разом з тим істотне підвищення твердості зубчастих коліс різко збільшує трудомісткість їх виготовлення: підвищуються вимоги до жорсткості зуборізного обладнання, стійкості інструменту, з'являється потреба в дорогих, але малопродуктивних зубошліфувальних верстатах. Якщо для зубчастих коліс дрібного і середнього модуля можна порівняно стійко отримати необхідні характеристики зачеплення шляхом хіміко-термічної обробки і зубошліфування, то для крупномодульних коліс ($m = 12 \div 65$ мм), особливо косозубих з кутом нахилу зубів понад $\beta_d = 250 \div 30^\circ$ і завдовжки зуба більш $b_k = 400 \div 1200$ мм, виконання операцій хіміко-термічної обробки і зубошліфування багаторазово ускладнюється і не завжди забезпечується досягнення поставлених цілей через значних термічних деформацій зубів ($0,8 \div 2,5$ мм) і високою (більше 200 станко-годин) трудомісткості операцій зубошліфування.

Виконання операції зубошліфування на зубах великого модуля в умовах знімання збільшеного припуску ($1,0 \div 2,5$ мм) призводить до появи таких дефектів поверхневого шару, як «прижоги» і мікротріщини, а в самому шарі з'являються напруження розтягу, що, в кінцевому рахунку, знижує здатність навантаження і довговічність важконавантажених циліндричних зубчастих передач.

Поряд з існуючими способами поверхневого гарту зубів розроблений

сучасний метод спреерной ьзакалки зубів зубчастих коліс. Ця відома давно, проте вважалось, що для загартування масивних деталей можна використовувати тільки ацетилен, і «завдяки» повсюдного витіснення ацетилену газами - заміниками на підприємствах попит на гартівні пальника поступово знижувався.

Запропоновано метод поверхневого гарту зубів великогабаритних коліс із застосуванням пальників, що працюють на природному газі, або пропан - бутанових сумішах. У порівнянні з ацетиленокислородними гартівними пальниками, завдяки спеціальній конструкції, ці пальники значно скорочують вартість робіт, спрощують процес гарту і підвищують його безпеку. Пальники при цьому більш продуктивні і більш економічні за рахунок більш низької ціни природного газу в порівнянні з ацетиленом. Особлива конструкція головки дозволяє вирівнювати температуру фронту полум'я по ширині гартує поверхні, а спеціальні сопла для подачі води на нагріту поверхню забезпечують отримання загартованої поверхні однорідної твердості.

Розроблено типорозмірний ряд гартівних пальників різного призначення, табл.6.7. Створено методику розрахунку пальників, що дозволяє швидко розробляти і виготовляти будь-яку горілку за вихідними даними замовника в найкоротші терміни.

Технічні дані деяких пальників приведені в табл. 6.7 Розшифровується назви пальника так: «ГЗУ» - гази, заміники ацетилену; «6» - група пальників для поверхневого гарту; «КМ» - великий модуль зубів; «20», «25», «50» - значення модуля.

Характеристика пальника, (графік залежності розрідження на вхідному газовому штуцері пальника від тиску підігріває кисню), для зуба з модулем 50 приведена на рис. 6.24.

Крива 1 на графіку рис. 6.24 відображає залежність величини розрідження в газових каналах пальника від тиску підігріває кисню в її спорядженому стані; крива 2 відображає цю залежність в грілці без головки.

Таблиця 6.7 – Технічні характеристики типоразмерного ряду гартівних пальників

Параметри		Пальники ГЗУ6		
		КМ20	КМ25	КМ50
Витрати, м ³ /ч:	Кисню	3,2-4,2	3,2-4,2	6,4-8,4
	природного газу	2,45-3,2	2,45-3,2	4,9-6,4
	води	1,2-2,4		
Тиск на вході в пальник, МПа	Кисню	0,2-0,4		
	природного газу	0,05-0,1		
	води	0,2-0,4		

З графіка видно, що в діапазоні робочих тисків підігріває кисню (0,2 ÷ 0,6 МПа) має місце стійке зростання інжекції зі збільшенням тиску підігріває кисню. Зростає також значення падіння інжекції, (P2 - P1) по координаті «у», тобто при збільшенні тиску підігріває кисню збільшується також підпір газової суміші перед вихідними каналами. Це говорить про те, що пальник працює стабільно в інтервалі робочих тисків, без ударів і зворотних ударів.

У табл. 6.8 наведені характеристики основних гартівних пальників із зазначенням деяких співвідношень їх розрахункових параметрів. (Fвих - сумарне поперечний переріз вихідних каналів в мм²; Fск - поперечний переріз каналу камери змішувача в мм²; Fінж - поперечний переріз каналів інжектора в мм²; t - відстань між двома сусідніми вихідними каналами в мм)

загартування з використанням пальників проста: деталь розташовують таким чином, щоб загартування можна було виробляти знизу-вгору. До нижньої крайки заготовки підводять запалену пальник з включеною водою таким чином, щоб водяні струмені не потрапляли на нагрівається поверхню. Коли лінійний фронт нагріву прийме солом'яний колір (950 - 1050оС), пальник різко піднімають вгору таким чином, щоб водяні струмені

потрапили на нагріту поверхню. І так ділянку за ділянкою, здійснюючи невеликі коливальні рухи у вертикальній площині.

На вал-шестернях доцільно проводити спреєрного загартування за допомогою нерухомої лінійної пальника, обертаючи деталь уздовж поздовжньої осі. За цією схемою механізуються процес спреєрної гарту, проте необхідно строго синхронізувати лінійну швидкість обертання і швидкість нагріву поверхні деталі [126].

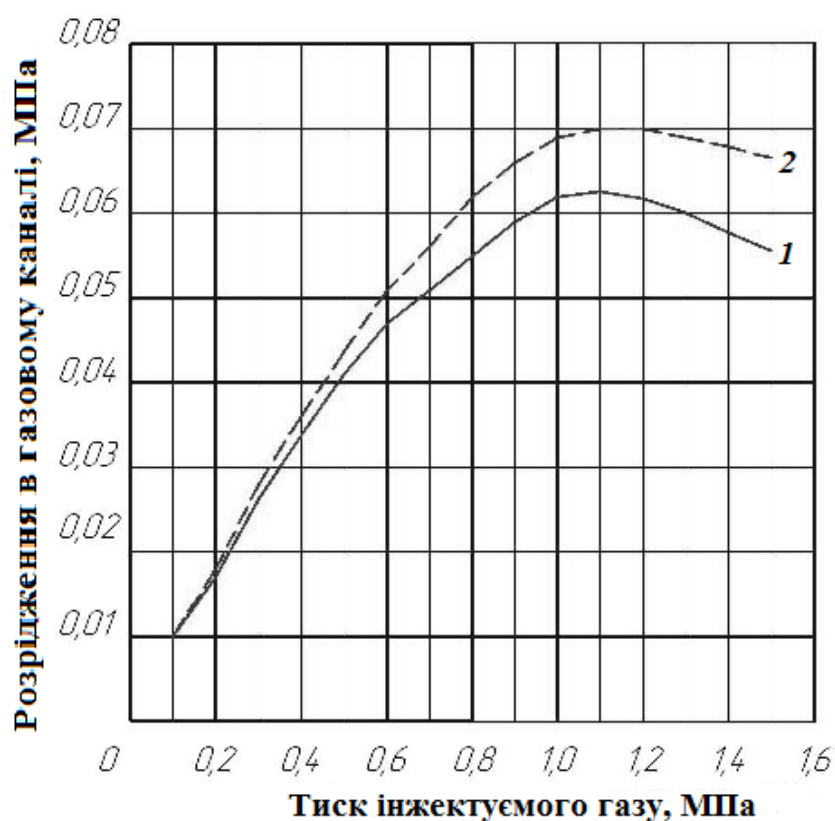


Рисунок 6.24 – Залежність величини розрідження в газових каналах пальника від тиску підігрівача кисню

Методика розрахунку пальників для поверхневої газокисневої гарту ґрунтується на експериментальній базі в залежності від способу наплавлення і властивостей наплавочного матеріалу Сп.

Експериментальним шляхом було вибрано оптимальне для поверхневої гарту лінійне пляма нагріву. Його забезпечує ряд вихідних отворів $\varnothing 1$ мм з кроком 3 мм в разі використання природного газу і ряд

вихідних отворів $\phi 1$ мм з кроком 3,5 мм в разі використання пропан-бутанової суміші. При цьому, глибина загартованого шару коливається від 0,5 мм до 1,5 мм в залежності від марки сталі і швидкості гарту. Виходячи з того, яку ширину поверхні (b) необхідно загартувати за один прохід, можна визначити кількість вихідних отворів в головці пальника (n) [126]

$$n = (b : t) + 1 \quad (6.8)$$

Знаючи кількість вихідних отворів, можна визначити їх сумарний поперечний переріз.

$$F_{\text{вих}} = 0,785 n \quad (6.9)$$

Таблиця 6.8 – Технічні характеристики основних гартівних пальників із зазначенням співвідношень їх розрахункових параметрів. ($F_{\text{вих}}$ - сумарне поперечний переріз вихідних каналів в мм²; $F_{\text{ск}}$ - поперечний переріз каналу камери змішувача в мм²; $F_{\text{инж}}$ - поперечний переріз каналів інжектора в мм²; t - відстань між двома сусідніми вихідними каналами в мм)

Марка пальника ГЗУ	Модуль шестерні, діаметр валків та роликів	$F_{\text{вих}} / F_{\text{ск}}$	$F_{\text{ск}} / F_{\text{инж}}$	Шаг, t
6-КМ (зубці шестерні)	10,12,14,16,18,22,24,30,32,36,50	1,38	8,04	3,0
6-ШЛ (шлицьовий вал)	-	1,25	10,1	3,0
6-В-180 (Валки)	180	1,31	8,33	3,0
6-100 (вали)	100	1,39	8,33	3,5
6-ШВ (шийки валів)	-	1,33	10,1	3,5
6-В-400 (валки)	400	1,44		3,0
6-П (пальці)	-	1,29		3,5
6-125-400 (ролики)	400	1,20	9,76	3,0
6-125-500 (ролики)	500			
6-125-600 (ролики)	600			
6-ХК (ходові колеса)	-	1,20	9,76	3,0
6-ХК (ходові колеса)	-	1,4	8,33	3,5
6-РП (распорні плити)	-	1,47	8,33	,0
6-РБ (ручей блока)	-	1,30	8,33	3,0

Між сумарними поперечними перетинами вихідних каналів головки, каналу камери змішувача і каналу інжектора в пальниках ГЗУ-6 є певні залежності, отримані теоретично і перевірені на практиці [126, 273].

$$F_{вих}: F_{ск} = (1,2 \div 1,35) \quad (6.10)$$

$$F_{ск}: F_{инж} = (8,0 \div 10,0) \quad (6.11)$$

Площа поперечного перерізу отвору камери змішувача визначається по (6.10), а площа поперечного перерізу інжектора - по (6.11).

Інші параметри пальника можна вибрати конструктивно. Але необхідно стежити, щоб на шляху газової суміші від змішувальної камери до вихідних отворів головки не було «кишень» (різкого збільшення поперечного перерізу каналу).

Пальники для ручної поверхневої гарту. Для гарту зубів шестерень з модулем 10 зовнішнього зачеплення використовується пальник ГЗУ-6-КМ10, рис. 6.25.

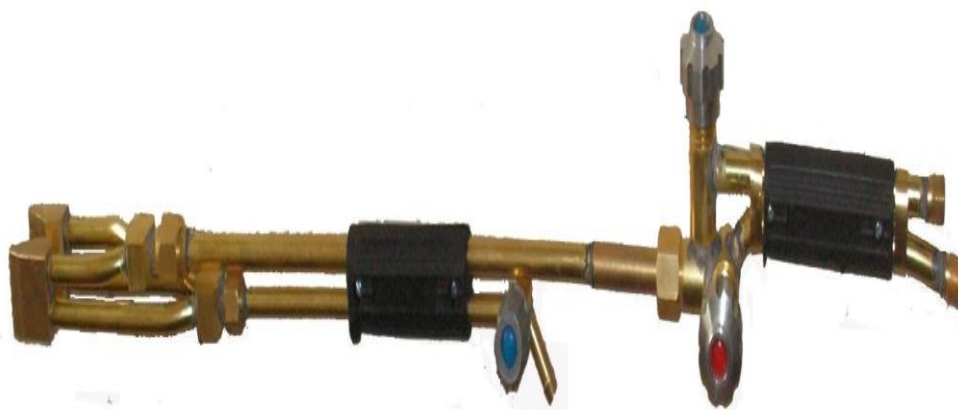


Рисунок 6.25 – Пальник для поверхневого гарту зубів шестерень зовнішнього зачеплення ГЗУ-6-КМ10. модуль 10

На рис. 6.26 показана послідовність поверхневого гарту зубів $m = 50\text{мм}$.

*а**б**в**г*

Рисунок 6.26 – Загартування зуба $m = 50\text{мм}$ пальником ГЗУ-6-КМ50 а) - введення пальника на зуб, б) - початок гарту. в) - процес гарту, г) - закінчення.

На рис 6.27 представлені верстат для поверхневої газокисневого гарту (угорі ліворуч), процес гарту (вгорі праворуч) і два моменти відпрацювання режимів (внизу).

Верстат включає в себе планшайбу з вертикальною віссю обертання і електроприводом, на якій розміщують гартувати шестерню; супорт, встановлений на візку з електроприводом, і механізм вертикального переміщення закалочної пальника з можливістю регулювання швидкості.

*а**б**в**г*

Рисунок 6.27 – Верстат для поверхневої газокисневого гарту зубів шестерні $m = 25$

Послідовність операцій при загартуванні на верстаті наступна: за допомогою приводу повороту планшайби вісь гартувати зуба наводиться в одну площину з віссю пальника, потім за допомогою приводу візки здійснюється введення головки пальника на зуб, і, після нагрівання нижньої кромки зуба до температури гарту, включають привід вертикального переміщення пальника. Після цього відбувається настройка на наступний зуб і описаний цикл повторюють.

6.5 Загальні принципи моделювання оптимального управління параметрами точності, якості і продуктивності зубообробки відновлених і зношених великогабаритних зубчастих коліс

Як при призначенні параметрів стану контактуючих поверхонь циліндричних зубчастих коліс, так і при розробці процесів їх обробки необхідно знати можливості методів щодо забезпечення цих параметрів. Узагальнені дані для евольвентних поверхонь циліндричних зубчастих коліс з конструкційних і легованих сталей при механічних методах їх обробки наведені в [49, 102, 126].

Експериментальні дослідження показали досить тісний кореляційний зв'язок між собою висотних параметрів шорсткості R_a ; H_p - висоти згладжування макроотклоненія; W_p - висоти згладжування профілю волнистости; R_z - висоти нерівностей профілю по десяти точках; S_m - середній крок нерівностей (табл. 6.9):

а) при швидкісному зубофрезерування, що забезпечує евольвентновершинну фінішну обробку:

$$R_{\max} = 5,0 \cdot R_a; \quad (6.12)$$

$$R_z = 4,0 \cdot R_a; \quad (6.13)$$

б) для зубофрезерування фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву:

$$R_{\max} = 6,0 \cdot R_a; \quad (6.14)$$

в) для зубофрезерування черв'ячними модульними фрезами ГОСТ 9324-80:

$$R_{\max} = 7,0 \cdot R_a; \quad (6.15)$$

$$R_z = 5,5 \cdot R_a. \quad (6.16)$$

Таблиця 6.9 – Можливості методів зубообробки в забезпеченні системи параметрів стану поверхневого шару циліндричних крупномодульних зубчастих коліс

Метод обробки	Параметри стану поверхневого шару								Фізико-механічні властивості поверхневого шару			
	Шорстковатості					Хвилястості						
	R_a МКМ	R_z МКМ	R_p МКМ	S_m ММ	S ММ	W_z МКМ	W_m МК М	S_{mv} ММ	$k = H_{\mu 0} / H_{\mu}$ %	h_{μ} ММ	σ_0 МПа	h_{σ} ММ
Зубофрезерування	4,5	60	50,0	0,5	0,1	8,0	5,0	2,5	120	0,2	250	0,1
	2,5	40	16	0,3	60		16	10,0	180	—	—	0,2
	0,9	20	4,0	—	—	25,0	0,63	0,8-4,0	110	0,5	300	0,08
швидкісне зубофрезерування	1,9	16,	10,0	1,2	1,2	12,5	8,0	2,5-	110	0,15	300	0,015
	0,8	—	—	5	5-	—	40	12,0	180	—	—	
	0,40		30	—	5,0	60,0	2,0-	0,8	100	0,25	350	0,25
	0,20	50	2,5	5,0	0,3	3,0	12,5	8,0	150	0,08	200	0,10
Накатування конічного ролика	1,8	32	16,0	0,2	0,2	12,5	6,3	2,5-	130	0,25	250	0,16
	0,8	—	—	0	0		25	15,0	190	—	—	—
	0,40	200	125	—	1,6	40,0	1,25	0,8	120	0,6	350	0,28
	0,20											

Параметр t_m , що не приведений в таблиці через малий діапазону його зміни, слід приймати при швидкісному зубофрезерування, що забезпечує евольвентновершінну фінішну обробку 60 ... 70%, при зубофрезеруванні фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву 40 ... 50%, при зубофрезеруванні черв'ячними модульними фрезами ГОСТ9324-80 - 50%.

Дані таблиці дозволяють встановити методи, які забезпечують отримання необхідних параметрів стану контактуючих поверхонь циліндричних зубчастих коліс. Для визначення конкретних умов обробки необхідно враховувати їх функціональну зв'язок з параметрами стану оброблюваних поверхонь.

Теоретичні залежності, що відображають функціональний зв'язок з параметрами стану оброблюваних поверхонь, для пропонованих і існуючих методів обробки наведені в розділі 2.

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 термообробки ТВЧ і спреерной гарту (сталь 34ХНМ):

$$R_a = 4830 \cdot \frac{S_z^{1,69} \cdot t^{0,15}}{V^{1,25} \cdot \rho^{0,14} \cdot Z_1^{0,24} \cdot Z_2^{0,28} \cdot (HRC)^{4,02} \cdot t^{0,32} \cdot K_{fp}^{1,24}} \cdot \frac{1}{k_m \cdot k_0}; \quad (6.17)$$

$$R_p = 8730 \cdot \frac{S_z^{1,15}}{V^{1,27} \cdot \rho^{0,24} \cdot Z_1^{0,14} \cdot Z_2^{0,17} \cdot (HRC)^{2,82} \cdot t^{0,26} \cdot K_{fp}^{1,24}} \cdot \frac{1}{k_m \cdot k_0}; \quad (6.18)$$

$$W_z = 5500 \cdot \frac{S_z^{1,01} \cdot t^{0,46} \cdot \rho^{0,16} \cdot \gamma^{0,54}}{V^{1,52} \cdot \rho^{0,24} \cdot Z_1^{0,14} \cdot Z_2^{0,17} \cdot (HRC)^{2,82} \cdot K_{fp}^{1,24}}; \quad (6.19)$$

$$S_m = 17 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(HRC)^{1,58}}{\rho^{0,24} \cdot Z_1^{0,07} \cdot Z_2^{0,11} \cdot V^{2,04}} \cdot \frac{k_0}{k_m}, \quad (6.20)$$

де S_z – подача на зуб (0,06–0,5 мм); S_0 – подача на оборот (0,1–0,5 мм/об); V – швидкість різання при фрезеруванні (0,6–5 м/с); t – глибина різання (0,3–2,5 мм); ρ – радіус округлення різальної крайки ($\rho = 0,05$ –0,8 мм); γ – передній кут фрези; HRC – твердість оброблюваного зубчастого колеса (HRC 30–60); Z_1 и Z_2 – число зубів нарізаного зубчастого колеса і число різальних крайок зубів фрези; k_m – коефіцієнт, що залежить від марки оброблюваного матеріалу; k_0 – коефіцієнт, що залежить від способу формоутворення евольвентних поверхонь циліндричного зубчастого колеса.

Значення деяких параметрів шорсткості при швидкісному зубофрезерування фрезами, оснащеними ріжучими пластинками з твердого сплаву і мінералокераміки при зубофрезерування зубчастих коліс з сталей 38ХМЮА і 34ХНМ на оптимальних режимах: $V = 285$ м / хв - швидкість різання при зубофрезерування; $S_0 = 0,5$ мм / об - подача на оборот.

Залежно від умов швидкісного зубофрезерування найбільша хвилястість може спостерігатися в поперечному або поздовжньому напрямку.

Результати експериментальних досліджень показали, що поряд з режимами і геометрією інструменту значний вплив на шорсткість поверхні надає жорсткість обладнання, на якому обробляється зубчасте колесо.

Так, при зубофрезерування зубчастого колеса зі сталі 40Х отримані наступні рівняння з урахуванням статичної жорсткості обладнання $j_{ст}$:

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \rho^{k_4} \cdot (50 + \gamma)^{k_5} \cdot \alpha^{k_6} \cdot j_{ст}^{k_7}. \quad (6.21)$$

При швидкісному зубофрезеруванні, що забезпечує евольвентновершину фінішну обробку (40Х, HRC 30 ... 35):

$$y_i = k_0 \cdot V^{k_1} \cdot S^{k_2} \cdot t^{k_3} \cdot \rho^{k_4} \cdot n^{k_5} \cdot (HRC)^{k_6} \cdot j_{ст}^{k_7}, \quad (6.22)$$

де V – швидкість різання; n – число проходів; ρ – радіус округлення різальної крайки ($\rho = 0,05$ – $0,8$ мм); HRC – твердість оброблюваного зубчастого колеса; $j_{ст}$ – статична жорсткість верстата (9,8 – 29,4 кН/м).

При накоєнні конічними роликами:

$$R_a = k_0 \cdot \frac{R_{a_{вухід}}^{k_1} \cdot S_{нозд}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}}; \quad (6.23)$$

$$R_p = k_0 \cdot \frac{R_{p_{вухід}}^{k_1} \cdot S_{нозд}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}}; \quad (6.24)$$

$$W_z = k_0 \cdot \frac{W_{z_{\text{ахид}}}^{k_1} \cdot S_{\text{нозд}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}} ; \quad (6.25)$$

$$W_p = k_0 \cdot \frac{W_{p_{\text{ахид}}}^{k_1} \cdot S_{\text{нозд}}^{k_3}}{p^{k_2} \cdot n^{k_4} \cdot V^{k_5}} ; \quad (6.26)$$

$$H_{\mu 0} = 10 \cdot k_0 \cdot \frac{p^{k_2} \cdot n^{k_4}}{R_{a_{\text{ахид}}}^{k_1} \cdot S_{\text{нозд}}^{k_3} \cdot V^{k_5}} , \quad (6.27)$$

де $S_{\text{нозд}}$ – поздовжня подача (13–42 мм/хв); p – питоме навантаження (200–600 МПа); n – число проходів ($n = 1–3$); V – окружна швидкість накатної головки (120–270 м/хв).

Значення коефіцієнтів $k_0 \dots k_5$ наведені в табл. 6.10.

Таблиця 6.10 – Значення коефіцієнтів $k_0 \dots k_5$ для характеристик якості накатних поверхонь циліндричних крупномодульних зубчастих коліс

Характеристика якості поверхневого шару	Досліджувальний матеріал	Коефіцієнти					
		k_0	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
R_a	45 (220HB)	3,4	0,986	0,896	0,202	0,023	–0,004
	40X (HRC 30)	8,0	0,765	0,651	0,103	0,206	0,090
	34XHM (HRC 48)	12,1	0,796	0,752	0,028	0,034	0,019
R_p	45 (220HB)	3,1	0,927	0,969	0,257	0,027	–0,017
	40X (HRC 30)	17,4	0,640	0,809	0,103	0,206	0,090
	34XHM (HRC 48)	17,8	0,772	0,890	0,064	0,071	0,026
W_a	45 (220HB)	0,07	0,112	0,427	0,063	–0,076	–0,066
	40X (HRC 30)	51,6	1,037	1,123	0,087	0,134	0,058
	34XHM (HRC 48)	6,4	0,907	0,538	0,014	0,016	
W_p	45 (220HB)	0,1	0,086	0,727	–0,009	0,017	–0,006
	40X (HRC 30)	114,2	1,125	1,369	0,106	0,208	0,087
	34XHM (HRC 48)	5,9	0,940	0,492	0,015	0,022	
$H_{\mu 0}$	45 (220HB)	102,3	+0,042	0,312	0,024	0,013	0,018
	40X (HRC 30)	120,6	+0,033	0,266	0,014	0,025	–0,013
	34XHM (HRC 48)	236,0	+0,008	0,180	0,038	0,008	0,005

Моделювання послідовності формування поверхневого шару циліндричних загартованих крупномодульних зубчастих коліс регламентується вихідними параметрами.

Регламент вибору і призначення параметрів обробки при зубофрезерування гарантує:

1) забезпечення високої продуктивності при максимальній стійкості інструменту;

2) забезпечення параметрів поверхневого шару циліндричних зубчастих коліс при максимальній оброблюваності.

Наукові основи регламенту вибору і призначення параметрів обробки при зубофрезерування базуються на основоположних теоретичних положеннях теорії про терті, технології машинобудування та теорії різання.

Процес зустрічного зубофрезерування при врізання першого зуба фрези супроводжується ковзанням, температура в зоні різання різко зростає, що є однією з причин підвищеного зносу фрез по задніх поверхнях і виникнення силового поля генеріруемого передньою поверхнею фрези. Після досягнення певної товщини шару a_i на вугіллі ковзання $\Psi_{ск}$ процес пластичної деформації переходить в різання.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють визначити оптимальні кути ковзання $\Psi_{ск}$, при яких забезпечується стабільність процесу зубофрезерування; необхідні умови по стійкості інструмента і якість оброблюваної поверхні по відношенню до найбільшого кутку контакту зуба фрези $\Psi_{тах}$ з оброблюваних зубчастих виробом (рис. 6.28). Співвідношення між кутом ковзання $\Psi_{ск}$ і найбільшим кутом контакту зуба фрези $\Psi_{тах}$ з оброблюваної поверхнею дозволяє встановити ефективність процесу формоутворення через коефіцієнт ефективності функціонального формування поверхневого шару K_p (3.6).

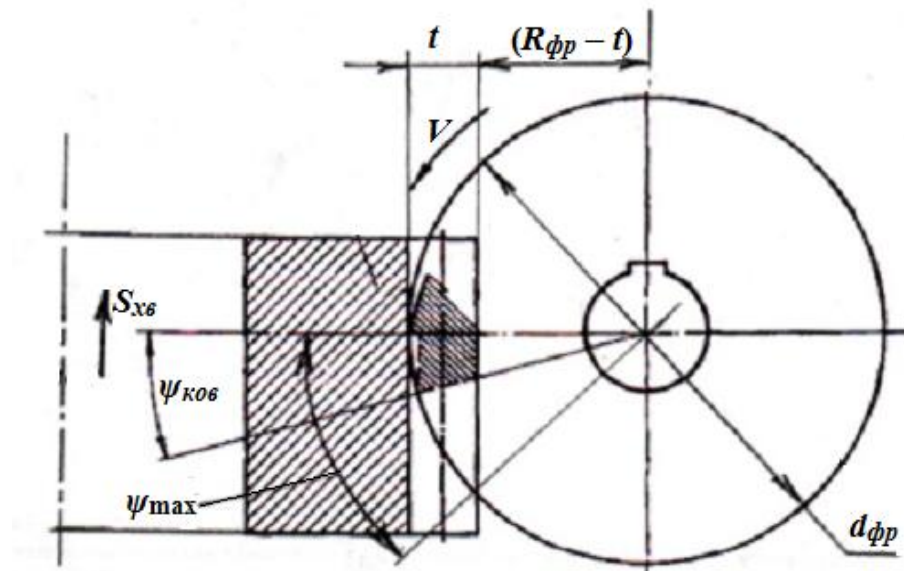


Рисунок 6.28 – Схема розрахунку параметрів обробки при зубофрезерування відновлених зубчастих коліс

Зміна товщини зрізаного шару при досягненні мінімального кута ковзання $\Psi_{\text{скмін}}$ змінює коефіцієнт тертя при наявності обов'язкового сплеску (стрибка), що несприятливо позначається на динаміці різання і якості обробленої поверхні і визначається коефіцієнтом тертя, що залежить від молекулярно-атомної шорсткості

оброблюваної поверхні і інструменту.

Кутовий крок зубів фрези

$$\varpi = \frac{360^{\circ}}{Z}. \quad (6.28)$$

Максимальний кут контакту зуба фрези з оброблюваних зубчастим колесом (максимальний кут ковзання) $\Psi_{\text{мак}}$:

$$\sin \Psi_{\text{мак}} = \frac{H_i}{R_{\text{фр}}} = \frac{2 \cdot H_i}{d_{\text{фр}}} = \frac{\sqrt{t \cdot (d_{\text{фр}} - t)}}{d_{\text{фр}}}; \quad (6.29)$$

$$\Psi_{\text{мак}} = \arcsin \frac{H_i}{R_{\text{фр}}} = \arcsin \frac{2 \cdot H_i}{d_{\text{фр}}} = \arcsin \frac{2 \cdot \sqrt{t \cdot (d_{\text{фр}} - t)}}{d_{\text{фр}}}, \quad (6.30)$$

де $t = 2,25 m$ - висота зуба зубчастого колеса.

До висновку про обмежений участю силового поля, створюваного задньою поверхнею фрези в формуванні поверхневого шару, привели досліди з варіюванням радіуса округлення різальної крайки зубів фрези ρ .

При збільшенні радіуса округлення різальної крайки зубів фрези ρ відзначається зростання залишкових напруг, т. Е. при

$$\rho \geq a_i / K_{сож};$$

при

$$\rho \leq a_i / K_{сож}$$

процес пластичної деформації переходить в різання (табл. 6.11).

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 .

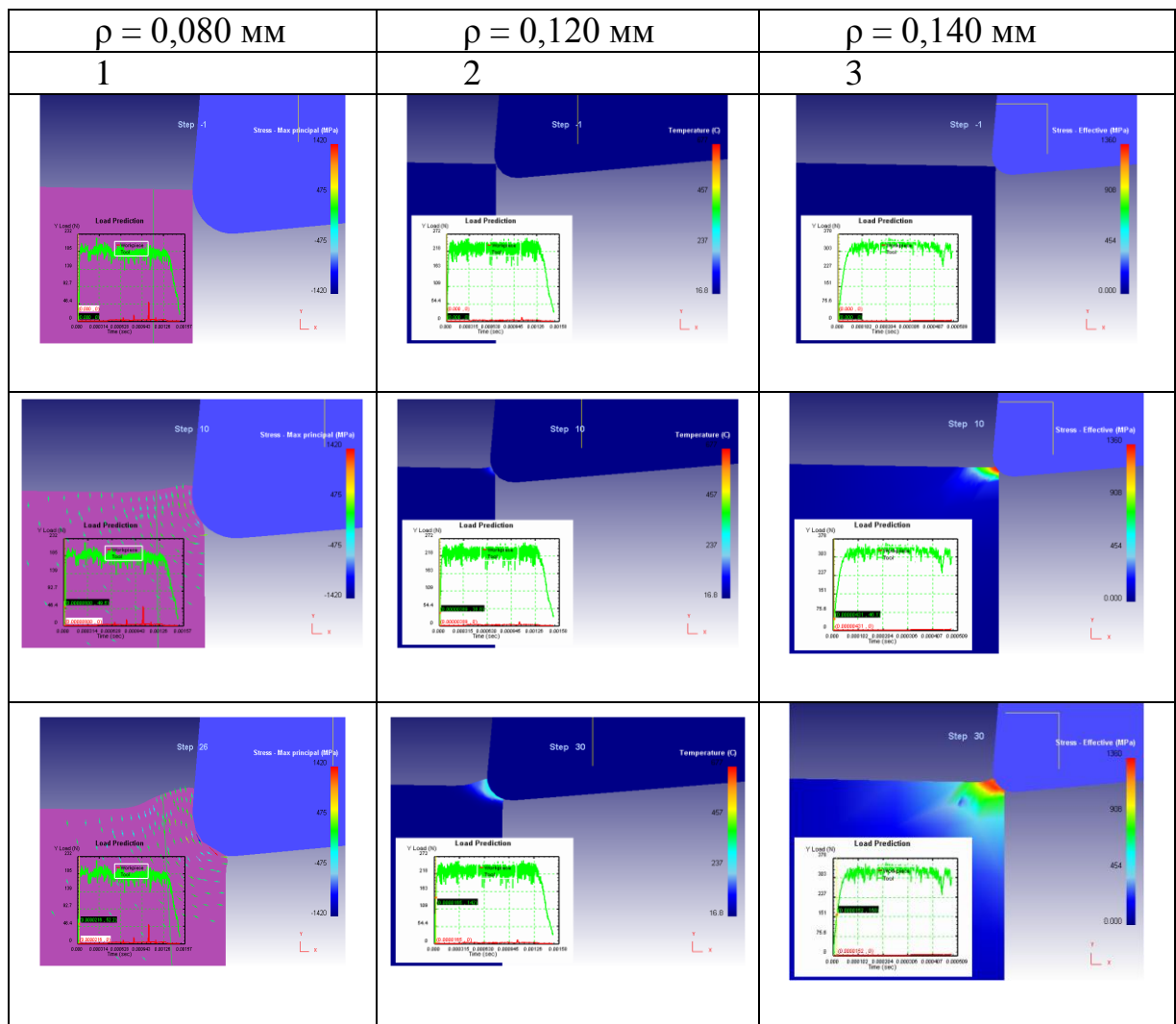
$$R_z = 5 \cdot R_a = \frac{P_z \cdot S_z^{1,69} \cdot a_i^{0,5}}{V^{1,23} \cdot \rho^{0,14} \cdot \gamma^{0,41}} \cdot K_\rho =$$

$$= \frac{10,16 \cdot \left(\frac{\sigma_T \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2)} \right)^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{10 \cdot I \cdot n}{\chi \cdot p} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot S_m^{\frac{3}{2}} \cdot k^{-3}}{H_p^{\frac{1}{4}} \cdot W_p^{\frac{1}{4}}}, \quad (6.31)$$

де σ_T – 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 – питоме навантаження, що припадає на геометричну площу контакту; H_p – висота згладжування

макрівідхилення; W_p – висота згладжування профілю хвилястості; S_m – середній крок нерівностей; $k(H_{\mu 0})$ – ступінь зміцнення.

Таблиця 6.11 – Послідовність моделювання формоутворення залишкових напруг поверхневого шару при швидкісному зубофрезерування при значеннях радіуса округлення різальної крайки зубів фрези $\rho = 0,08; 0,10; 0,12$ мм



Ці рівняння адекватно описують процес формоутворення. Результати експериментальних досліджень підтверджують теоретичні передумови механічних методів обробки в технологічному забезпеченні системи параметрів поверхневого шару деталей зубчастих коліс.

У поверхневому шарі зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс формується поле залишкових напружень, головні осі якого також не збігаються з напрямками формотворчих рухів (рис. 6.29). 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 (табл. 6.12), а їх величина, природно, тим більше, чим більше кут відхилення головних осей від напрямку формотворчих рухів на вугіллі ковзання зуба фрези $\Psi_{ск}$.

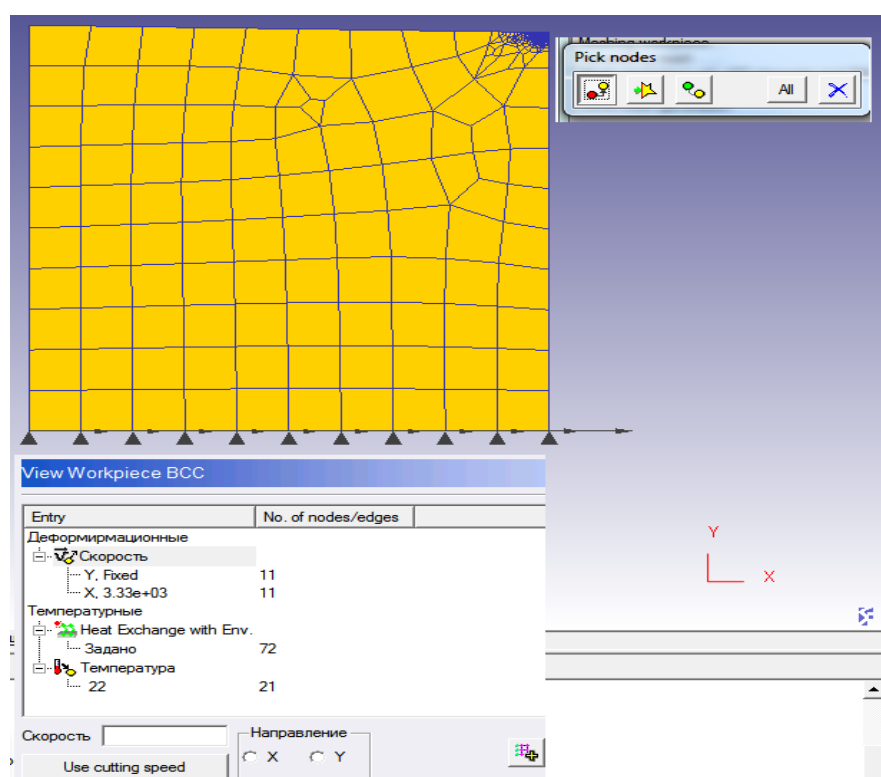


Рисунок 6.29 – Залишкові напруги стиснення при початковому врізанні зуба фрези

Примітно, що, як встановлено експериментально, на вугіллі ковзання зуба фрези при врізанні утворюються значні напруження розтягу в поверхневому шарі відхилення і в міру збільшення кута ковзання при переході пружних деформацій в пластичні - зменшуються.

Таблиця 6.12 – Знаки тангенціальних залишкових напруг, певні по куту текстури стружки і експериментально при швидкісному зубофрезерування стали 34ХНМ

Швидкість різання, м/с	Найбільша товщина зрізу a , мм	Радіус скруглення ріжучої кромки зубців фрези ρ , мм	кут текстури ЛЧ® W	Знак залишкових напружень	
				по текстурі	експерим.
0,2	0,73	0,08	54	+	+
	0,44	0,12	48	+	+
	0,6	0,14	57	+	+
	0,15	0,16	51	+	+
1,0	0,31	0,14	51	+	+
	0,36	0,16	58	+	+
2,0	0,27	0,16	66	+	+
	0,23	0,18	56	+	+
	0,24	0,30	48	+	+
3,0	0,34	0,35	61	+	+
	0,32	0,40	52	+	+
	0,12	0,45	49	+	+

Безпосередній зв'язок між напруженнями, що виникають в зоні стружкообформування, і залишковими напруженнями може бути показана при їхньому уявленні інтенсивністю напруг, що характеризує напружений стан в узагальненому вигляді. Цей зв'язок виражається більш чітко, якщо залишкові напруги оцінювати площею активної частини їх епюр. Відбувається згладжування похибок визначення залишкових напружень, присутність яких неминуче через складність експерименту.

Висновки до розділу 6

1. Встановлено взаємозв'язок між залишковими напруженнями і показниками зміцнення.

2. Розроблено регламент вибору і призначення параметрів обробки при зубофрезерування з урахуванням забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс встановлює оптимальні умови зубофрезерування, при яких

забезпечується повне участь в зніманні припуску при зубофрезерованія всіх зубів фрези.

3. Розроблено альтернативні Зубошліфування процеси дозволяють значно підвищити якість поверхневого шару і точність зубообработки крупномодульних загартованих зубчастих коліс, знизити трудомісткість операцій остаточної обробки зубів лезовий інструментів без придбання унікальних дорогих зубошліфувальних верстатів.

4. Розроблено та впроваджено високошвидкісні фрезерні супорти до зубостругальний і вертикально-зубофрезерні Верстати, з оснащенням спеціальними твердосплавними фрезами і дисковими немодульними фрезами, оснащеними ріжучої керамікою.

5. Створено гамма універсального немодульностей лезвийного інструменту для обробки з

6. Проведено роботи по дослідженню динаміки зубофрезерованія крупномодульних загартованих коліс і встановлені основні залежності впливу режимів різання на забезпечення якості поверхневого шару зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс.

ЗАГАЛЬНІ 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 високоефективної 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Адам Я. И. Чистовая обработка зубьев крупных закаленных колес / Я. И. Адам [и др.] // Вестник машиностроения. – 1980. – № 9. – С. 47–49.
2. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
3. Андожский В. Д. Расчет зубчатых передач / В. Д. Андожский – М.: Машгиз, 1955. – 268 с.
4. А. с. 1805360 СССР, МКИ G01 N 23/20. Рентгеновская камера для контроля крупногабаритных объектов / Б. А. Брусиловский, А. И. Дрыга, А. А. Ключко (СССР). – № 4761525/08; заявл. 03.10.89; опубл. 30.03.93, Бюл. № 12. – 3 с.
5. А. с. 1729705 СССР, МКИ В23 F 5/20. Способ фрезерования зубчатых изделий спаренными фрезами / А. А. Ключко, В. Н. Бородаевский, О. А. Богатырев, В. И. Баран (СССР). – № 4736585/08; заявл. 11.09.89; опубл. 30.04.92, Бюл. № 16. – 4 с.
6. А. с. 1715523 СССР, МКИ В23 F 5/20. Способ фрезерования цилиндрических зубчатых колес / М. М. Кане, А. А. Ключко, В. А. Колот (СССР). – № 4776925/08; заявл. 03.01.90; опубл. 29.02.92, Бюл. № 8. – 4 с.
7. А. с. 1604528 СССР, МКИ В23 F 1/04. Способ чистовой обработки зубчатых колес / В. И. Печеный, А. А. Ключко, О. А. Мороз (СССР). – № 4649293/25; заявл. 12.12.88; опубл. 07.11.90, Бюл. № 41. – 3 с.
8. Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения / А. С. Ахматов. – М.: –Машгиз, 1963. – 472 с.
9. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
10. Базров Б. М. Расчет точности машин на ЭВМ / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.

11. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
12. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 559 с.
13. Безъязычный В. Ф. Назначение режимов резания по заданным параметрам качества поверхностного слоя / В. Ф. Безъязычный. – Ярославль, 1978. – 86 с.
14. Бетанели А. И. Прочность и надежность режущего инструмента / А. И. Бетанели. – Тбилиси: Сабчота сакартвелло, 1973. – 304 с.
15. Билик Ш. М. Макрогеометрия деталей машин / Ш. М. Билик. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
16. Билинчук Н. Л. Сравнительная усталостная прочность зубчатых колес с восстановленными профилями зубьев / Н. Л. Билинчук [и др.] // Вестник машиностроения. – 1989. – № 2. – С. 51–53.
17. Биргер И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
18. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов: учебник / В. Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
19. Боуден Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
20. Брусиловский Б. А. Физико-механические характеристики поверхностных слоев в зависимости от особенностей технологических приемов обработки зубчатых изделий / Б. А. Брусиловский, А. А. Ключко, М. М. Канне // Передовой производственный опыт и научно-технические достижения: информ. сборник. – М.: ВНИИТЭМР. – 1990. – Вып. 6. – С. 20–21.
21. Бякеттер Д. О. Контактное напряжение между двумерными упругими телами / Д. О. Бякеттер, Х. Д. Кристенсен // Труды американского общества инженеров-механиков. Сер. Е. – 1966. – № 3. – С. 75–82.

22. Вейц В. Л. Геометрия зацепления зубчатых передач / В. Л. Вейц, А. М. Волженская, Н. И. Колчин – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1978. – 136 с.

23. Витренко В. А. Нарезание прямых зубьев цилиндрических колес / В. А. Витренко, М. А. Должков, И. А. Кириченко // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХПТУ, 1999. – Вып. 60. – С. 81–85.

24. Витренко, В. А. Гиперболоидная зубчатая передача с линейным контактом / В. А. Витренко, И. А. Кириченко, В. В. Белозерова, А. В. Витренко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междун. сб. науч. трудов. – Донецк, 2003. – С. 52–55.

25. Витренко А. Н. Формообразование и упрочнение зубьев цилиндрических колес / А. Н. Витренко, В. А. Витренко, М. А. Должков, И. А. Кириченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. – Донецк: ДГТУ, 1998. – Т. 1, № 6. – С. 149–152.

26. Воробьев В. И. Теория и практика вейвлет-преобразования / В. И. Воробьев, В. Г. Грибунин // – СПб: ВУС, 1999. – 204с.

27. Вулгаков Э. Б. Эвольвентные зубчатые передачи в обобщающих примерах: справочник по геометрическому расчету / Э. Б. Вулгаков, Л. М. Васина. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.

28. Гавриленко, В. А. Зубчатые передачи в машиностроении / В. А. Гавриленко. – М.: Машгиз, 1962. – 532 с.

29. Галив, Л. А. Контактная задача теории упругости при наличии износа / Л. А. Галив, И. Г. Горячева // Теория трения, износа и проблемы стандартизации. – Брянск, 1978. – С. 251–265.

30. Гасанов М. И. Исследование плоского алмазного электроэрозионного шлифования изделий из твердых сплавов / М. И. Гасанов // Труды Государственного Аэрокосмического университета им. Н.Е.

Жуковского. «Авиационно – космическая техника и технология» – Харьков: ГАУ «ХАИ», 2000. Вып. 14. С. 343–345.

31. Гасанов М. И. Повышение производительности алмазного шлифования изделий из твердых сплавов / М. И. Гасанов, Ф. В. Новиков, Ю. Н. Кривошопка, В. П. Ткаченко, Г. В. Новиков, С. А. Дитиненко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Анотації доповідей міжнародної науково-технічної конференції 16–17 травня 2002 р., Харків. – С. 94.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

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

36. Гасанов М. И. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач / М. И. Гасанов, О. О. Клочко, О. Ю. Заковоротний, Є. В. Пермінов // 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. – ISSN 2079–004X.

37. Гасанов М.И. Оптимизация технологического процесса восстановления крупномодульных зубчатых колес / М. И. Гасанов // 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.

38. Гасанов М. И. Имитационное моделирование технологических процессов восстановления крупногабаритных зубчатых колес с учетом прогрессирующих видов износа / М. И. Гасанов, О. М Шелковий., О. О. Ключко, О. О. Анциферова // 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.

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

40. Гинзбург Е. Г. Производство зубчатых колес / Е. Г. Гинзбург, Н. Т. Халебский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 136 с.

41. Гинзбург Е. Г. Зубчатые передачи: справочник / Е. Г. Гинзбург, Н. Ф. Голованов, Н. Б. Фирун, Н. Т. Халебский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980. – 416 с.

42. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1977. – 479 с.

43. ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – Взамен ГОСТ 1643-73; введ. 01.01.82. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 30 с.

44. ГОСТ 20736-75. Статистический приемочный контроль по количественному признаку. Планы контроля. – Введ. 01.01.76. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 120 с.

45. Гринвуд Д. А. Упругий контакт шероховатых сфер / Д. А. Гринвуд, Д. Х. Трипп // Прикладная механика. – 1967. – Т. 34, № 4. – С. 7–13.

46. Гришко В. А. Повышение износостойкости зубчатых передач / В. А. Гришко. – М.: Машиностроение, 1977. – 232 с.

47. Гулида Э. Н. Измерение сил резания и крутящих моментов при зубофрезеровании / Э. Н. Гулида. – Львов: ЛГУ, 1966. – 134 с.

48. Дальский А. М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А. М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 222 с.

49. Декларативний 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. – 4 с. : ил.

50. Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М.: Наука, 1970. – 227 с.

51. Демкин Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 248 с.

52. Демкин Н. Б. Оценка шероховатости и волнистости при расчете контактного взаимодействия деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. М. Алексеев // Вестник машиностроения. – 1975. – № 8. – С. 27–29.

53. Добротворский С. С. 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 «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні – Харків: НТУ «ХП», 2015. – №. 4(1113). – С. 37–40.

54. Добротворский С. С. Исследование оптимального угла наклона концевой сферической фрезы относительно обрабатываемых поверхностей деталей сложной формы с переменной жесткостью / С. С. Добротворский, Е. В. Басова, М. И. Гасанов, Р. В. Головатый // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х.: Национальный аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2015. – Вып. 69. – С. 108–112.

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

56. Драчев О. И. Управление технологической наследственностью деталей малой жесткости [Текст] / О. И. Драчев. – Ирбит: ОНИКС, 2011. – 192 с.

57. Дроздов Ю. Н. К расчету зубчатых передач на износ / Ю. Н. Дроздов // Машиноведение. – 1969. – № 2. – С. 84–88.

58. Дружинский И. А. Сложные поверхности: математическое описание и технологическое обеспечение / И. А. Дружинский – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 263 с.

59. Дунаев П. Ф. Конструирование узлов и деталей машин / П. Ф. Дунаев, О. П. Леликов. – М.: Высш. школа, 1985. – 416 с.

60. Дунин-Барковский И. В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И. В. Дунин-Барковский, А. Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 230 с.

61. Дьяченко П. Е. О разработке проекта международного стандарта на шероховатость поверхности / П. Е. Дьяченко, В. Э. Вайнштейн, Т. М. Карпова // Качество поверхности деталей машин. – 1959. – № 4. – С. 14–20.
62. Дьяченко П. Е. Качество поверхности деталей машин. Т. 2 / П. Е. Дьяченко. – М.; Л.: Машгиз, 1949. – С. 20–31.
63. Дьяченко П. Е. Исследования зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки / П. Е. Дьяченко – М.; Л.: Машгиз, 1949. – 126 с.
64. Дьяченко П. Е. Методы контроля и стандартизация волнистости поверхности / П. Е. Дьяченко, В. Э. Вайнштейн, З. П. Грозинская. – М.: Стандартгиз, 1962. – 96 с.
65. Евсюкова Ф. М. 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.
66. Евсюкова Ф. М. Анализ обобщенной модели технологического процесса прецизионного алмазного шлифования / Ф. М. Евсюкова, А. Ф. Еникеев, И. С. Зыков, Л. А. Шищенко, М. И. Гасанов // Вестник инженерной академии. – К.: №3, 2001. – С. 585–592.
67. Евсюкова, Ф. М. Статическая оптимизация процесса алмазного шлифования по критерию производительности / Ф. М. Евсюкова, А. Ф. Еникеев, И. С. Зыков, Л. А. Шищенко, М. И. Гасанов // В сборнике «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – Харьков: Часть 2, 2002. – С. 230–236.
68. Евсюкова, Ф. М. Оптимизация процесса алмазного шлифования по критерию производительности / Ф. М. Евсюкова, А. Ф. Еникеев, М. И. Гасанов, И. С. Зыков, Л. А. Шищенко // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: № 9, 2002. Т. 10 – С. 52–56.

69. Елизаветин М. А. Технологические способы повышения долговечности машин / М. А. Елизаветин, Э. А. Сатель. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.

70. Еремин, А. Н. Физическая сущность явлений при резании стали / А. Н. Еремин. – М.: Машгиз, 1951. – 256 с.

71. Жигалко Н. И. Проектирование и производство режущих инструментов / Н. И. Жигалко, В. В. Киселев. – Минск: Высшейш. школа, 1975. – 399 с.

72. Жуков К. П. Расчеты и проектирование деталей машин / К. П. Жуков [и др.]. – М.: Высшая школа, 1978. – 247 с.

73. Заблонский, К. И. Детали машин / К. И. Заблонский. – К.: Выща школа, 1985. – 517 с.

74. Заблонский К. И. Зубчатые передачи. Распределение нагрузки в зацеплении / К. И. Заблонский. – К.: Техніка, 1977. – 208 с.

75. Заблонский К. И. Влияние погрешностей изготовления на концентрацию нагрузки в зацеплении с учетом конструкции передачи / К. И. Заблонский [и др.] // Детали машин: сборник. – К.: Техника, 1974. – № 19. – 126 с.

76. Заблонский К. И. Исследование напряженного состояния и расчет на изломную прочность зубьев выпукло-вогнутого круговинтового зацепления / К. И. Заблонский, Н. А. Цецорин. – К.: Изд-во УкрНИИНТИ, 1963. – 83 с.

77. Зиновьев Е. В. Физико-химическая механика трения и оценка асбофрикционных материалов / Е. В. Зиновьев, А. В. Чичинадзе. – М.: Наука, 1978. – 206 с.

78. Зиновьев Н. И. Расчет стационарности сил резания при профильном формообразовании зубьев колес / Н. И. Зиновьев, А. А. Ключко // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков, 1999. – Вып. 55. – С. 115–120.

79. Зиновьев Н.И. Пути повышения износостойкости зубообрабатывающего инструмента / Н. И. Зиновьев, А. А. Ключко, В. Г. Белых, А. Г. Суслов // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков, 1999. – Вып. 54. – С. 105–110.

80. Золоторевский В. С. Механические свойства металлов: учебник для вузов / В. С. Золоторевский. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

81. Инженерия поверхностей деталей / Колл. авт.; под ред. А. Г. Сулова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

82. Иноземцев Г. Г. Проектирование металлорежущих инструментов / Г. Г. Иноземцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.

83. Ионак В. Ф. Приборы кинематического контроля / В. Ф. Ионак. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.

84. Исаев А. И. Микрогеометрия поверхности при токарной обработке / А. И. Исаев. – М.; Л.: Машгиз, 1950. – 106 с.

85. Кане М. М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А. Г. Суслов, О. А. Горленко и др. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.

86. Капустин Н. М. Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ / Н. М. Капустин. – М.: Машиностроение, 1976. – 286 с.

87. Клебанов Б. М. Зубчатые передачи в машиностроении / Б. М. Клебанов, А. Е. Гинзбург. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 120 с.

88. Ключко А. А. Технологические особенности кинематики зубообработки крупномодульных закаленных колес дисковыми немодульными фрезами / А. А. Ключко // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук.-техн. журн. – 2011. – № 2(62). – С. 78–83.

89. Ключко А. А. Физическая картина эффективности прогрессивных схем зубофрезерования / А. А. Ключко // Передовой производственный опыт

и научно-технические достижения: информ. сборник. – М.: ВНИИТЭМР, 1990. – Вып. 8. – С. 12–13.

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

91. Ключко А. А. Перспективные работы по созданию методов и средств контроля высокоточных зубчатых реек в условиях тяжелого машиностроения и станкостроения / А. А. Ключко, В. И. Печеный, В. А. Вышлов, В. И. Завгородний // Передовой производственный опыт и научно-технические достижения: информ. сб. – М.: ВНИИТЭМР, 1989. – Вып. 6. – С. 1–2.

92. Ключко А. А. Новые технологические направления чистовой обработки зубчатых реек / А. А. Ключко, Н. И. Зиновьев, Ю. А. Ключко, Е. В. Мироненко // Високі технології в машинобудуванні: зб. наук. пр. ХДПУ. – Харків, 2000. – Вип. 1(3). – С. 138–145.

93. Ключко А. А. Теоретические предпосылки повышения эффективности процесса формообразования изделий зубообрабатывающим инструментом / А. А. Ключко, Ю. А. Ключко, В. Г. Белых, В. И. Печеный // Надежность режущего инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. ДГМА. – Краматорск, 1999. – С. 150–154.

94. Ключко А. А. Влияние направления неровностей при заточке режущих сборных инструментов на процесс наростообразования / А. А. Ключко, Н. В. Кравцов, О. А. Мороз // Передовой производственный опыт и научно-технические достижения: информ. сборник. – М.: ВНИИТЭМР, 1990. – Вып. 4. – С. 14–15.

95. Ключко А. А. Технологическое прогнозирование точности изготовления зубчатых реек / А. А. Ключко, Е. В. Мироненко, В. А. Овчаренко, В. Г. Белых, Ю. А. Ключко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2000. – Вып. 10. – С. 143–148.

96. Ключко А. А. Фрезерование зубьев реек дисковой фрезой с импульсной подачей / А. А. Ключко, А. Г. Суслов, Н. И. Зиновьев, В. А. Колот, Е. Г. Баран // Зубчатые передачи: современность и прогресс: тезисы докладов Всесоюз. науч.-техн. конф. – Одесса, 1990. – С. 86.

97. Ключко А.А. Технологическое обеспечение трения качения и трения скольжения в зубчатых передачах / А. А. Ключко, 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.

98. Ключко О. О. 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.

99. Ключко А. А. Технологический регламент выбора и назначения параметров состояния поверхностного слоя закаленных зубчатых колес / А. А. Ключко, М.И. Гасанов, Е. В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 33 (1205). – С. 145–157.

100. 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 «ХПІ», 2017. – С. 54–55.

101. Ключко А. А. 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.

102. Ковалев В. Д. Цилиндрические зубчатые передачи с неньютоновским состоянием рабочей жидкости / В. Д. Ковалев, А. А. Клочко, 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.

103. Коганов И. А. Прогрессивные методы изготовления цилиндрических зубчатых колес / И. А. Коганов, Ю. Н. Федоров, Е. Н. Валиков. – М.: Машиностроение, 1981. – 136 с.

104. Коняхин И. Р. Теория предварительных смещений применительно к вопросам контактирования деталей / И. Р. Коняхин. – Томск, 1965. – 116 с.

105. Кораблев А. И. Повышение несущей способности и долговечности зубчатых передач / А. И. Кораблев, Д. Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1968. – 288 с.

106. Кравцов Н. В. Применение комплексных параметров при технологическом обеспечении эксплуатационных свойств сборных инструментов / Н. В. Кравцов, А. А. Клочко // Передовой производственный опыт и научно-технические достижения: информ. сб. – М.: ВНИИТЭМР, 1990. – Вып. 4. – С. 11–12.

107. Кравцов Н. В. Технологическое обеспечение схода наростообразования в период приработки передней поверхности режущей части сборных инструментов / Н. В. Кравцов, А. А. Клочко, В. И. Печеный // Передовой производственный опыт и научно-технические достижения: информ. сб. – М.: ВНИИТЭМР, 1990. – Вып. 4. – С. 13–14.

108. Крагельский И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.

109. Крагельский И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 525 с.

110. Крагельский И. В. Узлы трения машин / И. В. Крагельский, Н. М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

111. Кривошея А. В. Математические модели формообразования звеньев плоских систем зубчатых зацеплений / А. В. Кривошея, В. Е. Мельник, А. В. Коринец // Сверхтвердые материалы. – 2003. – № 5. – С. 60–76.

112. Кривошея А. В. Схематичне і структурне представлення способів задання та формоутворення плоских систем зубчастих зачеплень / А. В. Кривошея, В. Є. Мельник // Технічні науки. Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Житомир, 2003. – Вип. 2(26). – С. 94–100.

113. Кривошея А. В. Задание и визуализация поверхностей зубчатых колес, исходных зубчатых колес, исходных формообразующих и исходных инструментальных тел / А. В. Кривошея, О. О. Пасичный // Современные проблемы и физико-химии процессов резания, абразивной обработки и поверхностного пластического деформирования : материалы межд. науч. конф: (14-16 мая 2002 г., Киев) / Институт сверхтвердых материалов. Киев, 2002. С. 2024.

114. Кривошея А. В. Математическое описание кинематики формообразования поверхностей зубчатых звеньев / А. В. Кривошея, О. О. Пасичный, В. Е. Мельник // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: материалы пятой юбилейной промышленной конференции с международным участием и блиц-выставки: (21-25 февраля 2005 г., п. Славское, Карпаты) / Ассоциация технологов-машиностроителей. Киев, 2005. Кривошея А. В. Задание, математическое описание и 3D моделирование зубчатых контуров и зубчатых звеньев системы зубчатых зацеплений / А. В. Кривошея,

О. О. Пасичный, В. Е. Мельник // Серия «Машинобудування і машинознавство». Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк, 2005. – Вип. 92. – С. 249–262.

115. Кривошея А. В. Методика задания и математического описания исходных формообразующих профилей / А. В. Кривошея, О. У. Петасюк, В. Е. Мельник, А. В. Коринец // Сверхтвердые материалы. – 2004. – № 1. – С. 52–65.

116. Кривошея А. В. Задание, математическое описание и методика исследования поверхностей зубчатых венцов исходных формообразующих зубчатых звеньев / А. В. Кривошея, Ю. М. Данильченко, С. И. Пастернак, В. Е. Мельник // Резание и инструмент в технологических системах. Межд. научн.-техн. сборник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков, 2008. – Вып. 75. – С. 177–195.

117. Кривошея А. В. Совершенствование обобщенной структурной схемы теоретического формообразования плоских контуров цилиндрических зубчатых колес с различным профилем / А. В. Кривошея, В. Е. Мельник, С. И. Сташкевич // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. трудов ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. – Киев, 2009. – Вып. 12. – С. 478–484.

118. Кривошея А. В. Совершенствование обобщенной унифицированной математической модели формообразования и обработки зубчатых колес / А. В. Кривошея, Ю. М. Данильченко, М. Г. Сторчак, В. Е. Мельник // «Оборудование и инструмент для профессионалов», международный информационно-технический журнал. – 2010. – № 4 /127/. – С. 46–51

119. Кудрявцев В. Н. Зубчатые передачи / В. Н. Кудрявцев. – М.; Л.: Машгиз, 1957. – 264 с.

120. Кудрявцев В. Н. Конструкция и расчет зубчатых редукторов: справочное пособие / В. Н. Кудрявцев, Ю. А. Державец, Е. Г. Глухарев. – Л.: Машиностроение, 1971. – 328 с.

121. Кузьмин А. В. Расчёты деталей машин: справочное пособие / А. В. Кузьмин, И. М. Чернин, Б. С. Козинцов. – Минск: Вышэйш. школа, 1986. – 400 с.

122. Кушнер В. С. Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластических материалов / В. С. Кушнер. – Иркутск: Иркутский ун-т, 1982. – 180 с.

123. Ларин М. Н. Основы фрезерования / М. Н. Ларин. – М.: Машгиз, 1947. – 302 с.

124. Лашнев С. И. Формообразование зубчатых деталей реечными и червячными инструментами / С. И. Лашнев. – М.: Машиностроение, 1971. – 216 с.

125. Левина З. М. Контактная жесткость машин / З. М. Левина, Д. Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.

126. Литвинов В. М. Технологические особенности спреерной 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.

127. Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости / А. И. Лурье. – М.: Машиностроение, 1955. – 491 с.

128. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

129. Максак В. И. Предварительное смещение и жесткость механического контакта / В. И. Максак. – М.: Наука, 1975. – 60 с.

130. Маталин А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А. А. Маталин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1966. – 252 с.

131. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – К.: Техніка, 1971. – 140 с.
132. Маталин А. А. Технология механической обработки / А. А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 460 с.
133. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.
134. Мироненко Е. В. Проблемы поляризационного технического контроля в машиностроении / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С. 58.
135. Мироненко Е. В. Расчет зубчатых передач в ремонтном производстве. Металлообработка. Оборудование и инструмент для профессионалов / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Международный информационно-технический журнал. – Харьков, 2008. – № 3. – С. 40–46.
136. Мироненко Е. В. Исследование влияния некоторых конструктивных параметров агрегатно-модульных резцов на прочность и износостойкость / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, О. Я. Белицкая // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2004. – Вып. 16. – С. 13–17.
137. Мироненко Е. В. Взаимосвязь мощности и крутящего момента при формообразовании зубьев колес и реек / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2007. – Вып. 22. – С. 30–34.
138. Мироненко Е. В. Вибростабилизирующая обработка крупногабаритных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. Д. Ковалев и др. // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2009. – Вып. 25. – С. 90–94.
139. Мироненко Е. В. Технология предварительной обработки закаленных зубчатых колес и реек дисковыми сборными фрезами с отдельной схемой резания / Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. С.

Лебединский // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2011. – Вып. 28. – С. 219–225.

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

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

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

143. Митрофанов С. П. Автоматизация технологической подготовки производства / С. П. Митрофанов, Ю. А. Гульков, Д. Д. Куликов. – М.: Машиностроение, 1974. – 360 с.

144. Михин Н. М. Внешнее трение твердых тел / Н. М. Михин. – М.: Машиностроение, 1977. – 220 с.

145. Мойсеенко О. И. Скоростное зубофрезерование / О. И. Мойсеенко, И. П. Захаренко, Л. С. Сидоренко [и др.]. – К.: Техника, 1972. – 216 с.

146. 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. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2079–004X.

147. Назаров Ю. Ф. Нанотехнология механической обработки деталей машин / Ю. Ф. Назаров, А. В. Иванайский, Д. С. Свириденко и др. // Технология машиностроения. – 2009. – № 6. – С. 45–49.

148. 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.

149. 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.

150. 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.

151. 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 «ХПИ» – Харків, 2007. – № 17. С. 105–111.

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

153. Новиков Ф. В. Особенности эксплуатации абразивных кругов при зубошлифовании / Ф. В. Новиков, А. А. Ключко, М. И. Гасанов, Е. В. Басова, А. Н. Лищенко // Фізичні та комп'ютерні технології. Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції, 7–9 грудня 2016, м. Харків. – Д. : ЛІРА, 2016. – С. 110–112.

154. Овумян Г. Г. Совершенствование технологических процессов зубообработки / Г. Г. Овумян // Энергомашиностроение. – 1984. – № 7. – С. 15–17.
155. Овумян Г. Г. Справочник зубореза / Г. Г. Овумян, Я. И. Адам. – М.: Машиностроение, 1983. – 262 с.
156. Овумян Г. Г. Зубострогание цилиндрических зубчатых колес / Г. Г. Овумян // Станки и инструмент. – 1983. – № 3. – С. 22–24.
157. Овумян Г. Г. Непрерывное зубострогание закаленных зубьев цилиндрических колес / Г. Г. Овумян // Вестник машиностроения. – 1986. – № 12. – С. 43–46.
158. Овумян Г. Г. Обработка закаленных зубьев лезвийным инструментом / Г. Г. Овумян // Вестник машиностроения. – 1983. – № 11. – С. 47–49.
159. Овумян Г. Г. Обработка зубчатых колес внутреннего зацепления / Г. Г. Овумян // Станки и инструмент. – 1979. – № 1. – С. 14–15.
160. Овумян Г. Г. Определение стойкости инструмента для чистового зубофрезерования крупных колес путем моделирования / Г. Г. Овумян // Вестник машиностроения. – 1972. – № 8. – С. 65–68.
161. Овумян Г. Г. Повышение технико-экономической эффективности чистового зубонарезания крупномодульных колес / Г. Г. Овумян // Станки и инструмент. – 1980. – № 11. – С. 21–23.
162. Овумян, Г.Г. Снижение себестоимости зубообработки крупномодульных цилиндрических колес / Г. Г. Овумян // Станки и инструмент. – 1986. – № 1. – С. 16–17.
163. Овумян Г.Г. Справочник зубофрезеровщика / Г. Г. Овумян, Я. И. Адам. // Техника. – София, 1987. – 280 с.
164. Овумян Г.Г. Силы резания при прерывистой обработке закаленных сталей / Г. Г. Овумян, О. И. Антонов // Вестник машиностроения. – 1976. – № 7. – С. 66–68.

165. Овумян Г.Г. Инструмент для чистового зубонарезания цилиндрических колес / Г. Г. Овумян, О. И. Антонов, С. А. Хухрий // Станки и инструмент. – 1975. – № 1. – С. 22–23.

166. Овумян Г.Г. Эффективность зубострогания цилиндрических колес / Г. Г. Овумян, Н. Ф. Бутовский // Труды ЦНИИТМАШ. – 1982. – № 171. – С. 39–50.

167. Овумян Г.Г. Стойкость инструмента при чистовом зубофрезеровании крупномодульных колес / Г. Г. Овумян, Ю. А. Липатов, С. А. Хухрий // Станки и инструмент. – 1977. – № 4. – С. 22–24.

168. Овумян Г. Г. Чистовая обработка крупномодульных зубьев / Г. Г. Овумян, С. А. Хухрий // Машиностроитель. – 1974. – № 1. – С. 21.

169. Овумян Г.Г. Чистовое зубонарезание крупно-модульных колес лезвийным инструментом / Г. Г. Овумян. – Вестник машиностроения. – 1981. – № 2. – С. 52–54.

170. Орлов П. Н. Доводка прецизионных деталей машин / П. Н. Орлов, А. А. Савелова, В. А. Полухин, Ю. И. Нестеров. – М.: Машиностроение, 1978. – 256 с.

171. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента / В. А. Остафьев. – М.: Машиностроение, 1979. – 168 с.

172. Павлице В.Т. Основы конструирования та розрахунок деталей машин / В. Т. Павлице. – К.: Виша школа, 1993. – 556 с.

173. Пат. 2064376 Российская Федерация, МКИ В23 F 5/08, 5/12. Зубообрабатывающий станок / В. Ф. Шаповалов, В. И. Печеный, А. А. Ключко, С. П. Налетов, Н. И. Аристархов, В. Д. Коротков, Г. Н. Руин., Н. А. Лобанов, А. В. Кузнецов. – № 4915857; заявл. 23.01.91; опубл. 27.07.96, Бюл. № 21. – 5 с.

174. Пат. 2082567 Российская Федерация, МКИ В23 F 5/00. Зубообрабатывающий станок / В. Ф. Шаповалов, В. И. Печеный, А. А. Ключко, Г.Н. Руин, С. П. Налетов, Н. И. Аристархов, В. Д. Коротков, Н. А.

Лобанов, А. В. Кузнецов. – № 92009350; заявл. 01.12.92; опубл. 27.06.97, Бюл. № 18. – 6 с.

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

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

177. 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. Худолий, М. А. Ткачук, М. І. Гасанов, Н. М. Павлова, О. О. Ткаченко. – № a2015 10416; заявл. 26.10.2015; опубл. 28.08.2017, Бюл. № 16. – 4 с. : ил.

178. Патент на корисну модель. 34950 Україна, МКП В23F 21/00. Черв'ячна фреза / О. О. Розенберг, В. Я. Рибак, О. А. Мікіщенко [та ін.], заявник і патентоутримувач ТОВ «Укркомплект». – № u200804568 ; дата подання заявки 10.04.2008 ; опубліковано 26.08.2008, бюл. № 16/2008.

179. Перепелица Б. А. Отображение аффинного пространства в теории формообразования поверхностей резанием / Б. А. Перепелица. – Харьков: Выща шк., 1981. – 107 с.

180. Пермяков А. А. Анализ погрешностей технологических процессов обработки отверстий с перекрещивающимися и пересекающимися осями корпусных деталей тяжелых токарных станков / А. А. Премьяков, 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 ім. Івана Пулюя, 2017. – С. 188.

181. 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 «ХПІ», 2017. – С. 48–50. – ISBN 978–617–05–0241.

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

183. Пермяков А.А. Технологические особенности обеспечения точности изготовления корпусов крупногабаритных редукторов / А. А. Пермяков, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, 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.

184. Пермяков А.А. Актуальность дифференцированного и комплексного прогнозирования в условиях имитационного моделирования технологического обеспечения эксплуатационных свойств крупномодульных зубчатых колес / А. А. Пермяков, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, 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.

185. Пермяков А.А. Математическая модель синтеза технологического регламента восстановления функциональных свойств крупномодульных зубчатых передач / А. А. Пермяков, А. А. Клочко, М. И. Гасанов // XIX Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 19–22 червня 2018 р., Національний технічний

університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2018. – Т. 4. – С. 189–192.

186. Петрусеви́ч А. И. Контактная прочность деталей машин / А. И. Петрусеви́ч. – М.: Машиностроение, 1969. – 64 с.

187. Петрухин С.С. Разработка метода многопараметрической оптимизаций режимов резания и геометрии режущей части инструментов / С. С. Петрухин, Н. П. Мазур, Т. В. Исаева // Современные проблемы резания инструментами из сверхтвердых материалов: тез. докл. Всесоюзной конф. – Харьков, 1981. – С. 187–189.

188. Печеный В.И. Оптимизация технологического контроля зубчатых колес и реек / В. И. Печеный, А. А. Клочко, Ю. П. Лобунец // Перспективные направления создания новых и совершенствование существующих конструкций тяжело-нагруженных редукторов и прогрессивная технология их изготовления: тезисы докладов научно-технической конференции. – Краматорск, 1987. – С. 154.

189. Печеный В.И. Устройство для контроля смежных базовых плоскостей реек / В. И. Печеный, А. А. Клочко, О. А. Мороз // Технология и организация производства. – 1986. – № 4. – С. 50.

190. Пронников А.С. Надежность машин / А. С. Пронников. – М.: Машиностроение, 1978. – 590 с.

191. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов / Ю. Г. Проскуряков. – М.: Машиностроение, 1971 – 208 с.

192. Равська Н. С. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці / Н. С. Равська, П. Р. Родін, Т. П. Ніколаєнко, П. П. Мельничук. – Житомир: ЖІТІ, 2000. – 163 с.

193. Равская Н.С. Регламент выбора и назначения параметров обработки при скоростном лезвийном зубофрезеровании / Н. С. Равская, А. А. Охрименко, А. А. Клочко, 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.

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

195. РДМУ109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. Методические указания. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 64 с.

196. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 278 с.

197. Решетов Д.Н. Детали машин / Д. Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1974. – 556 с.

198. Решетов Д.Н. Работоспособность и надежность деталей машин / Д. Н. Решетов. – М.: Машиностроение, 1974. – 232 с.

199. Родин П.Р. Основы проектирования режущих инструментов / П. Р. Родин. – Киев: Вища школа, 1999. – 424 с.

200. 3D-моделирование инструментов, формообразования и съема припуска при обработке резанием / А. И. Грабченко, Н. С. Равская, А. В. Кривошея [и др.] ; ред. П. Р. Родин. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – 304 с.

201. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания / А. М. Розенберг, О. А. Розенберг. – К.: Наукова думка, 1990. – 320 с.

202. Розенберг Ю.А. Развитие теоретических методов расчета сил резания / Ю. А. Розенберг, С. И. Тахман // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении: сб. науч. тр. – Томск: ТПУ, 1997. – 158 с.

203. Розенберг Ю.А. Силы резания и методы их определения. Ч. I. Общие положения / Ю. А. Розенберг, С. И. Тахман. – Курган: КМИ, 1995. – 128 с.

204. Розенберг О. А. Вторую жизнь крупногабаритным зубчатым колесам во многом обеспечил комплект твердосплавных фрез / О. А. Розенберг, В. Я. Рыбак, А. А. Микищенко [и др.] // Инструментальный світ. – Киев, 2000. – Вып. 9. – С. 4–7.

205. Розенберг О. А. Задание, математическое описание и формообразование модифицированных контуров систем зубчатых зацеплений / О. А. Розенберг, А. В. Кривошея, В. Е. Мельник // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов международной научно-технической конференции: (13–18 сентября 2004 г., Севастополь) / Донецкий национальный технический университет. – Донецк, 2004. – Т. 3. – С. 72–73.

206. Розенберг О. А. Задание, математическое описание и анализ формообразования дисковых контуров плоских систем зубчатых зацеплений с модифицированным профилем / О. А. Розенберг, А. В. Кривошея, В. Е. Мельник // Збірник наукових праць національного технічного університету «ХПІ». – Харків, 2005. – Вип. 1(10). – С. 125–134.

207. Розенберг О. А. Анализ и пути совершенствования восстановления крупногабаритных крупномодульных зубчатых передач шаровых мельниц горнообогатительных комбинатов / О. А. Розенберг, В. Я. Рыбак, А. В. Кривошея, В. Е. Мельник, В. В. Лотоус // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения: Сб. науч. трудов ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. – Киев, 2009. – Вып. 12. – С. 484–490.

208. Рудзит Я. А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей / Я. А. Рудзит. – Рига: Зинатис, 1975. – 210 с.

209. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин / Э. В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1966. – 193 с.

210. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э. В. Рыжов. – К.: Техніка, 1984. – 272 с.
211. Рыжов Э.В. Технологическое управление геометрическими параметрами контактирующих поверхностей / Э. В. Рыжов // Расчетные методы оценки трения и износа. – Брянск, 1975. – С. 98–133.
212. Рыжов Э.В. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках / Э. В. Рыжов, Ю. В. Колесников, А. Г. Суслов. – К.: Техніка, 1982. – 172 с.
213. Сидоренко А. К. Особенности изготовления крупномодульных колес / А. К. Сидоренко. – М.: Машиностроение, 1976. – 112 с.
214. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М.: Машиностроение, 1979. – 153 с.
215. Соколовский А.П. Научные основы технологии машиностроения / А. П. Соколовский. – М.; Л.: Машгиз, 1955. – 515 с.
216. Соломенцев Ю. М. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю. М. Соломенцев, В. Г. Митрофанов, С. П. Протопопов. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.
217. Старжинский В. Е. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач / В. Е. Старжинский, М. М. Кане. – С-Пб.: Профессия, 2007. – 832 с.
218. Старков, В. К. Дислокационные представления о резании металлов / В. К. Старков. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
219. 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. – ISBN 987–617–7188–3348.
220. Степанов М. С. Моделювання теплового режиму в технологічній системі охолодження шліфувального верстату / 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.

221. Сулима А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1974. – 255 с.

222. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

223. Сухоруков Ю. Н. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката / Ю. Н. Сухоруков, Р. И. Евстигнеев. – К.: Техника, 1983. – 120 с.

224. Тернюк Н.Э. Оптимизация технологии производства цилиндрических зубчатых колес / Н. Э. Тернюк. – М.: ЦНИИИнформации, 1979. – 30 с.

225. Тимофеев Ю.В. Специальные технологии зубообработки крупномодульных закаленных колес : монография / Ю. В. Тимофеев, В. Ф. Шаповалов, А. А. Ключко [и др.]. – Краматорск: ДГМА, 2011. – 128 с.

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

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

228. Тимофеев Ю. В. Импульсная электроконтактная технология зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов накатными роликами / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Ключко и др. // Вісник Національного технічного університету ДПІ: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Проблеми механічного приводу. – Донецьк: НТУ ДПІ, 2012. – № 9(205). – С. 194–201.

229. Тимофеев Ю. В. Научные предпосылки определения условий формирования величин упрочненного слоя при формообразовании крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Ключко // Вісник Національного технічного університету КПІ: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Проблеми механічного приводу. – Київ: НТУ КПІ, 2012. – № 64. – С. 288–293.

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

231. Тимофеев Ю. В. Технологические особенности обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, Н. В. Кравцов, А. А. Ключко [и др.]. – Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 254 с.

232. Тимофеев Ю. В. Технология обработки крупномодульных зубчатых колес однокорпусными фрезами двухстороннего резания с чередующимися коническими зубчатыми рейками / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, В. Ф. Шаповалов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ ХПІ, 2010. – № 49. – С. 111–116.

233. Тимофеев Ю. В. Основные направления технологического обеспечения производительности, параметров состояния поверхностного слоя и качества зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, А. А. Ключко, Е. В. Мироненко // Вісник Національного технічного університету ДПІ: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Проблеми механічного приводу. – Донецьк: НТУ ДПІ, 2013. – № 10(205). – С. 131–140.

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

235. Трение, изнашивание и смазка / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина: в 2 кн. – М.: Машиностроение, 1978. – Кн. I. – 400 с.

236. Трение, изнашивание и смазка / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина: в 2 кн. – М.: Машиностроение, 1979. – Кн. II. – 358 с.

237. Фейзханов У. Ф. Современные методы автоматизации измерительных и технологических процессов / У. Ф. Фейзханов, Д. А. Таликов // Семинар № 24 симпозиума Неделя горняка-2007. – М.: МГУ, 2007. – С. 334–338.

238. Филиппов В. Л. Режущий инструмент / В. Л. Филиппов. – Л.: Машиностроение, 1981. – 392 с.

239. Часовников Л. Д. Передачи зацеплением / Л. Д. Часовников. – М.: Машиностроение, 1969. – 487 с.

240. Шаповалов В. Ф. О патриархе зубообработки А. К. Сидоренко / В. Ф. Шаповалов, В. И. Печень, А. А. Ключко [и др.] // Вісник Національного технічного університету ХПІ: зб. наук. пр. Тематичний випуск: Проблеми механічного приводу. – Харків: НТУ ХПІ, 2009. – № 20. – С. 3–7.

241. Шамлиев В. К. Выбор и построение структурных схем управления круглым шлифованием по информационным признакам / В. К. Шамлиев, Л. С. Ямпольский // Станки и инструмент. – 1973. – № 8. – С. 5–8.

242. Шатин В. П. Справочник конструктора-инструментальщика / В. П. Шатин, Ю. В. Шатин. – М.: Машиностроение, 1977. – 456 с.

243. Шелковий О. М. Функціональні аспекти імітаційного математичного моделювання геометричних параметрів процесу зубофрезерування / О. М. Шелковий, О. О. Ключко, М. І. Гасанов, Д. О.

Кравченко, О. О. Анциферова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології у машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 26 (1248). – С. 66–74.

244. 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.

245. Шнейдер Ю. Г. Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства / Ю. Г. Шнейдер. – М.: Машиностроение, 1972. – 210 с.

246. Шоу М.С. Новый подход к пластичности и его применение к тупым двухкамерным инденторам / М. С. Шоу, Д. И. Де Сальво // Журнал американского общества инженеров-механиков. Сер. Е. – 1970. – № 3. – С. 30–36.

247. Ямпольский Л. С. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах / Л. С. Ямпольский, М. Н. Полищук. – К.: Техника, 1988. – 175 с.

248. Ямпольский Л. С. Оптимизация управления процессами металлообработки резанием / Л. С. Ямпольский, Е. С. Пуховский, М. Н. Полищук // Системні технології. –12(32). – 2008. С. 152–159.

249. Ящерицын П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск: «Наука и техника», 1977. – 254 с.

250. Albertini H. Gorla, C., Rosa, F. A new approach to repair large industrial gears damaged by surface degradation - The refurbishment using the modification of both the profile shift coefficient and the pressure angle, AGMA 2016 - Fall Technical Meeting, 2016, Номер статьи 16FTM23, Eric C. Ames Repair of High-Value/ High-Demand spiral Bevel Gears by superfinishing, GEAR TECHNOLOGY, 2012, pp. 50-59. www.geartechnology.com.

251. American Gear Manufacturers Association Fall Technical Meeting 2016, AGMA FTM 2016; Sheraton Pittsburgh Hotel at Station Square Pittsburgh; United States; 2 October 2016 до 4 October 2016; Код 125174.

252. Bian Y. Qin, L., Shi, L. Study on active anti-vibration control of large-scale lifting gear. *Zhendong Ceshi Yu Zhenduan/Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis*, Volume 26, Issue 1, March 2006, Pages 49-52.

253. Chen X., Peng, L., Cheng, G., Luo, C. Research on degradation state recognition of planetary gear based on multiscale information dimension of SSD and CNN. *Complexity*, Volume 2019, 2019, Номер статьи 8716979. DOI: 10.1155/2019/8716979.

254. Conrado E., & Gorla, C. (2011). Contact fatigue limits of gears, railway wheels and rails determined by means of multiaxial fatigue criteria. *Procedia Engineering*, 10, 965–970. doi:10.1016/j.proeng.2011.04.159 .

255. Conrado E., Foletti, S., Gorla, C., & Papadopoulos, I. V. (2011). Use of multiaxial fatigue criteria and shakedown theorems in thermo-elastic rolling-sliding contact problems. *Wear*, 270(5-6), 344 –354. doi:10.1016/j.wear.2010.11.004 .

256. Gorla C., Rosa, F., Conrado, E., & Albertini, H. (2014). Bending and contact fatigue strength of innovative steels for large gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 228(14), 2469–2482. doi:10.1177/0954406213519614 .

257. Delgado D. A. (2010). Onsite repair of a large gear reducer for a vertical roller mill. 2010 IEEE-IAS/PCA 52nd Cement Industry Technical Conference. doi:10.1109/citcon.2010.5469774.

258. Dong W., Xing, Y., & Moan, T. (2012). Time Domain Modeling and Analysis of Dynamic Gear Contact Force in a Wind Turbine Gearbox with Respect to Fatigue Assessment. *Energies*, 5(11), 4350–4371. doi:10.3390/en5114350 .

259. Eric C. Ames Repair of High-Value/ High-Demand spiral Bevel Gears by superfinishing, GEAR TECHNOLOGY, 2012, pp. 50-59. www.geartechnology.com.

260. Imthurn Andreas Reliability and investment of large gear pumps in plastics processing. Proceedings of the International Conference on Additives for Polyolefines, 1999, Pages 249-268, Proceedings of the 1999 International Conference on POLYOLEFINS XI; Houston, TX, USA; ; 21 February 1999 до 24 February 1999; Код 55430.

261. 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>.

262. Haertel John R. Rebuilt gear drive often best choice for critical paper mill applications(Article) Pulp and Paper, Volume 65, Issue 7, July 1991, Pages 89-91.

263. Hou H. C., & Wu Y. R. (2014). Dynamic Simulation and Analysis of Large-Scale Gear Reducers. Advanced Materials Research, 939, 530–538. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.939.530 .

264. Hyatt G., Piber, M., Chaphalkar, N., Kleinhenz, O., & Mori, M. (2014). A Review of New Strategies for Gear Production. Procedia CIRP, 14, 72–76. doi:10.1016/j.procir.2014.03.034 .

265. Jantarajunior V.L., Basoalto, H., Dong, H., Marquez, F.P.G., Papaalias, M. Evaluating the challenges associated with the long-term reliable operation of industrial wind turbine gearboxes, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 454, Issue 1, 18 December 2018, Номер статъи 012094 1st International Conference on Materials Engineering and Sciences, IConMEAS 2018; Istanbul Aydin University Istanbul; Turkey; 8 August 2018 до 9 August 2018; Код 143286, DOI: 10.1088/1757-899X/454/1/012094.

266. Kijanka P., Jablonski A., Dziedziech K., Dworakowski, Z., & Uhl, T. (2016). Development of novel general equation for multistage epicyclic gearset with corrected teeth: non-constrained approach. *Smart Materials and Nondestructive Evaluation for Energy Systems 2016*.doi:10.1117/12.2218886 .

267. 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>.

268. Korotkov, A., Korotkova, L., & Vidin, D. (2018). Using Modern Technologies in the Production of Mining Equipment. *E3S Web of Conferences*, 41, 03007.doi:10.1051/e3sconf/20184103007 .

269. Lin X., Wei, J., Lai Y., Qin, D., Zhang A., Ru X. Gear residual strength model and dynamic reliability. *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao/Journal of Harbin Engineering University*, Volume 38, Issue 9, 25 September 2017, Pages 1476-1483, DOI: 10.11990/jheu.201605050.

270. Liu Y. W., & Fan J. (2011). Design of Asymmetric Double Circular Arc Gear for Large-Scale High-Pressure Gear Pumps. *Advanced Materials Research*, 181-182, 361–365.doi:10.4028/www.scientific.net/amr.181-182.361 .

271. Lu Y., Ma R., Li G., Cui, D., Sun, K. Reliability optimization design of bevel gear drive system based on large-scale double-toothed roll crusher. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 423, Issue 1, 6 November 2018, Номер статьи 012157, 2018 4th International Conference on Applied Materials and Manufacturing Technology, ICAMMT 2018; Nanchang; China; 25 May 2018 до 27 May 2018; Код 142231 .DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012157.

272. Pahl G. Reliability and State of Development of Large Gear Drives in Power Plants.(Article) [BEWAEHRUNG UND ENTWICKLUNGSSTAND GROSSER GETRIEBE IN KRAFTWERKEN.] *VGB Kraftwerkstech*, Volume 52, Issue 5, Oct, Pages 404-415..

273. Shapovalov V. Optimizing the technology of reconditioning large high precision gear rims / V. Shapovalov, A. Klochko, M. Gasanov, O. Antsyferova, A. Belovol // The current state of scientific research and technology in the industry. – Kharkiv, 2018. – № 1 (3). – P. 59–70.

274. Yu J. Y., Shi D.W., Li,Z., Yu S. Y.,& Zhang, Y. (2019). Experimental Study on Repairing Large Modulus Rack Cracks by Argon Arc Welding. *Materials Science Forum*, 943, 8–13.doi:10.4028/www.scientific.net/msf.943.8 .

275. Uekita M., & Takaya, Y. (2016). On-machine dimensional measurement of large parts by compensating for volumetric errors of machine tools. *Precision Engineering*, 43, 200 –210.doi:10.1016/j. precisioneng. 2015.07.009 .

276. Wang H., Ma, G., Xu, B., Yong, Q., & He, P. (2017). Design and application of friction pair surface modification coating for remanufacturing. *Friction*, 5(3), 351–360. doi:10.1007/s40544-017-0185-3 .

277. Wang Z., Yu S., Zeng T. On-machine measurement of large-scale spiral bevel gears based on generation principle, *Yi Qi Yi Biao Xue Bao/Chinese Journal of Scientific Instrument*, Volume 30, Issue 8, August 2009, Pages 1739-1744.

278. Xu Y. W. (2012). Research on Machining Simulation of Large Scale Spiral Bevel Gear Machine Tool. *Advanced Materials Research*, 476-478, 610–613.doi:10.4028/www.scientific.net/amr.476-478.610 .

279. Yang L., Zhang, P., & Wang Y. T. (2011). Research on Processing of Large-Size Spiral Bevel Gear CNC Machine Tools. *Applied Mechanics and Materials*, 121-126, 3466–3470.doi:10.4028/www.scientific.net/amm.121-126.3466 .

280. Yan, G., Liu, Z., Zhu, H., Fei, G. Parameter modeling and finite element contact analysis of large scale marine helical gears. *Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of*

Technology (Transportation Science and Engineering), Volume 31, Issue 2, April 2007, Pages 198-201.

281. Yan L., Lixin H., Feng G., Jihao D., Chunjun, W., & Panpan L. (2018). Research on Data Processing Method of Large-Scale Helical Gear On-machine Measurement with Scanning Probe. 2018 57th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE).doi:10.23919/sice.2018.8492692 .

282. Zhang G., Wang G., Li, X., Ren, Y. (2013). Global optimization of reliability design for large ball mill gear transmission based on the Kriging model and genetic algorithm. Mechanism and Machine Theory, 69, 321–336.doi:10.1016/j.mechmachtheory.2013.06.003 .

283. Zheng Y., Chen Y., & Chen Z. R. (2013). Research and Development of Large-Scale Worm Gear Pair Tester Based on Time Grating Displacement Sensor. Applied Mechanics and Materials, 325-326, 730–733.doi:10.4028/www.scientific.net/amm.325-326.730 .

284. Williamson J. B. The Real Area of Contact between Plastically Loaded Surfaces / J. B. Williamson, R. T. Hunt // *Mechanique, Matériaux et Electricité*. Numero special. – L'Usure, 1972. – N 1. – P. 22–25.

Додаток А

ВИДИ ЗНОСУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ЗУБЧАТИХ КОЛЕС

ЗМІСТ

1. Загальні вимоги до вибору і призначенням системи параметрів поверхневого відновлених великогабаритних зубчастих коліс
2. Види зносу і методи технологічного впливу при відновленні великогабаритних зубчастих коліс
 - 2.1. Швидкісне чистове фрезерування.
 - 2.2. Зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозаходний кл.точності А, ГОСТ9324-80.
 - 2.3. Зубошліфування.
 - 2.4. Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликами
 - 2.5. Рентгеноструктурний контроль поверхневого шару
 - 2.6. Основні види пошкоджень
4. Види зносу. .
 - 4.1. Адгезійний, абразивний, полірування, утомленість, фреттинг, кавітаційне
 - 4.2. Заїдання
 - 4.3. Залишкова деформація
 - 4.4. Контактна втома
 - 4.5. Тріщини від термообробки (гартівні тріщини)
 - 4.6 Руйнування зуба

1. Загальні вимоги до вибору і призначення системи параметрів поверхневого відновлених великогабаритних зубчастих коліс

Аналіз параметрів поверхневого шару деталей, теоретичні та експериментальні дослідження контактної жорсткості, коефіцієнта тертя і зносостійкості, герметичності з'єднань і міцності посадок, межа витривалості та корозійної стійкості, наведені вище, показує, що всі розглянуті експлуатаційні властивості характеризуються системою геометричних параметрів: макровідхилення H_{\max} , H_p ; хвилястість W_2 , W_p , $S_m W$; шорсткість R_a (R_z), R_{\max} , R_p , S_m , S , t_p (i_m); їх взаємним становищем при контактуванні ω ; фізико-механічними властивостями поверхневих шарів $H_{\mu 0}$, h_{μ} , $\pm \sigma_0$, h_a ; фізико-механічними властивостями матеріалів деталей E , μ , σ_T і умовами функціонування - величиною і напрямком діючої сили, швидкістю взаємного переміщення і наявністю мастила (табл. А.1). Найважливішими параметрами поверхневого шару деталі, що надають основний вплив на розглянуті експлуатаційні властивості, є H_p , W_p , R_p , S_m , k'_1 ($H_{\mu 0}$).

Оптимальні значення цих параметрів, що забезпечують отримання необхідних експлуатаційних властивостей, можуть бути розраховані з наведених вище формул, визначені експериментально або дослідно-статистично.

Так, при необхідності забезпечення необхідної зносостійкості деталей параметри її поверхневого шару визначають з рівності

$$\frac{H_p W_p R_p^4 k'_1}{S_m^6} = 3375 \left[\frac{\sigma_T E}{\pi(1-\mu^2)} \right]^3 \left(\frac{10/n}{XP} \right)^6 \quad (A.1)$$

При забезпеченні міцності посадок

$$H_{p1} + W_{p1} + R_{p1} + H_{p2} + W_{p2} + R_{p2} = \Delta - \frac{2M}{\pi d l f} \left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_1 + \frac{1 - \mu_2}{E_2} \right) \quad (\text{A.2})$$

Попередньо обчислені значення параметрів стану поверхневого шару деталей машин повинні бути перевірені на технологічність; вибирають то їх поєднання, яке технологічно забезпечується за найменшою собівартістю.

У табл. А.2 наведені оптимальні значення стандартизованих параметрів шорсткості для деяких деталей, що визначають надійність і довговічність машин в цілому.

Моделюючи умови роботи деталей машин і їх з'єднань на експериментальних установках, з урахуванням масштабного фактора можна експериментально визначити оптимальні значення параметрів стану робочих поверхонь зразків, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

Напруження згину викликають поломку зубів, а контактні напруги утомлююче викришування поверхневих шарів зубів. З контактними напруженнями і тертям в зачепленні пов'язані також знос, заїдання та ін. види пошкодження поверхонь зубів.

Втомне викришування від контактних напружень є основним видом руйнування поверхні зубів при змазці передачі. Зуби розділені тонким шаром масла, який усуває металевий контакт. При цьому знос зубів малий. Передача працює тривалий час до появи втоми в поверхневих шарах зубів. На поверхні з'являються невеликі поглиблення, що нагадують оспинки, які потім ростуть і перетворюються в раковини. Викришування починається поблизу полюсної лінії на ніжках зубів там, де навантаження передається однією парою зубів, а ковзання і перекошування зубів спрямовані так, що масло запресовується в тріщини і сприяє викришуванню. При цьому порушуються умови утворення масляної плівки, з'являється металевий контакт з наступним швидким зносом або задиром поверхні. У відкритих передачах викришування не спостерігається, так як поверхневі шари стираються раніше, ніж з'являються тріщини втоми.

Таблиця А.1 - Взаємозв'язок експлуатаційних властивостей відновлених великогабаритних зубчастих коліс з параметрами стану їх поверхневого шару

Експлуатаційна властивість	Геометричні параметри поверхні											Фізико-механічні властивості поверхневого шару			
	Макровідхилення		Хвилястість			Шорсткість						Мікротвердість		Залишкові напруги	
	H_{max} x	H_p	W_z	W_p	$S_m W$	$R_a(R_z)$	R_{max}	R_p	$t_l(tm)$	S_m	S	$H_{\mu 0}$	h_{μ}	σ_0	$h\sigma$
Втомне вищерблення	-	-*	-	-*	-	-	-	-*	+*	+	0	-	0	-	0
Пластичні деформації	+	+*	+	+*	-	+	+	+*	-*	-	-	+	0	-	0
Абразивний знос	-	-*	-	-*	+	-	-	-*	+*	+*	+	+*	0	+*	0
Заїдання	-	-*	-	-*	-	-	-	-*	+	-	-	-*	0	-	0
Поломка зубів	-	-*	-	-*	-	-	-	-*	+*	-	0	-*	0	-	0
Втомна міцність	0	0	0	0	0	-	-*	+	-	+*	0	+*	+*	+*	+*

Примітки: «+» і «-» - збільшення або зменшення цих параметрів викликає, відповідно, збільшення або зменшення даного експлуатаційного властивості, * - параметр, який надає основний вплив на дане експлуатаційне властивість, 0 - параметр, що не виявляє впливу на дане експлуатаційне засіб.

Таблиця А.2 - Оптимальні значення параметрів шорсткості поверхонь відновлених великогабаритних зубчастих коліс.

ступінь точності циліндричних зубчастих коліс ГОСТ1643-81 m = 12-65 мм Z = 80-400 De = 960-8000 мм	Параметри шорсткості, мкм						Чистова, остаточна обробка відновлення великогабаритних зубчастих коліс після наплавлення та попередньої обробки
	Ra, середньоарифметичне профілю	Rz висота нерівностей профілю по 10 точкам	Rmax - найбільша висота профілю	S середній крок місцевих виступів профілю	Sm середній крок нерівностей профілю по середній лінії	tr відносна опорна довжина профілю	
6В ГОСТ 1643-81	0,8- 1,25	6,3	6,3	0,08	0,063	60%	1.Зубошліфування 2.Зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозахідними кл.точності АА, ААА ГОСТ9324-80
7В ГОСТ 1643	1,6- 2,5	10	10	0,16	0,125	50%	1.Зубошліфування. 2.Швидкісне чистове фрезерування. 3.зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозахідними кл.точності А, ГОСТ9324- 80. 4.Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликами
8В ГОСТ 1643-81	3.2-5	20	20	0,20	0,16	40%	1.Зубошліфування 2.Швидкісне чистове фрезерування.

							4.Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликами
9В ГОСТ 1643-81	6,3-10	40	40	0,25	0,20	40%	Зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозахідними кл.точності А, В ГОСТ9324-80
10В ГОСТ 1643-81	12.5-20	80	80	0,32	0,25	30%	Зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозахідними кл.точності В, С ГОСТ9324-80
11В ГОСТ 1643-8	25-40	160	160	0,40	0,32	25	
12В ГОСТ 1643-81	50-80	320	320	0,32	0,40	25	

2. Види зносу і методи імітаційного моделювання при відновленні великогабаритних зубчастих коліс

1. Основні операції для всіх видів зношених і відновлених коліс.

1.1. Наплавлення 3-х шарове.

1.2. Вібростабілізуючий відпуск.

1.3. Попереднє зубофрезерування черв'ячними фрезами з протуберанцем класу точності В, С, ГОСТ9324-80.

2. Полуцистові операції для відновлюваних зубчастих коліс в залежності від виду зносу

Вибір і призначення чистової операції залежить від класу точності циліндричних зубчастих коліс, від твердості поверхневого шару після наплавлення та попередньої зубообробної операції, виду обладнання.

2.1. Швидкісне чистове фрезерування.

2.2. Зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами однозахідними кл.точності А, ГОСТ9324-80.

2.3. Зубошліфування.

2.4. Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликами.

2.5. Рентгеноструктурний контроль поверхневого шару (Табл. А.3).

Таблиця А.3 - Види зносу і методи імітаційного моделювання при відновленні великогабаритних зубчастих коліс

№ п/п	Найменування зносу	Опис зносу ()	Методи імітаційного моделювання при відновленні великогабаритних зубчастих коліс
1.	Абразивне зношування	Механічне зношування матеріалу в результаті ріжучого або дряпає дії на нього твердих частинок.	Твердість поверхневого шару HRC54 ... 60;
2.	Внутрізеренний злам	Злам, що утворюється при руйнуванні по тілу зерна	- Швидкісне чистове фрезерування;
3.	Волокнистий злам	Матова шорстка поверхня руйнування, як правило, з ознаками пластичної деформації. <i>Примітка</i> - Волокнистий злам є ознакою в'язкого руйнування. У мікроструктурі на зламі спостерігаються ямки і фасетки квазіскола	- Зубошліфування; - Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликками.
4.	Викришування	Освіта ямок на поверхні тертя в результаті відділення частинок матеріалу при втомному зношуванні.	Твердість поверхневого шару HRC48 ... 54; - Швидкісне чистове фрезерування;
5.	Виривання	Відділення конгломератів матеріалу неправильної форми від поверхні тертя . <i>Примітка</i> - Виривання - одна з форм катастрофічного зношування. Зазвичай відбувається при схоплюванні	- Зубошліфування
6.	Гідроерозія	Ерозія поверхні матеріалу при впливі потоку рідини	
7.	Глибинне викришування	Відділення частинок матеріалу і утворення ямок на активній поверхні внаслідок поширення тріщин від підповерхневих осередків руйнації.	
8.	Гребінь	Витягнуту ділянку, що підноситься над поверхнею руйнування, образовав-шійся в результаті пластичної деформації і руйнування перемичок між іншими елементами зламу	
9.	Кавітаційно-ерозійне зношування	Складний корозійно-механічний процес, який є наслідком мікроударного впливу рідини на	

		поверхню деталей.	
10.	Квазіскол	Механізм внутрішнього квазікрихкого руйнування, що характеризується рас-рення тріщини переважно шляхом поділу металу по площинах, що не збігається з кристалографічними площинами зерен. <i>Примітка</i> - До особливостей рельєфу при руйнуванні шляхом квазіскола відносяться фасетки квазіскола, гребені, сходинок, язички	
11.	Контактна витривалість зубчастої передачі	Здатність активних поверхонь зубів протистояти дії циклічних контактних напружень протягом заданого числа циклів без переходу в стадію прогресуючого викришування, що приводить передачу до граничного стану.	Твердість поверхневого шару HRC52 ... 56; - Швидкісне чистове фрезерування; - Зубошліфування;
12.	Контактна втома	Процес поступового накопичення пошкоджень і руйнування поверхневих шарів матеріалу під дією циклічних контактних напружень, пов'язаних з утворенням ямок поверхневого або глибинного викришування	-Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликками.
13.	Корозійно-механічне зношування	Зношування в результаті механічної дії, супроводжуваного хімічним і (або) електричним взаємодією матеріалу з навколишнім середовищем.	Твердість поверхневого шару 240 ... 280HV -зубофрезування чистовими черв'ячними фрезами одне за одним кл.точностіА, ГОСТ9324-80; -Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликками.
14	Корозія	Руйнування матеріалу внаслідок його хімічного або електрохімічного взаємодії з навколишнім середовищем	Твердість поверхневого шару HRC48 ... 54; - Швидкісне чистове фрезерування;
15.	Кристалічний злам	Поверхня руйнування, що складається з блискучих плоских ділянок (граней). <i>Примітка</i> - Є ознакою крихкого руйнування. У мікроструктурі спостерігаються фасетки відколу і межзеренного фасетки	- Зубошліфування
16.	Механічне зношування	Зношування в результаті механічних впливів.	Твердість поверхневого шару HRC48 ... 54;

17.	Багатоциклова втома	Механічна втома матеріалу, обумовлена переважно непружними повторно-змінними деформаціями, коли залежність напруга - деформація в одному циклі навантаження являє собою замкнуту петлю механічного гістерезису; характерна в області циклічної довговічності близько 1 105- 5-106 циклів	шару HRC48 ... 54; - Швидкісне чистове фрезерування; - Зубошліфування
18.	Окислювальне зношування	Корозійно-механічне зношування, при якому переважає хімічна реакція матеріалу з киснем або окисляє навколишнім середовищем	Твердість поверхневого шару HRC48 ... 54; - Швидкісне чистове фрезерування; - Зубошліфування
19.	Місце руйнування	Місце зародження руйнування, що оцінюється на зламі	Твердість поверхневого шару HRC48 ... 54; - Швидкісне чистове фрезерування; - Зубошліфування
20.	Поверхнєве вищерблення	Відділення частинок матеріалу і утворення ямок на активній поверхні внаслідок поширення поверхневих місць руйнування	Твердість поверхневого шару 220 ... 240НВ; -зубофрезерування чистовими черв'ячними фрезами одне за одним кл.точностіА, ГОСТ9324-80; - Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликками.
21.	Пошкодження	Подія, що полягає в порушенні справного стану об'єкта при збереженні працездатного стану	Твердість поверхневого шару HRC48 ... 54; - Швидкісне чистове фрезерування; - Зубошліфування
22.	Прогресуюче викришування	Поразка активних поверхонь зубів раковинами усталостного викришування, сумарна площа яких збільшується зі збільшенням числа циклів зміни контактних напружень	Твердість поверхневого шару HRC48 ... 54; - Швидкісне чистове фрезерування; - Зубошліфування
23	Руйнування	Кінетичний процес, що протікає під впливом навантаження і закінчуючим поділом об'єкта на частини.	- Зубошліфування
24	Розшарування	Несплошності, що утворюються	

		вздовж кордонів структурних елементів, орієнтованих у напрямку деформації	
25	Рубці	Лінії на зламі, що представляють собою сліди злиття окремих близько розташованих тріщин, що розповсюджуються в одному напрямку (як правило, від вогнища руйнування)	
26	струмчастий узор	Елемент будови поверхонь фасеток відколу, що представляє собою систему східних сходинок, що утворюється в площині відколу в результаті руйнування перемичок між крихкими мікротріщинами, що поширюються по паралельним, близько розташованих кристалографічних площинах. Примітка - Напрямок злиття сходинок відколу в струмчастому узорі відповідає напрямку розвитку тріщини	
27	скол	Механізм крихкого руйнування, що характеризується поширенням тріщини шляхом поділу (розколювання) металу по певних кристалографічних площинах (внутрізеренний скол) або межі зерен (межзеренного скол), а також по межах субструктурних елементів, міжфазним кордонів. Примітка - При руйнуванні шляхом відколу утворюється мікрорельєф, що складається з фасеток внутрізеренного або межзеренного відколу з ручьистим візерунком і язичками (або без них) і сходинок відколу	
28	Змішаний злом	Поверхня руйнування, що представляє собою поєднання двох або більше видів зламів, що розрізняються за механізмом руйнування	Твердість поверхневого шару HRC54 ... 60; - Швидкісне чистове фрезерування;
29	Схоплювання при терті	Явище місцевого сполучення двох твердих тіл, що відбувається внаслідок дії молекулярних сил при терті	- Зубошліфування; - Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликками.
30	Втомна тріщина	Мікроскопічна або макроскопічна тріщина, що утворилася при впливі на об'єкт повторно-змінного навантаження	

31	Втомне зношування	Механічне зношування в результаті втомного руйнуючої-ності при повторному деформуванні мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару	
32	Втомне руйнування	Руйнування об'єкта шляхом розвитку магістральної тріщини під впливом повторно-змінного навантаження.	
33	Втомний злом	Поверхня розділу, що виникає при втомному руйнуванні об'єкта.	
34	Фасетка	Елемент поверхні руйнування з чіткими кордонами, що лежать в одній або близьких площинах	Твердість поверхневого шару HRC54 ... 60;
35	Фасетка сколу	Фасетка, що утворюється в результаті руйнування по певних кристалографічних площинах (площинах відколу), в межах якої руйнування розвивається в одному напрямку. Примітка - До характерних елементів будівлі ставляться струмчастий візерунок, язички. Наявність фасеток відколу свідчить про внутрішньозерновому крихкому руйнуванні	- Швидкісне чистове фрезерування; - Зубошліфування; - Накатка спеціальними накатними головками з конічними роликками.
36	Фасетка квазісколу	Відносно рівна (плоска) ділянка руйнування, не завжди пов'язана орієнтаційно з площинами відколу і характеризується тим, що поряд з ознаками крихкого руйнування має ознаки пластичної деформації (гребені). Примітка - фасетка квазісколу має менш чіткі межі, ніж фасетка відколу. Руйнування розвивається переважно від центральної частини фасетки до периферії	
37	Фреттинг	Явище контактної взаємодії поверхонь двох твердих тіл в умовах коливального зміщення малої амплітуди.	
38	фреттинг-зношування	Механічне зношування дотичних поверхонь твердих тіл при фреттинг.	
39	фреттинг-корозія	Корозійно-механічне зношування дотичних металевих поверхонь при фреттинг.	
40	фреттинг-втома	Зносо утомлююче пошкодження, обумовлене кінетичною взаємодією явищ механічної	

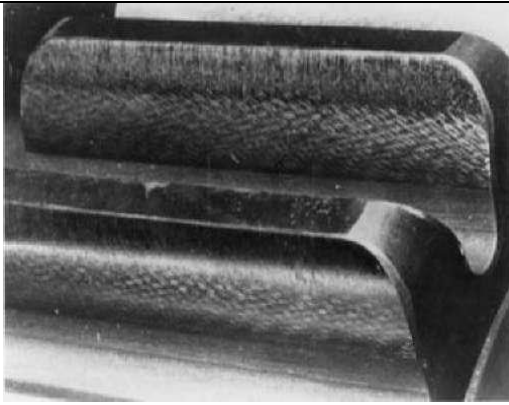
		втоми і фреттинг.	
41	фронт тріщини	Гранична лінія поділу (розриву) матеріалу об'єкта в процесі освіти і зростання магістральної тріщини.	
42	лущення	Розсіяне відділення з поверхні тертя дрібнодисперсних частинок матеріалу в результаті множинного мікроздвигу по пересічних площинах при зносо втомленом пошкодженні твердого тіла.	Твердість поверхневого шару HRC48 ... 54; - Швидкісне чистове фрезерування; - Зубошліфування
43	електроерозія	Ерозія поверхні матеріалу при впливі розрядів при проходженні електричного струму.	
44	ерозія	Явище поступового накопичення пошкоджень в поверхневому шарі твердого тіла при його силовому взаємодії з потоком газу, рідини, твердих частинок, рідких крапель або багатофазного середовища, а також під дією випромінювань або електричних розрядів, яке супроводжується незворотньою зміною фізико-механічних властивостей матеріалу, утворенням тріщин, винесенням маси з поверхні тіла у вигляді окремих частинок, фрагментів або навіть цілих шарів.	

3.Основні види пошкоджень

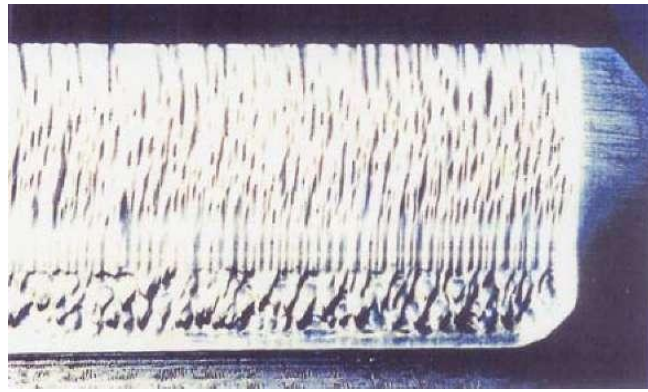
Класифікація пошкоджень зубчастих коліс приведена в табл. А.4. Всі види зносу розділені на шість класів, які, в свою чергу, поділяються на групи по загальному вигляду, характеру і ступеня пошкоджень.

Таблиця А.4 - Класифікація пошкоджень зубчастих коліс приведена

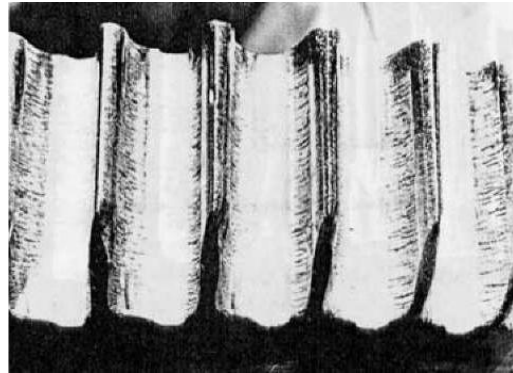
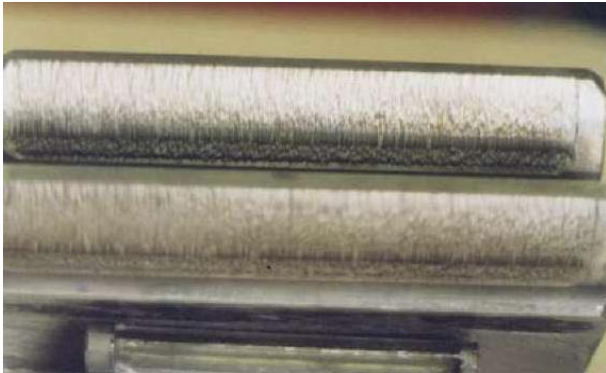
Загальний вид пошкодження	Ступінь пошкодження
<p>Механічне: Адгезионное, Абразивне, Зношування при взаємному впродовженні зубів, Полірування</p> 	<p>Початкове локальне, Помірне, Граничне, Інтенсивне</p>
<p>Загальний вигляд зубів зі слідами адгезійного зносу Початковий локальний знос</p> 	
<p>Помірний знос</p>	<p>Граничний знос</p>
 <p>граничний абразивний</p>	



Початковий абразивний знос на шліфованій бічній поверхні у вершини зуба



Гранично абразивний знос із закріпленими і незакріпленими твердими частинками і мікронерівностями



Граничний абразивний знос

4. Види зносу

Процес зношування являє собою всяка зміна поверхні зубів, що включає в себе видалення або переміщення матеріалу з взаємодіючих поверхонь при механічному, хімічному або іншому зовнішньому впливі. Він включає в себе:

- механічне зношування;
- корозійно-механічне зношування;
- ерозійне зношування.

Процес зношування зубів спостерігається в кожній працюючій передачі. Числовий мірою зношування є знос, який визначається в одиницях довжини, обсягу або маси. Ступінь переділового зносу встановлюється в залежності від призначення передачі, вимог довговічності, шуму і вібрації. Зношування

вважається надмірним при виникненні і розвитку підвищеного шуму, значних динамічних навантажень або значного зменшення товщини зуба, яке може привести до зламу зуба. Так, наприклад, для відкритих зубчастих передач лебідок і транспортерів встановлюється гранично допустима товщина зуба по ділильній окружності не менше 55% товщини зуба біля основи зуба. Для невідповідальних передач зубчасті колеса підлягають заміні при загостренні вершини зуба і зменшенні товщини зуба по ділильній окружності до 45% товщини зуба біля основи. Найбільшому зносу піддаються високонавантажені низькошвидкісні ($V < 0,5$ м / с) зубчасті передачі, що працюють в умовах граничного змащення або її практичної відсутності. Для зубчастих коліс з поверхневою термічною і хіміко-термічною обробкою зубів граничний знос визначається залишається товщиною зміцненого шару, здатної витримувати передану розрахункове навантаження.

4.1 Механічне зношування

Механічне зношування є результатом механічного впливу один на одного взаємно переміщаючих поверхонь зубів, а також абразивного впливу на них сторонніх твердих частинок або відокремилися продуктів зносу.

За фізичним характером процесу розрізняють такі види механічного зношування:

- адгезійне зношування;
- абразивне зношування;
- полірування;
- утомлююче зношування;
- зношування при фреттинг;
- зношування в період пуску під навантаженням;
- кавітаційне зношування.

Адгезійне зношування являє собою процес, що виникає при взаємодії мікронерівностей контактуючих поверхонь зубів. В результаті дії високих

локальних тисків і міжатомних сил зчеплення відбувається з'єднання мікронерівностей, так звана холодне зварювання контактують зубів, подальша пластична деформація при відносному переміщенні зубів, руйнування локальних зчеплень і, в кінцевому рахунку, видалення або перенесення металу. Стан поверхонь зубів зі слідами адгезійного зношування показано на рис. А.1.

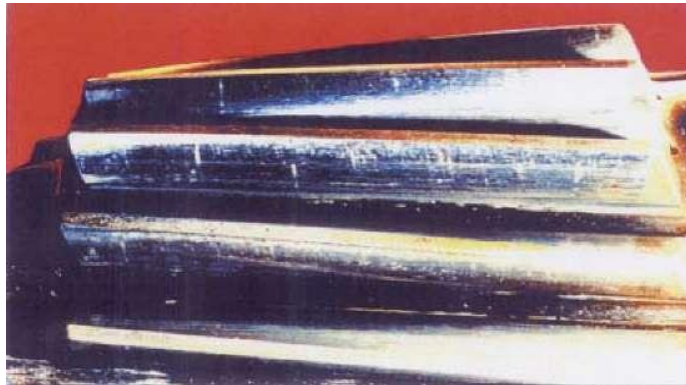


Рисунок А.1 – Загальний вид зубів зі слідами адгезійного зношування

Розрізняють такі ступені адгезійного зношування:

- початкова; - помірна; - гранична.

Граничне адгезійне зношування, що приводить до відмови зубчастої передачі, класифікують як заїдання. Приклади зовнішнього вигляду зубів при адгезійному зношуванні наведені на рис. А.2.

Адгезійне зношування до певної міри розвитку сприятливо позначається на роботі зубчастої передачі, так як за рахунок усунення незначних мікронерівностей робочих поверхонь зубів збільшує фактичну площу контакту і поліпшує умови змащення передачі. Істотний вплив на величину адгезійного зносу надає якість мастила. При правильно підбраному мастилі (її в'язкості, чистоті, робочій температурі, відсутності води і т. П.). Адгезійне зношування має обмежуватися тільки початковою стадією.

Для запобігання розвитку процесу адгезійного зношування рекомендується:

- підвищувати чистоту обробки робочих поверхонь зубів;
- здійснювати приработку передач при частковому навантаженні;
- застосовувати для відповідальних високонавантажених передач азотовану сталь замість цементованої або гартованих об'ємним загартуванням.

Для тихохідних передач при окружній швидкості менше 3 м / хв не рекомендується використовувати масла підвищеної в'язкості з сірчаними і фосфористими добавками.

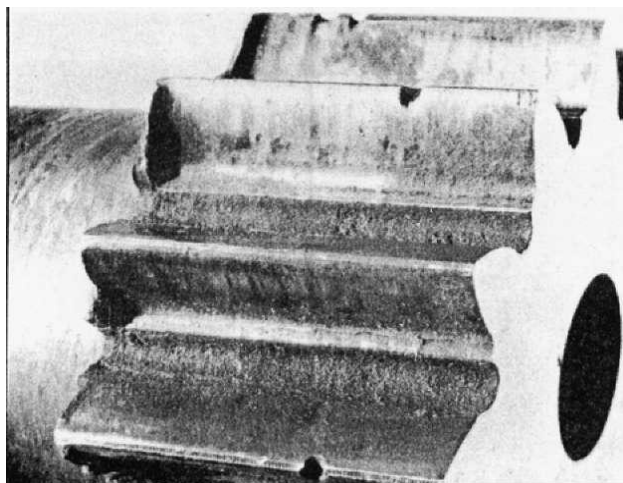


Рисунок А.2 – Граничне зношування -

Початкове адгезійне зношування відбувається під час приробки зубів і, як правило, закінчується видаленням найбільших шорсткостей на поверхні зубів. Неозброєному оку робоча поверхня зубів представляється неушкодженою, причому сліди механічної обробки чітко помітні. При мікроскопічному дослідженні можна спостерігати окремі плоскі мікроділянки між слідами обробившого зубчасте колесо інструменту. При незначному адгезійному зношуванні відокремлюються плоскі пластинки розміром 5 - 10 мкм.

Адгезійне зношування класифікується як помірне, якщо деякі або всі сліди механічної обробки видалені з робочих поверхонь зубів. При певних

умовах адгезійне зношування призводить до безперервного видалення поверхневих плівок і шарів оксидів з поверхності зубів, викликаючи значне зношування.

Абразивне зношування являє собою видалення або зсув матеріалу через наявність в контакті зубів твердих частинок (наприклад, шматочків металу, уламків, іржі, піску, жорстких абразивних частинок і їм подібних), присутніх в мастилі які потрапили між робочі поверхні контактних зубів.

В основі абразивного зношування лежать процеси мікрорізання з відділенням стружки і появленням подряпин за рахунок пластичної деформації зерен, яка супроводжується утворенням відтиснутих навалів попереду рухомої частинки. Ці навали складаються з нетривкого матеріалу з великим числом тріщин і надривів. Знову нанесені подряпини викликають руйнування навалів з відділенням частинок металу. Зовні абразивне зношування характеризується наявністю подряпин або поглиблень, орієнтованих в напрямку ковзання.

Величина зносу при абразивному зношуванні пропорційна твердості робочих поверхонь зубів. Абразивне зношування - типовий вид ушкодження відкритих передач. Наявність абразивного зносу у закритих передачах свідчить про забруднення мастила або пошкодженні ущільнень. Для зменшення абразивного зношування закритих передач рекомендується використовувати фільтрувальні елементи, здатні затримувати частинки розмірами 3 мкм. Застосування цементованих шестерень, висока чистота поверхонь зубів і використання більш вузьких мастил знижують інтенсивність абразивного зношування.

За ступенем розвитку розрізняють:

- початкове абразивне зношування; - помірне абразивне зношування; - граничне абразивне зношування;
- зношування при інтерференції (взаємном впровадженні) профілів зубів.

Початкове абразивне зношування характеризується наявністю нечисленних або неглибоких подряпин або канавок і відсутністю видалення значних обсягів металу з робочих поверхностей зубів. Початкове абразивне зношування показано на рис. А.3.

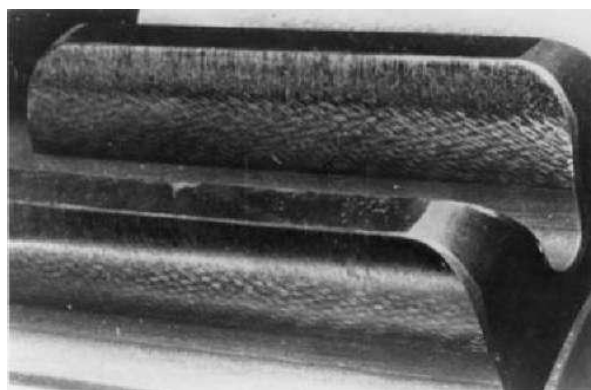


Рисунок А.3 - Початкове абразивне зношування на шліфованій бічній поверхні у вершини зуба

Форма прояву абразивного зношування даного виду характеризується наявністю значних заглиблень в напрямку ковзання зуба. При граничному абразивному зношуванні не тільки вилучені всі сліди механічної обробки з робочої поверхні зубів, але і чітко видно ступені зносу, що відокремлюють цю зону від неробочої поверхні зуба. Товщина зуба в процесі зносу значно зменшена. Іноді спостерігається загострення головки зуба. Розвиток граничного абразивного зношування показано на рис. А.4 – А.7. На рис. А.4 видно, що видалено значну кількість матеріалу з бічних поверхонь зубів; видно глибокі радіальні борозни на ніжках зубів. З ілюстрації граничного абразивного зношування на рисунку 8 видно, що хоча бічні поверхні зубів гладкі, однак видно і радіальні борозенки, утворені твердими частинами на кінцях зубів; у торців спостерігаються сліди пластичної деформації.

Зношування при взаємному впровадженні профілів зубів характеризується зносом на голівці зуба одного з пов'язаних коліс і (або) на

ніжці зуба іншого сполученого колеса, викликаним надлишком матеріалу на голівках зубів зубчастого колеса і на ніжках зубів сполученого колеса.

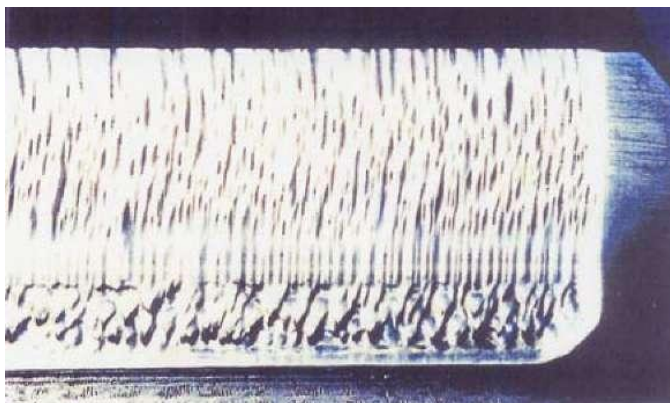


Рисунок А. 4 – Граничне абразивне зношування закріпленими



Рисунок А. 5 – Граничне абразивне зношування

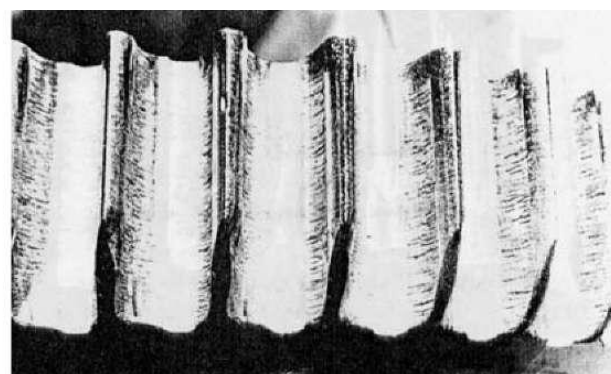


Рисунок А.6 – Граничне абразивне зношування зі слідами пластичної деформації у торців зубів

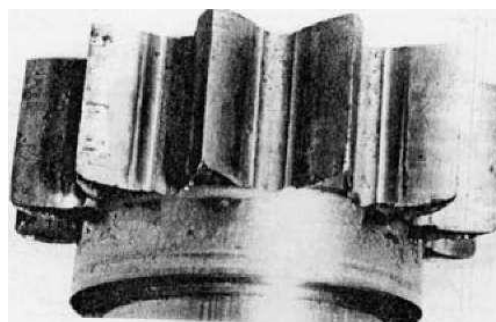


Рисунок А.7 – Граничне абразивне зношування шестерні в результаті інтенсивного зносу бічної поверхні, зменшення товщини зуба до загостреної кромки на вершині зуба

В результаті відбувається дряпання і знос як головок зубів одного з коліс, так і ніжок зубів сполученого колеса, що викликають загострення головок і закруглення ніжок зубів. Має місце при неправильному сполученні зачіпання зубів через їх неправильне виготовлення або неправильне взаємне положення зубчастих коліс передачі.

Полірування являє собою специфічний вид абразивного зносу, при якому шорсткості поступово зношуються і контактні поверхні набувають дзеркального блиску. Полірування викликається хімічними протизадирними присадками в мастилі і забрудненням її дрібними частинками абразиву. В якості таких присадок використовуються добавки, що містять сірку і фосфор. Взаємодіючи з металом зубів при високій температурі в зоні контакту, вони утворюють поверхневі плівки солей сірчаної та фосфорної кислот. При високій активності згаданих присадок і наявності дрібних абразивних частинок ці плівки видаляються з поверхонь зубів і відбувається інтенсивне полірування робочих поверхонь. Поверхня зуба може бути рівною або хвилястою з локальними нерівностями. При збільшенні можна спостерігати дрібні подряпини, орієнтовані в напрямку ковзання. Полірування розвивається в умовах граничного змащення і металевого контакту мікронерівностей поверхонь. Зношування поверхонь призводить до підвищення їх чистоти. Відмінність полірування від звичайного абразивного зношування полягає в більш тонких і коротких канавках, які формуються на поверхні зубів твердими частинками другого контактного зуба, в той же час основною причиною розвитку абразивного зношування є защемлення сторонніх абразивних частинок між контактуючими зубами. У міру віддалення від початкових поверхонь зубчастих коліс канавки стають більшими і більш довгими, внаслідок збільшення швидкостей ковзання. При дослідженні на електронному мікроскопі по краях канавок спостерігається пластична деформація. При зачепленні зубчастих коліс з різною твердістю робочих поверхонь полірування, як правило, відбувається на більш твердих. Зношування при поліруванні є небажаним, оскільки нерівномірне

зношування профілів зубів призводить до спотворення їх первісної форми і зниження точності передачі. На рис. А.8 показаний результат зношування дрібнодисперсним абразивом, провокуємого хімічно активними протизадирними добавками. На рис. А.9 показана конічна шестерня диференціала: видно дзеркально відполіровані бічні поверхні зубів.

Залежно від ступеня розвитку полірування кваліфікують як:

- початкове; - помірне; - інтенсивне.

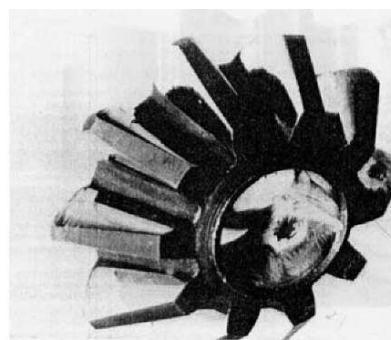
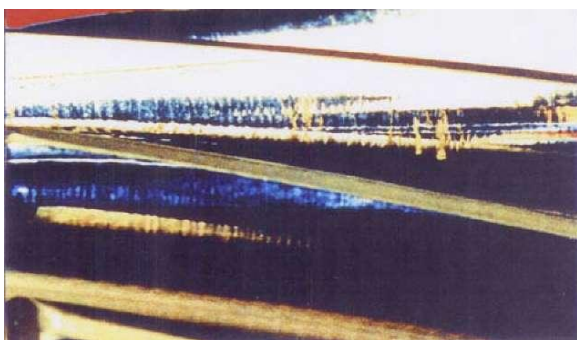


Рисунок А.8 – Полірування

Рисунок А.9 – Початкове полірування

Для обмеження розвитку полірування рекомендується використовувати менш активні присадки до мастил, такі, наприклад, як борат калію, що не взаємодіє з металом зубів. Ефективна фільтрація масла або його періодична заміна також зменшує небезпеку полірування.

При інтенсивній формі розвитку полірування всі сліди механічної обробки видаляються, і на кордонах полірованої робочої поверхні можуть спостерігатися сходинки зносу. Результати опублікованих досліджень свідчать, що при інтенсивному поліруванні внаслідок спотворення первісної геометричної форми зубів через переважний розвиток зносу на голівці і ніжці зубів істотно знижується точність зубчастої передачі, що викликає виникнення підвищених динамічних навантажень і скорочення терміну служби передачі. Розвиток інтенсивного полірування показано на рис. А.10.

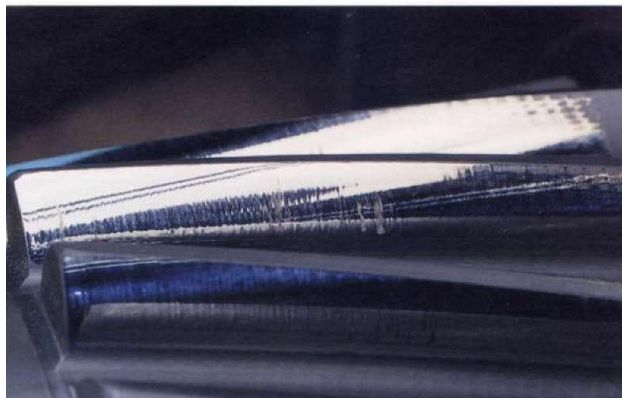


Рисунок А.10 – Інтенсивне полірування

Втомне зношування являє собою механічне зношування в результаті втомленого руйнування при тривалому циклічному навантаженні змінними за величиною зусиллями мікрооб'ємів матеріалу поверхневого шару зубів.

Розрізняють три стадії розвитку процесу втомного зношування:

- інкубаційну; - розпушену; - результуючу.

На інкубаційній стадії під дією сил тертя внаслідок виникнення зон підвищеного нагріву і великих динамічних дій в окремих зернах металу після деякого числа циклів навантаження розвиваються смуги ковзання і в локальних обсягах накопичуються спотворення кристалічної решітки, що приводить до підвищення мікротвердості і жорсткості при зниженні модуля пружності.

На стадії розпушення під дією циклічних дотичних напружень на невеликій глибині відбувається деформація в зоні фактичного торкання поверхонь зубів. У деяких зернах, розташованих в найбільш напружених обсягах, в результаті зрушень з'являються широкі смуги ковзання, в яких зароджуються пори і субмікроскопичення тріщин, що розвиваються до мікро-скопопічних розмірів.

На результуючій стадії відбувається поширення смуг ковзання за межі зерен, зростання мікротріщин до критичного розміру, вихід їх на поверхню, руйнування цілісності поверхневого шару і відділення його мікрочастинок. При пружному контакті поверхонь має місце багатоциклова втома, при

пластичному - малоциклова. Частинки початкового втомленого зносу являють собою плоскі пластинки, товщина яких приблизно в 10 разів менше їх лінійного розміру. Таке зношування називається зношуванням при розшаруванні матеріалу. Відокремлені частки можуть потрапити між зачіплюваними зубами. Характерною особливістю таких частинок є збільшення розмірів до 20 - 50 мкм при збільшенні співвідношення між лінійним розміром і товщиною приблизно до 30, а також наявність наскрізних отворів в частинках зносу. За ступенем розвитку розрізняють:

- початкова (прироботне) зношування;
- помірне зношування;
- граничне зношування;
- зношування при фреттинг.

Цей вид зношування починає розвиватися з самої поверхні зубів приробити до рівного, часто нагадує зношування поліруванням (рис. А.11).

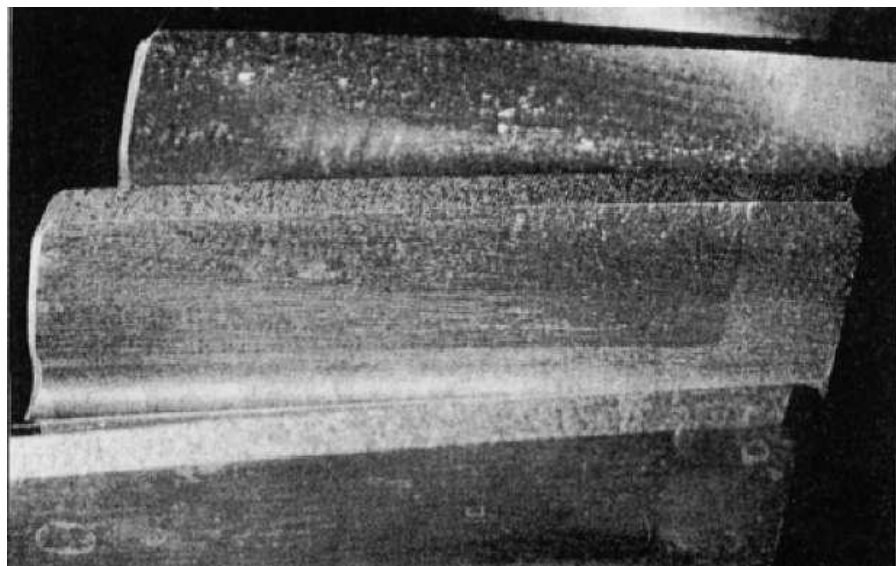


Рисунок А.11 – Початкове зношування

При помірному зношуванні метал видаляється з поверхонь головок і ніжок зубів. Робоча поверхня зуба в зоні ділильної поверхні починає проявлятися у вигляді безперервної лінії. Помірне зношування розвивається

в умовах граничного змащення і є нормальним процесом, незначно знижує працездатність передачі. Помірне зношування поверхонь зубів показано на рис. А.12.

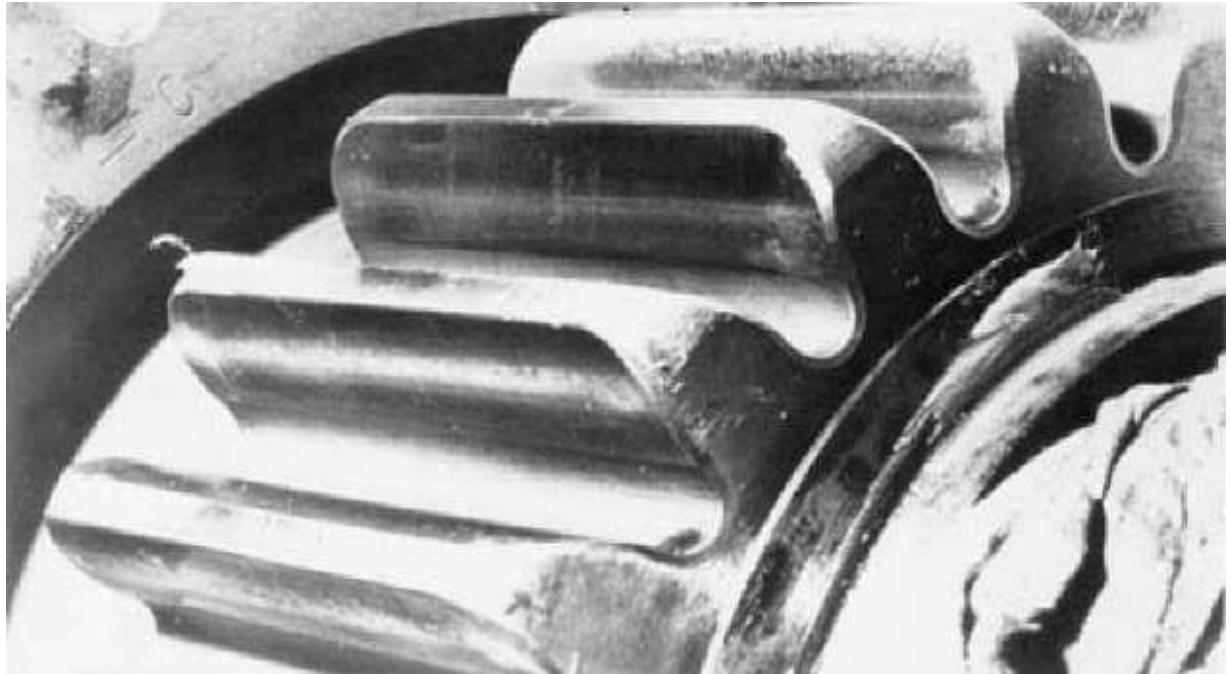


Рисунок А.12 – Помірне зношування

Граничне зношування може проявлятися подібно помірному або абразивному зношуванню. Однак ступінь розвитку зносу такий, що подальша працездатність зубчастої передачі буде практично виключена внаслідок видалення значної кількості матеріалу з робочих поверхонь зубів в області головок і ніжок зубів. Зона початкової поверхні чітко виділяється, форма профілю зуба істотно порушується, що викликає виникнення додаткових динамічних навантажень в передачі і сприяє збільшенню інтенсивності процесу зношування. Граничне зношування поверхонь зубів показано на рис. А.13.

Зношування при фреттинг є механічне утомлююче зношування дотичних тіл при коливальному відносному мікрорусі. Поверхневі ушкодження і мікротріщини, що з'являються в процесі Фреттинг, грають

роль ініціаторів розвитку втомних тріщин при навантаженнях, менших ніж навантаження, що викликають втомний знос.

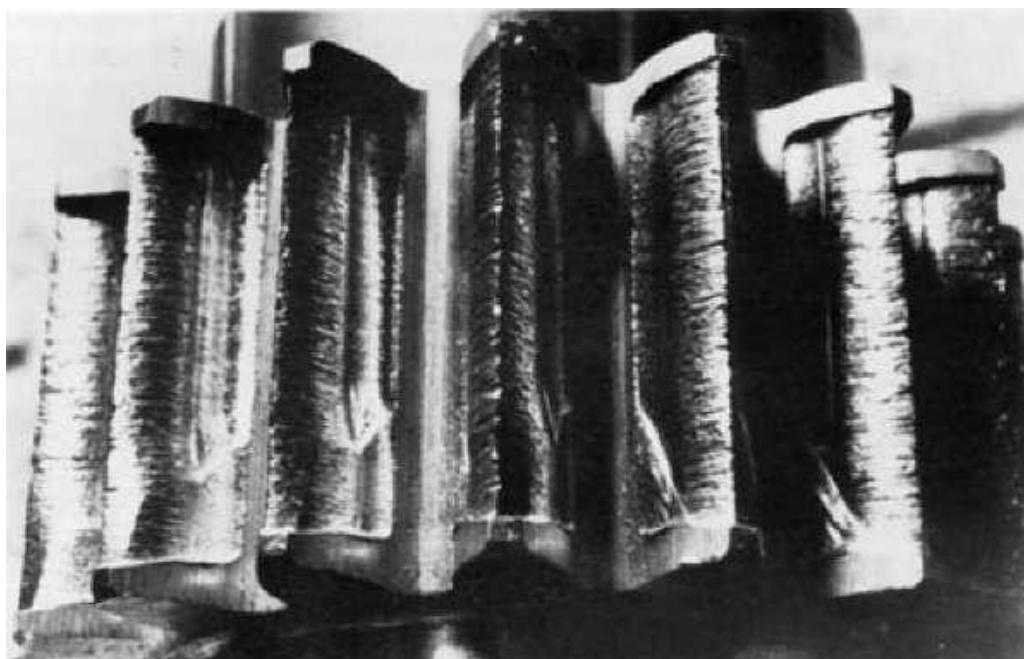


Рисунок А.13 – Граничне зношування

Внаслідок малої амплітуди коливань поверхонь частки зношення не видаляються із зони контакту, сприяючи подальшому розвитку ушкодження. Цей вид зношування може спостерігатися на зубчастих муфтах або на зубах зубчастих коліс трансмісій при динамічному коливальному процесі навантаження, а також в ряді рухомих сполук (зубчасте колесо - вал, підшипник - корпус підшипника і ін.).

Зношування в період пуску під навантаженням є специфічний вид зношування, що виявляється при чисто металевому контакті поверхонь зубів в умовах відсутності мастильної плівки в момент пуску під навантаженням. Найбільш характерний для конічних і гіпоїдних передач. При надмірному навантаженні в момент пуску на зубах поряд зі зношуванням може розвиватися заїдання.

Корозійно-механічне зношування являє собою поступове зношування в наслідок механічної взаємодії контактуючих поверхонь зубів, супроводжуваного довгою хімічною і (або) електрохімічною взаємодією матеріалу з навколишнім середовищем. На швидкість корозії крім хімічного складу і структури матеріалу зубчастих коліс і характеру впливу впливають також робоча температура і відносна швидкість омивання середовищем поверхонь зубів. Зношування цього виду показано на рис. А.14.

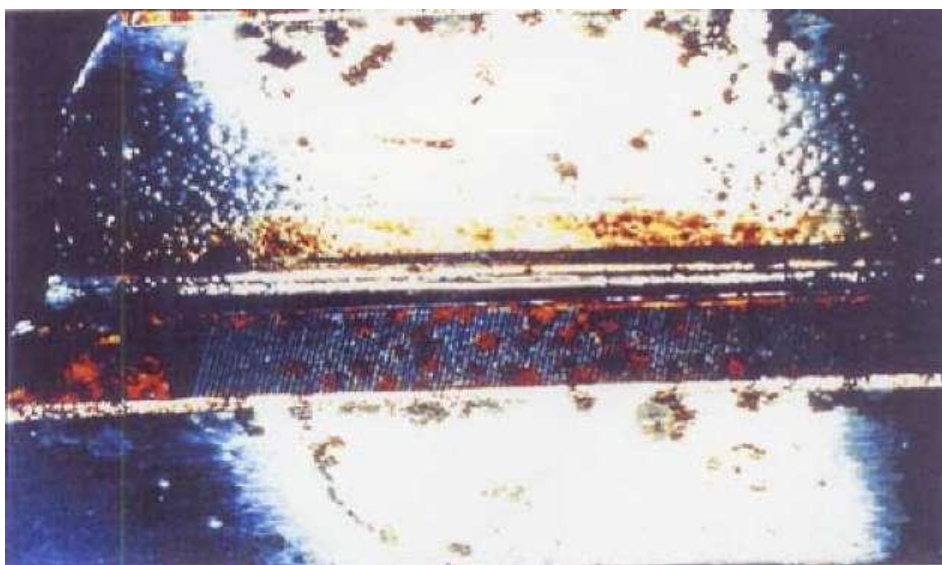


Рисунок А.14 – Корозійно-механічний знос

Слід розрізняти: - хімічне (окисне) зношування; - зношування при фреттинг-корозії.

Хімічне (окисне) зношування являє собою корозійно-механічне зношування, при якому переважає хімічна реакція матеріалу з киснем або окисляється навколишнім середовищем. Виявляється у вигляді дрібних осповидних раковин на всій поверхні зуба і окислення кордонів кристалів. Іноді червонувато-коричневі сліди іржі можуть проявитися по-близькості робочої частини ніжки зуба. Характерною ознакою наявності окисного зношування є присутність оксидів заліза. Для окисного зношування необхідно, щоб проміжок часу між послідовними руйнуваннями плівки

окислів був достатній для виникнення плівки досить великої товщини. Виникнення корозійних раковин може сприяти розвитку викришування або зародженню втомних вигинистих тріщин. Наявність води в мастилi може значно скоротити термін служби зубчастої передачі, викликаючи водневе охрупчування, що сприяє прискореному розвитку втомних тріщин. Відокремлені тверді частини іржі сприяють розвитку абразивного зносу.

Приватними видами окисного зношування є:

Зношування при фреттинг-корозії - це корозійно-механічне поверхневе пошкодження щільно контактують поверхонь, викликане повторюваними, виключно малими переміщеннями однієї контактної поверхні з іншою при наявності корозії. Для збудження фреттинг-корозії достатньо відносні переміщення поверхонь порядку 0,025 мкм. У цих умовах мастило вичавлюється з області контакту, і плівки оксидів на контактуючих поверхнях руйнуються. Пошкодження цього виду полягає в утворенні і виділенні дрібнодисперсних частинок оксидів. Колір продуктів фреттинг-корозії в залежності від марки матеріалу, тиску, вологості і частоти циклів мікрозмішаний в атмосфері повітря може бути від світло-червоного-коричневого до темно-коричневого. Продукти зносу внаслідок малої амплітуди переміщення дотичних поверхонь зубів не можуть вийти із зони контакту, і їх абразивну дію призводить до додаткового пошкодження поверхонь зубів. Фреттинг-корозія проявляється у вигляді специфічних борозенок уздовж ліній контакту. Розвиток фреттинг-корозії може привести до зародження втомних тріщин. Наявність фреттинг-корозії може бути виявлено по різким ударам при роботі передачі.

Заїдання є процес виникнення і розвитку пошкоджень поверхонь зубів внаслідок схоплювання і перенесення матеріалу, обумовлене тертям ковзання в процесі зачеплення зубів. Заїдання спостерігається в тому випадку, коли на ковзаючі одна по одній поверхні діють такі навантаження і температури, а швидкість ковзання і мастило такі, що мастильна плівка між зачіпляються зубами руйнується, що призводить до чисто металевому контакту поверхонь

зубів, локалізованої зварюванні в окремих областях поверхонь, розриву утворилися з'єднань з вириванням і перенесенням металу з однієї поверхні на іншу і приварювання його до іншої. Зони заїдання мають шорстку структуру з розгалуженою текстурою металу або заглибленнями з нерівними краями. Зазвичай пошкодження з'являються в зоні максимального відносного ковзання на голівці, ніжці або на обох елементах зуба, у видаленні від початкової поверхні полюсної лінії у вигляді вузьких або широких смуг, орієнтованих в напрямку вектора ковзання. При нерівномірному розподілі навантаження уздовж контактних ліній заїдання може проявлятися на локалізованих ділянках. При збільшенні поверхню, пошкоджена заїданням, виглядає нерівною з розривами і пластичною деформацією металу.

На відміну від втомного викришування або втомного зламу, що відбуваються при накопиченні певного числа циклів навантаження, заїдання може виникнути в будь-який момент часу роботи передачі, навіть при одиничній перевантаженні. Більш того, нові шестерні проявляють більшу схильність до розвитку заїдання, ніж приробиться під неповним навантаженням. Для запобігання заїдання в період підробітки зуби шестерень піддаються фосфатуванню або медненню.

Основною причиною виникнення заїдання при передачі значних зусиль і високих швидкостях відносного ковзання зубів вважається значне збільшення коефіцієнта тертя ковзання, що викликає істотне підвищення температури в контакті, що призводить до розриву масляної плівки і чисто металевому контакту робочих поверхонь. Заїдання поверхонь зубів відбувається при певній миттєвої критичної температури контакту. Для мінеральних масел без присадок кожне поєднання матеріалу зубчастих коліс і масла має постійне критичне значення миттєвої температурної спалаху, при якій відбувається заїдання. Для синтетичних масел і масел з протівозадірними добавками критична температура заїдання не постійна і залежить від конкретних умов експлуатації передачі.

Більшість протизадирних добавок мають сірчаноокислий і фосфорноокислий склади, які, вступаючи в локальних точках при підвищеній температурі в хімічну реакцію з металом зубчастих коліс, утворюють граничні мастильні плівки. Ці плівки, що складаються з сірчаноокислого заліза і фосфорноокислого заліза, мають високу температуру плавлення і, оберігаючи від чисто металевого контакту зачіпляються зубів, запобігають розвитку заїдання при значному підвищенні температури в контакті. Хімічна реакція з утворенням захисних плівок протікає більш інтенсивно при зростанні температури. Застосування протизадирних добавок запобігають розвитку заїдання шляхом незначної корозії металу. Однак деякі протизадирні добавки, наприклад сірчані, занадто хімічно активні і можуть викликати розвиток полірування. На відміну від них борат калію утворює скловидні граничні плівки, не вступаючи в хімічну реакцію з металом і не викликаючи розвитку полірування.

Підвищення в'язкості масла знижує ризик виникнення заїдання за рахунок збільшення товщини масляної плівки і зменшення температури в чисто металевому контакті поверхонь зубів. Аналогічне зниження ризику виникнення заїдання забезпечує підвищення чистоти робочих поверхонь зубів, що призводить до зниження коефіцієнта тертя ковзання і температури в контакті.

Вибір раціональних параметрів зачеплення (модуля передачі і коефіцієнтів зміщення), що забезпечують зменшення швидкостей ковзання і вирівнювання питомих ковзань на ніжках і голівках зубів, дозволяє понизити температуру в контакті зубів і ризик виникнення заїдання. Цій же меті служить незначне зменшення товщини на ніжці і голівці зубів, що дозволяє понизити навантаження на вході і виході зуба з зачеплення. Підвищення точності виготовлення і монтажу зубчастих коліс сприяє більш рівномірному розподілу навантаження,

Істотний вплив на розвиток заїдання надають хімічний склад і хіміко-термічна обробка сталі. Азотований сталі володіють найвищою опірністю

заїдання, в той час як на зубчастих колесах з нержавіючої сталі можливий розвиток заїдання навіть при практичній відсутності корисного навантаження. Утворений на зубчастих колесах з нержавіючої сталі твердий і крихкий тонкий шар окислів здатний руйнуватися при незначних каса-них навантаженнях, що призводить до виникнення чисто металевого контакту і розвитку заїдання.

Наявність парів в корпусі закритою передачею, а також присутність в мастилі металевих частинок або води підвищує ризик виникнення заїдання.

При аналітичному розрахунку на запобігання заїдання Міжнародна організація по стандартизації (ISO) рекомендує використовувати два основні методи: розрахунок по температурі спалаху і розрахунок за інтегральною температурі. Перший метод використовують при розрахунку турбінних передач, другий отримав поширення при розрахунку автомобільних трансмісій.

Розвиток заїдання характеризується порушенням геометрії контактуючих поверхонь зубів, збільшенням споживаної потужності, динамічних навантажень в зачепленні, шумом і вібрацією.

За ступенем розвитку заїдання класифікується як:

- початкова (локалізоване);
- помірне;
- катастрофічне.

Заїдання класифікується як початкове, якщо воно виникає тільки на невеликих ділянках зубів і обмежується видаленням тільки виступаючих піків шорсткості поверхні. Заїдання на невеликих областях поверхонь зубів, головним чином на голівках і ніжках зубів, може мимоволі усунутися в процесі роботи і не впливає на працездатність передачі. Початкове заїдання, як правило, присутня на зубчастих колесах конічних передач вантажних автомобілів і тракторів. Приклад розвитку заїдання такого виду показаний на малюнку 28. Мікрофотографії поверхні зі слідами заїдання, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа, наведені на рис. А.15.

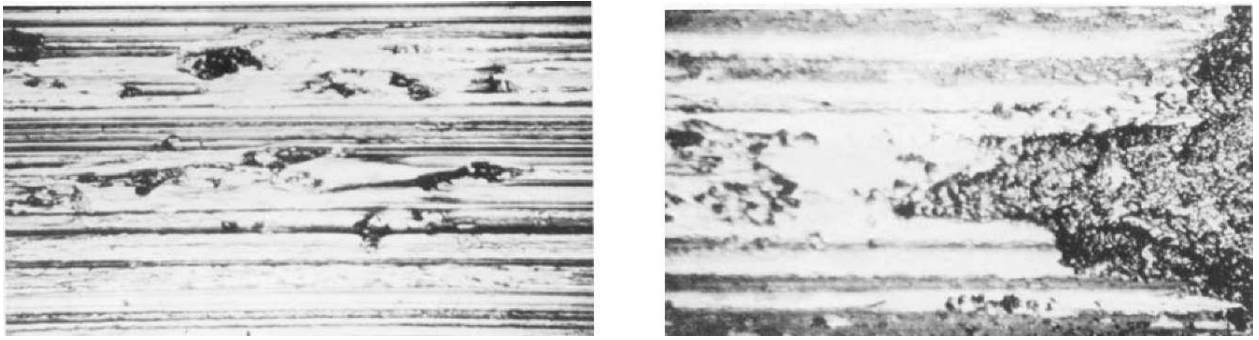


Рисунок А.15 – Мікрофотографії поверхонь зубів зі слідами заїдання
 а) Пошкодження заїданням - шорстка, з вириваючі, б) Пошкодження заїданням - кратер, утворений пластично деформована поверхня в момент видалення приварившогося до поверхні матеріалу

4.3. Залишкова деформація

Залишкова деформація являє собою зміну первісної форми зубів під впливом високих навантажень, що викликають виникнення напружень, що перевищують межу пружності матеріалу.

Залишкова пластична деформація може спостерігатися на робочій поверхні зуба і під нею при високих контактних напругах або на галтелі (біля основи) зуба при високих вигинистих напружених.

Розрізняють такі види залишкової деформації:

- впровадження;
- пластичну.

Впровадження характеризується пошкодженням бічних поверхонь зубів, викликаним попаданням в зачеплення сторонніх металевих предметів.

Такими предметами можуть бути уламки окремих зубів, тіл кочення підшипників, кріпильних деталей і т. П.

Пошкодження закритих передач цього виду носить вторинний характер, т. Е. Відбувається після первинного ушкодження деталей редуктора.

У відкритих передачах при попаданні сторонніх металевих предметів він може мати і первинний характер, як це показано на рис. А.16 і А.17.

Вибоїни на кількох зубах шестерні внаслідок попадання в зачеплення металевих частинок показані на рис. А.17.

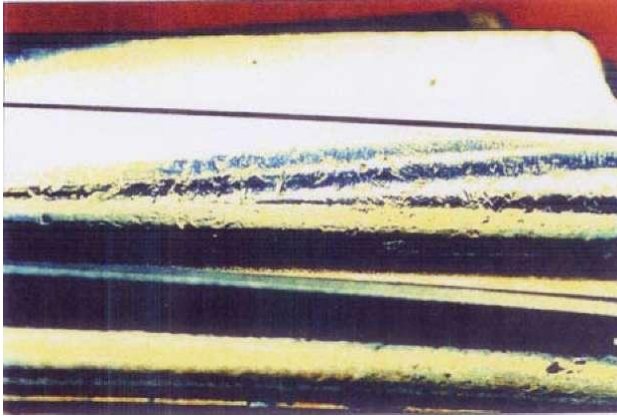


Рисунок А.16 – Впrowадження Рисунок А.17 – Катастрофічне впrowадження

Пластична деформація - це деформація, що залишається після видалення прикладеного навантаження в тому випадку, коли діючі напруги перевищують межа плинності матеріалу зубчастих коліс.

Зуби можуть бути зігнуті, на них можуть з'явитися поглиблення від ударів зубів сполученого зубчастого колеса, або матеріал з поверхні зубів може бути видалений при надмірно високих на-навантаженнях і підвищеному терті.

Види пластичної деформації розрізняють за рівнем температури, при якій відбувається пластична деформація, характером взаємодії зубів і характером прояву пошкоджень. За рівнем температури:

- пластичну деформацію при холодній плинності матеріалу;
- пластичну деформацію при гарячій плинності матеріалу. За характером

взаємодії зубів:

- при коченні;
- при ударі зубів.

За характером прояву пошкоджень:

- брижі;
- освіту гребенів і вм'ятин;
- освіту задирок.

Розрізняють також такі специфічні види пластичної деформації:

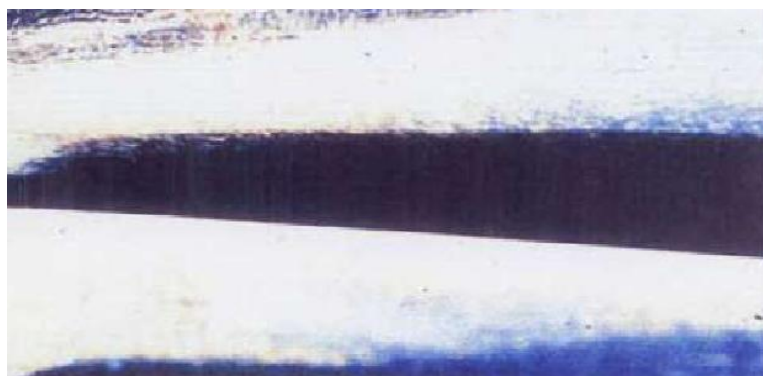
- пластичну деформацію біля основи зуба;
- інтерференцію зачіпляються зубів.

Пластична деформація даного виду, показана на малюнку 35, може спостерігатися в разі, коли робоча температура в зачепленні нижче температури рекристалізації матеріалу (рис. А.18).

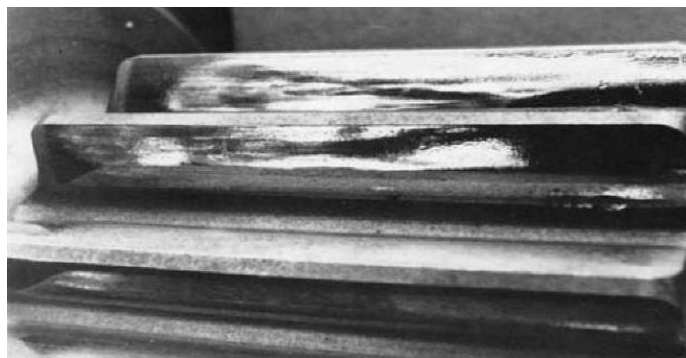


Рисунок А.18 – Пластична деформація при холодній плинності матеріалу (при температурі нижче температури рекристалізації)

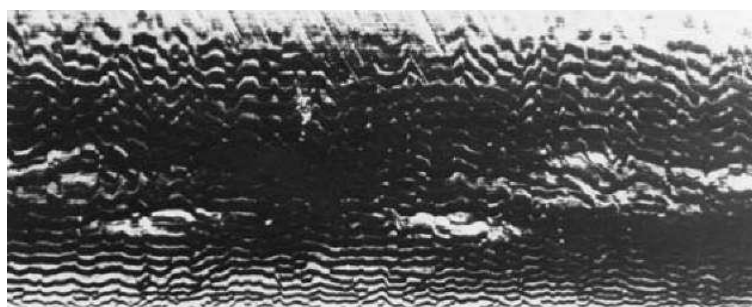
На бічних поверхнях зубів утворюються хвилясті невеликі канавки, що поширюються перпендикулярно до напрямку ковзання. Відносне розташування цих канавок вздовж лінії зуба за зовнішнім виглядом нагадує луску риби або брижі на поверхні води. Брижі зазвичай з'являється при високому контактному тиску і граничних умовах змащення. Брижі асоціюють з пластичною деформацією, але це може бути також своєрідною формою зносу. Приклади освіти брижі показані на рис. А.19.



а)



б



в)

Рисунок А.19 – Приклади утворення брижі на робочих поверхнях зубів:
 а) періодична хвилеподібна деформація; б) брижі в області правих кінців
 зубів, навантажених на робочих поверхнях, піки хвиль перпендикулярні більш
 високим навантаженням; брижі з'являється після до напрямку ковзання
 інтенсивного полірування робочих поверхонь; в) виражена текстура поверхні,
 пошкодженої брижами

Ушкодження у вигляді освіти гребенів і вм'ятин на бічних поверхнях
 зубів з'являються в результаті пластичної деформації і зносу.

Ця форма пошкодження найбільш часто проявляється на зубах зубчастих коліс, які працюють при малих швидкостях обертання зі значними складовими швидкості ковзання (наприклад, в черв'ячних і гіпоїдних передачах). Зазвичай розвивається на зубчастих колесах з низькою поверхневою твердістю.

Якщо вигинаючі напруги на перехідній поверхні зуба перевищують межу плинності матеріалу, зуб може відхилитися від теоретично правильного початкового положення, що в разі раз-витку цього процесу навіть на одному з коліс зачіпляються пари викличе інтерференцію зачіпляються зубів і може привести до їх подальшої поломки, як це видно з рис. А.20.



Рисунок А.20 – Пластична деформація зуба біля основи

Пластична деформація, адгезія і абразивний знос можуть викликати інтерференцію (впровадження) вершини зуба одного колеса в западину іншого.

Причиною інтерференції можуть бути похибки робочих профілів зубів, недостатні розміри радіального зазору, неадекватні параметри профільної модифікації, похибки кроку зубів або похибки міжосьової відстані. Приклади пошкодження зубів при впровадженні вершини зуба одного з пов'язаних коліс в западину між зубами іншого сполученого колеса показані на рис. А.21.

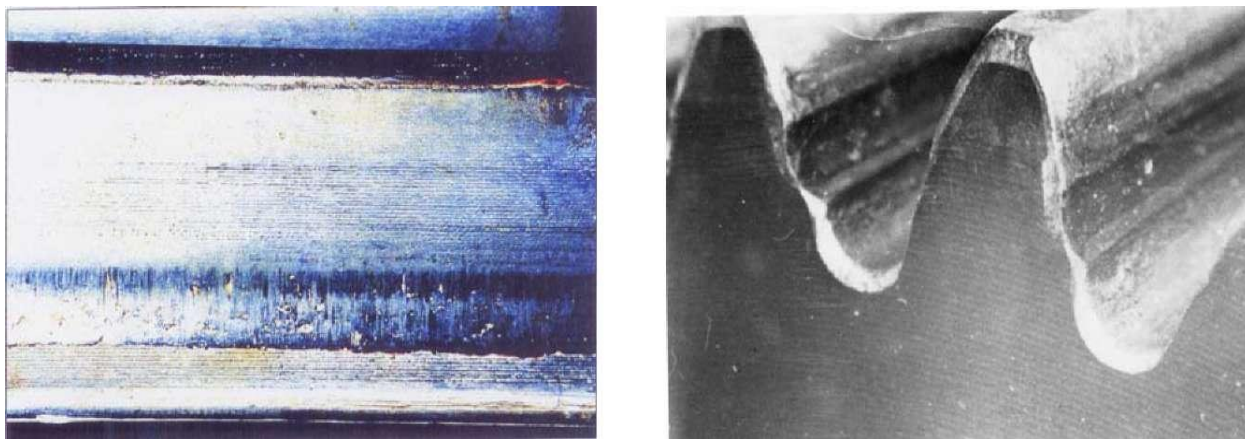


Рисунок А.21 – Інтерференція

4.4 Контактна втома

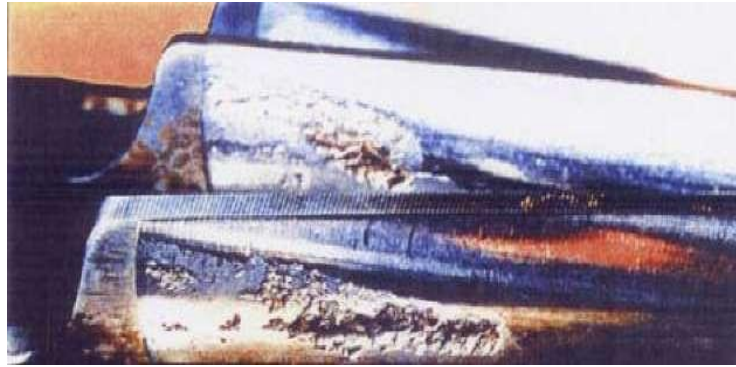
Контактна втома - це вид ушкоджень, що розвиваються під дією поверхневих та підповерхневих напружень, багаторазово що виникають в процесі контактної взаємодії зубів. Пошкодження характеризуються видаленням металу і утворенням раковин на поверхнях зубів. Ці ушкодження усталостного характеру слід відрізняти від пошкоджень при зносі. Розрізняють такі види прояви контактної втоми:

- поверхнєве утомлююча вищерблення;
- мікрівикрашіваніє;
- луцення;
- відшаровування;
- глибинне утомлююча викришування.

При повторних впливах контактних напружень, що виникають кожного разу при вході зуба в зачеплення, відбувається зародження і зростання втомних мікротріщин на поверхні або на невеликій глибині під поверхнею. Поява тріщин зумовлено недостатньою товщиною мастильного шару і металевим контактом окремих виступів поверхонь зубів, а також концентраторів напружень у вигляді окремих слідів ріжучого інструменту. Тріщини можуть зародитися від неметалічних включень, що містяться в сталях, або дефектів упрочнюючої оброблення. Як правило, тріщини

поширюються на незначну відстань в напрямку, паралельному початкової поверхні зубчастого колеса, а потім починають повертатися або галузитися. При значному зростанні окремих тріщин і їх подальше об'єднання відбувається відділення від поверхні пошкодженого шару мікрообсягу матеріалу і утворення мікрораковин. Раковини мають, як правило, конусоподібний вигляд. Біля кордонів раковини можна спостерігати втомні тріщини. При мікроскопічному дослідженні на дні раковини помітні хвилеподібні виступи, звані смугами втоми, кожна з яких відповідає зростанню тріщини за один цикл навантаження. Окремі початкові раковини викришування розташовуються переважно вздовж однієї прямої лінії на ніжці зуба. Потім з'являються окремі раковини вздовж іншої лінії, віддаленої від першої на певній відстані. Подальше зростання раковин супроводжується їх злиттям і збільшенням площі пошкодженої поверхні, що охоплює в кінцевому рахунку весь простір між зазначеними лініями. Для підвищення опору усталостному викришування зуби шестерень повинні мати високу твердість поверхні і відносно м'яку серцевину. Найбільшим опором усталостному викришуванню мають нітроцементіровані зубчасті колеса. Цей процес хіміко-термічної обробки, поряд з цементацією, широко застосовується в машинобудуванні.

Використання підвищеної чистоти поверхонь зубів, а також багатою подачі чистої охолодженої мастила з високим коефіцієнтом в'язкості забезпечує отримання масляної плівки достатньої товщини, що уповільнює процес розвитку втомного викришування. Підвищення якості сталей за рахунок вакуумного переплаву зменшує можливу кількість неметалічних включень і підвищує опір усталостному викришуванню. Нанесення тонких пористих покриттів карбиду вольфраму сприяє підвищенню контактної витривалості, зносостійкості і корозійної стійкості робочих поверхонь зубів. Наявність води або абразивних частинок в мастилі сприяє розвитку втомного викришування. На рис. А.22 наведено мікрофотографії робочої поверхні, отримані за допомогою скануючого електронного мікроскопа.



0,058 мкм

Рисунок А.22 – Розвиток тріщин усталостного викришування

Для запобігання втомного викришування рекомендується:

- зменшувати контактні напруги на зубах шляхом вибору раціональної геометрії зубчастих коліс;
- використовувати високоякісні сталі, забезпечувати відсутність дефектів термічної і хіміко-термічної обробок, що знижують контактну міцність поверхневого шару, використовувати комбіновані зміцнюючі обробки із застосуванням поверхнево пластичного деформування і забезпеченням рівномірного розподілу твердості не нижче 58 IPO;
- підвищувати чистоту обробки поверхонь зубів;
- забезпечити ефективне надходження в зачеплення достатньої кількості чистої, охолодженої мастила відповідної в'язкості.

За ступенем розвитку втомного викришування розрізняють:

- початкова вищерблення;
- прогресуюче викришування.
- мікро-вищерблення.

Початкове вищерблення характеризується появою дрібних раковин діаметром менше 1 мм, глибиною не більше $0,7\sqrt{bH}$ (bH - полушпірина площадки контакту, що визначається з рішення контактної задачі теорії пружності). Початкове вищерблення може відбуватися в результаті нерівномірного розподілу навантаження по довжині контактної лінії, в зоні

розташування дефектів металу або зміцнюючих обробок. Зазвичай окремі початкові раковини викришування розташовуються уздовж прямої лінії в одній локалізованій зоні на ніжці зуба. Часто в разі усунення нерівномірності контакту і більш рівномірного розподілу навантаження ніякого подальшого зростання викришування не відбувається. Як показано на рис. А.23, початкове викришування на зубах зубчастих коліс можуть з'являтися і на самому початку експлуатації, навіть при заробляння з зменшеним навантаженням. Ямки викришування, розвиток яких було призупинено після згладжування вершин гребенів шорсткості, не отримують подальшого розвитку в зв'язку з більш рівномірним розподілом навантаження.

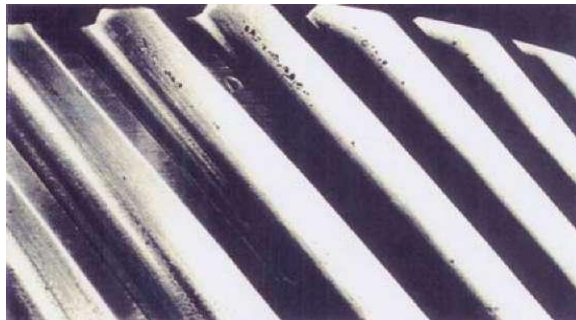


Рисунок А.23 – Приклад появи ямок початкового усталостного викришування

Прогресуюче викришування - це викришування, яке продовжує розвиватися в міру збільшення терміну служби передачі.

Прогресуюче викришування (рис. А.24) характеризується безперервним збільшенням ступеня пошкодження активних поверхонь зубів, зменшенням фактичних розмірів контактних майданчиків і значним збільшенням навантаження на збережені ділянки. Далі при утворенні одиничних ямок глибинного викришування при експлуатації відбувається інтенсивний розвиток ушкоджень і перехід зубчастих коліс в граничний стан, після досягнення якого подальша експлуатація пов'язана з раптовою втратою працездатності та виходом передачі з ладу. Тому прогресуюче викришування є неприпустимим насамперед для поверхнево-зміцнених зубчастих передач,

які широко застосовуються в автомобільних, тракторних трансмісіях і приводах. Прогресуюче вищерблення характеризується двома параметрами - відносною площею пошкоджень і глибиною ямок викришування, яка визначається з умови $L > 0,8\delta_n$.

У випадках, коли глибина раковин перевищує глибину зміцненого поверхневого шару, можливо виникнення і розвиток втомних тріщин, що призводять до поломки зубів. Тому для таких зубчастих коліс необхідно вводити вибракування зубчастих коліс в разі, коли глибина хоча б однієї раковини перевищує значення 0,7 - 0,8 ефективної глибини зміцненого шару. Іноді можуть існувати проміжні періоди обмеження розвитку викришування, які супроводжуються періодами його подальшого розвитку, як показано на рис. А.24.

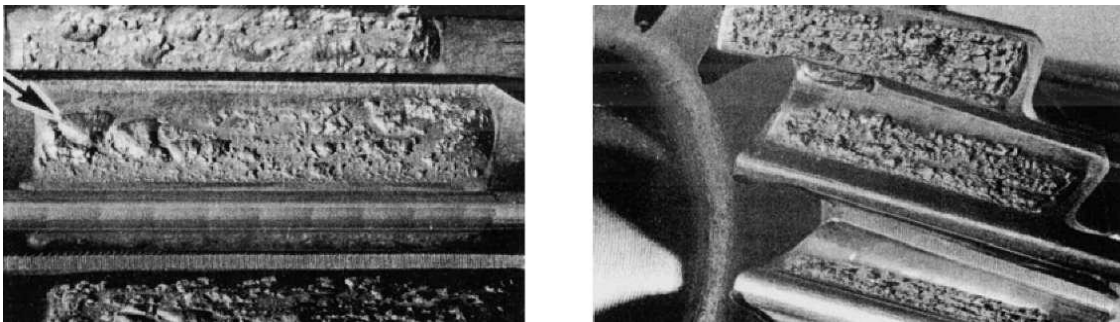


Рисунок А.24 – Приклади прогресуючого поверхневого викришування

Мікро-викришування є поверхневе утомлююча викришування, що викликається циклічними контактними напруженнями і пластичною деформацією мікронерівностей контактуючих поверхонь. Мікро-вищерблення починається в виступаючих мікрооб'ємах контактуючих поверхонь, таких як гребені, сліди різання або шліфування зубів, а також на кордонах поверхневих дефектів. У перші сотні циклів навантаження має місце інкубаційний процес розвитку мікротріщин, протягом якого відбувається пластична деформація мікровиступів під дією дотичних напружень, що виникають при відносному ковзанні зубів. При цьому під

мікровиступів утворюються мікропорожнечі, в яких зароджуються підповерхневі втомні тріщини. При подальшому збільшенні числа циклів навантаження відбувається зародження, швидке зростання втомних мікротріщин під поверхнею зуба, їх подальше злиття і вихід на поверхню з утворенням мікрораковини. Мікроскопічне дослідження показує, що на робочій поверхні зубів утворюється ціла мережа втомних мікротріщин, при розвитку і об'єднання яких виникають втомні мікрораковини. Розміри окремих мікрораковин і їх товщина не перевищують 10 мкм (Рис. А.25). Подальший розвиток мікротріщин призводить до утворення густої сітки численних мікрораковин глибиною не більше 20 мкм і мікротріщин приблизно такої ж глибини, що надає робочій поверхні зубів матовий вигляд, що нагадує іній. Тріщини нахилені до поверхні під кутом менше 45° . Раковини мікротріщин розташовуються уздовж уявних ліній, що з'єднують вищі виступи на поверхні зубів. При наявності періодично розташованих гребенів.

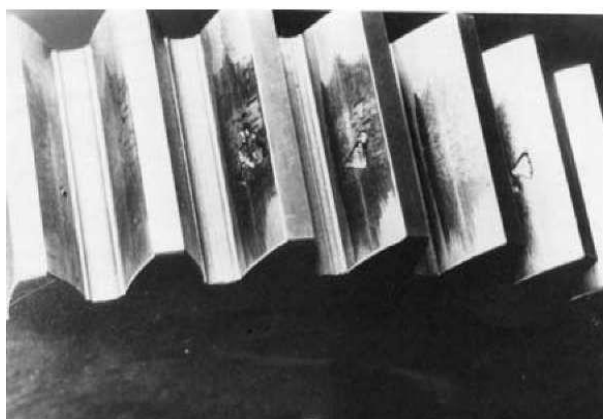


Рисунок А.25 – Фрагменти бічної поверхні зубів, пошкодженої луценням раковини розташовуються такими ж періодичними рядами.

Мікро-вищерблення може також виникати на кордонах пошкоджень інших видів, таких як утомлююча викришування або заїдання. Хоча мікротріщини проявляється в основному на ніжках зубів на нижній межі робочої поверхні зуба або в зоні нижньої межі однопарний зачеплення, його

прояв на голівках зубів також дуже типово, причому зона початкового кола, як правило, залишається неушкодженою. Найбільш часто втомним мікрівикрашіванієм уражаються ніжка зуба провідної шестерні і головка зуба веденого колеса. Спостережуване відмінність у розвитку мікро-викришування на зубах одного зубчастого колеса може бути пояснено похибками геометрії або неоднаковою шорсткістю поверхонь зубів. Для передач, у яких числа зубів кожного з зачіпляються зубчастих коліс мають загальні дільники, однакове розвиток мікро-викришування може спостерігатися на зубах, віддалених один від одного на величину, відповідну цим загальним делителям. Наприклад, в передачі з числом зубів 18 і 24 однакове розвиток процесу мікро-викришування може спостерігатися з інтервалом в 6 зубів. Само по собі розвиток мікро-викришування не викликає катастрофічного пошкодження зубчастих коліс і може зникнути в процесі підробітки зубів. Однак наявність мікро-викришування зменшує точність зубчастої передачі, збільшує її шум і при зростанні числа циклів навантаження до 1 млн може привести до подальшого розвитку втомного викришування і втрати передачею працездатного стану. Критичним параметром, що визначає розвиток мікро-викришування, є відносна товщина мастильної плівки, що представляє відношення товщини плівки до суми мікро-нерівностей контактуючих поверхонь зубів. Недостатня в'язкість масла викликає зменшення товщини мастильної плівки і сприяє розвитку мікро-викришування. Збільшення в'язкості масла робить позитивний вплив на товщину масляної плівки і опір розвитку мікро-викришування. Однак надмірна в'язкість масла викликає значні втрати енергії в зачепленні, істотне підвищення робочої температури і розвиток окисного зношування зубів. Наявність води в мастилі істотно знижує опір мікро-викришування. Розвиток мікро-викришування, як правило, відбувається на низькошвидкісних передачах з недостатньою чистотою поверхонь зубів, особливо при мастилі маслом з недостатньою в'язкістю. Підвищення чистоти робочих поверхонь, приробітку зубів, а також застосування масел з підвищеною в'язкістю і

спеціальними добавками сприяють усуненню цього виду ушкодження. Застосування спеціальних покриттів зубів у вигляді залізо-марганцевого фосфатирування або меднення сприяє підвищенню чистоти поверхонь зубів і запобігання розвитку усталостного мікро-викришування. Для усунення відокремлених при мікро-викрашування частинок і їх впливу на розвиток ушкоджень зубів потрібна установка масляних фільтрів з підвищеною фільтруючою здатністю. Приклади поверхонь з ушкодженнями мікро-Викришування характерних видів наведені на рис. А.26.

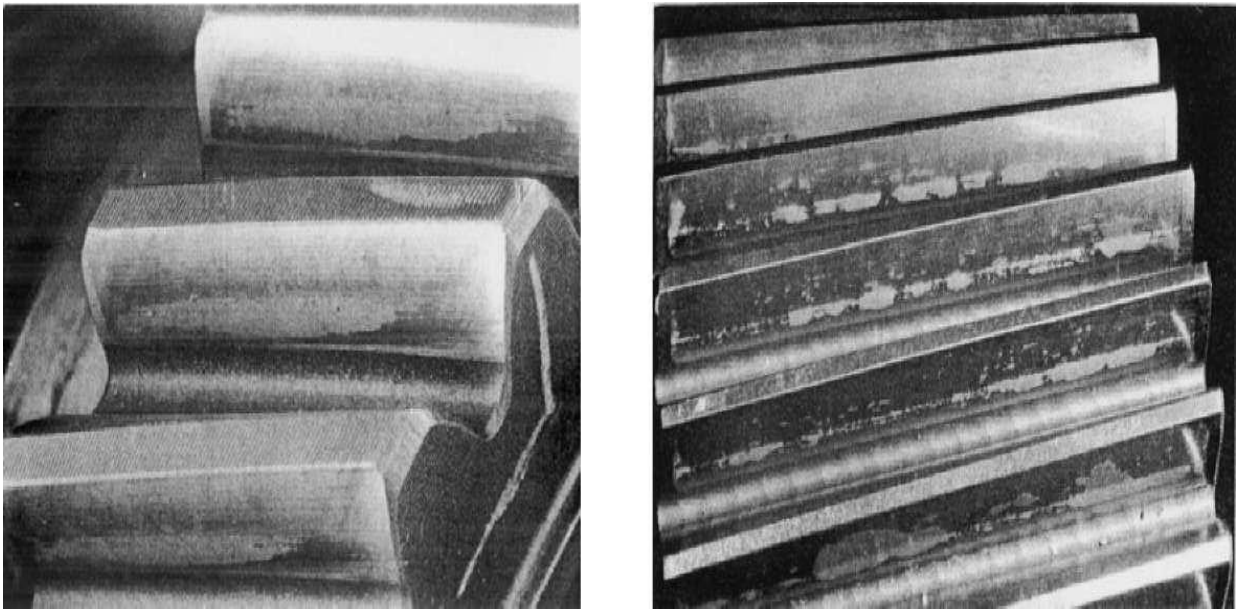


Рисунок А.26 – Мікро-вищерблення на зубах косозубих зубчастих коліс, більшість ямок викришування локалізуються на ніжках зубів

До відшарування іноді відносять процес лущення, але відшаровування відрізняється від лущення тим, що товщина відокремлюючих частинок металу дорівнює або перевищує товщину поверхневого зміцненого шару. Відшаровування є прогресуючим макро-вищербленням, при якому окремі раковини зростаються разом і утворюють кратери неправильної форми, які охоплюють значну частину робочої поверхні зубів, як показано на рис. А.27.

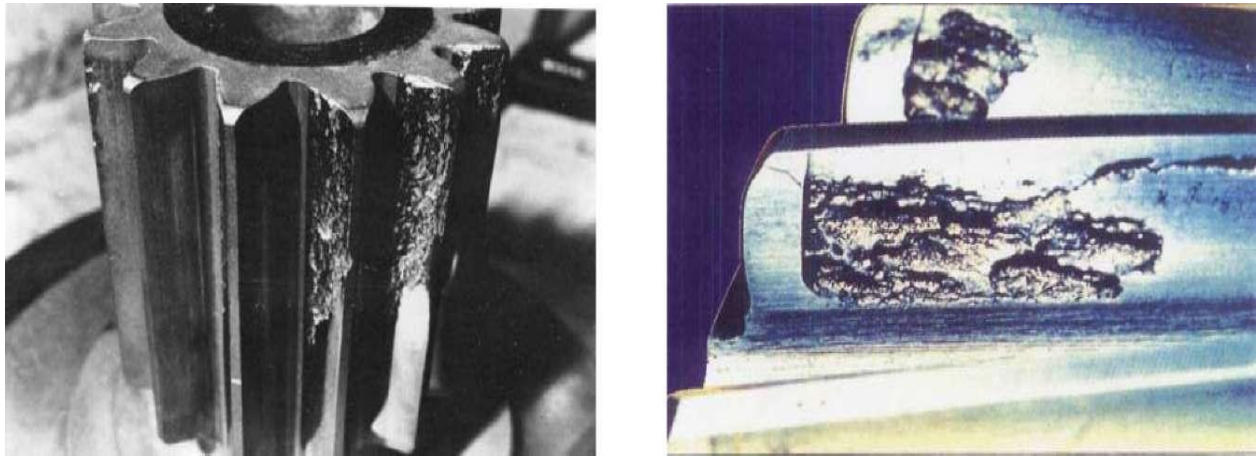


Рисунок А.27 – Фрагменти бічної поверхні зубів, пошкодженої відшаровування

4.5 Виникнення і розвиток тріщин

Крім тріщин, що виникають в галтелях зубів, що призводять до зламу зуба і розглянутих вище, тріщини можуть виникнути в будь-якій частині зуба внаслідок механічної напруги, температурних напружень, дефектів матеріалу або неякісної технології виготовлення (наявність дефектів при штампуванні заготовки, заходів при гарячій накатці, шліфувальних пріжогов ; при неякісній загартуванню, перевантаженню передачі, дефектах конструкції або матеріалу і т. п.). З причин виникнення тріщини класифікуються наступним чином:

- тріщини від термообробки;
- шліфувальні тріщини;
- тріщини обода і диска колеса;
- тріщини по межі зміцненого шару;
- втомні тріщини.

Тріщини від термообробки (гартівні тріщини)

Поява тріщин цього виду обумовлено надмірно високими внутрішніми напруженнями, що виникли в процесі термообробки. Ці тріщини виникають головним чином при загартуванні зубів через виникнення місцевих напружень, викликаних нерівномірним охолодженням або неоднорідним

перетворенням аустеніту в мартенсит. Місцеві термічні напруги виникають внаслідок відмінності інтенсивності охолодження поверхні і серцевини зубчастого колеса. Інтенсивність охолодження визначається геометрією шестерні, закалочної середовищем, її температурою і характером перемішування. Градієнт зміни температури по перетину, що викликає ймовірність виникнення гартівних тріщин збільшується в міру збільшення товщини перетину, асиметричності зубчастого колеса, а також змінної товщини ободку і диска колеса. Для зменшення ймовірності виникнення гартівних тріщин рекомендується зменшувати діаметр отворів, розміри пазів шпон і шліців, уникати наявності гострих кромки. У цих же цілях нарізані до гарту зуби повинні мати фаски або заокруглення на торцях робочої поверхні і вершини зуба. Зуби зубчастих коліс, піддані поверхневому загартуванню або загартуванню ТВЧ, більш схильні до виникнення гартівних тріщин, ніж зуби зубчастих коліс, підданих об'ємної загартуванню або загартуванню зубів по всьому контуру. Небезпека виникнення гартівних тріщин вища в інтенсивно перемішується содової або соляній ванні, ніж в більш спокійній масляній ванні. Перетворення аустеніту в мартенсит супроводжується об'ємним розширенням, яке може викликати виникнення тріщин. Гартівні тріщини можуть виникати не тільки в процесі загартування, а й пізніше, коли зубчасте колесо остигає без безпосереднього відпустки. Для усунення такої можливості рекомендується проводити відпустку зубчастих коліс відразу ж після гарту. Щоб уникнути виникнення гартівних тріщин при організації процесу загартування шестерень необхідно враховувати розмір і геометрію зубчастого колеса, а також металургійні властивості і проштрикуваність стали. Так, стали з вмістом вуглецю вище 0,35% з метою уникнення можливих гартівних тріщин рекомендується гартувати в масляній ванні. Іноді тріщини, що виникли при термообробці, можуть бути виявлені лише через деякий час або в процесі шліфування зубів. Гартівні тріщини виникають між зернами металу і поширюються від поверхні в тіло зуба майже прямолінійно. Якщо тріщина виникає до процесу відпустки, як це

показано на рис. А28, її поверхня знебарвлюється при окисленні в атмосфері печі в процесі відпустки.

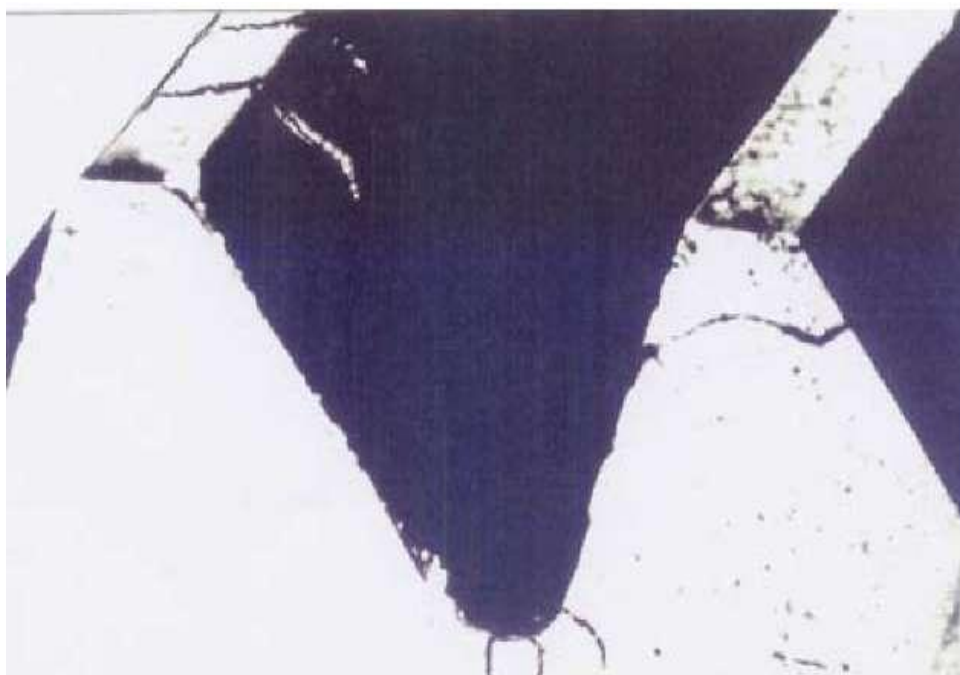


Рисунок А.28 – Тріщини від термообробки

Для запобігання виникнення гартівних тріщин необхідно:

- проектувати конструкцію зубчастого колеса по можливості симетричною, уникаючи різких змін товщини перетину; мінімізувати розміри отворів, пазів шпон і шліців, а також передбачити наявність фасок або заокруглень всіх гострих кромки, особливо торців і вершини зуба;
- вибирати гартівну середу і її температури з урахуванням специфіки конструкції зубчастого колеса, а також проштрикуванність стали;
- здійснювати відпуск загартованих зубчастих коліс безпосередньо після гарту.

Шліфувальні тріщини - це тріщини, які можуть виникнути під час або після шліфування зубів. Такі тріщини не великі по довжині і глибині і приблизно паралельні один одному і розташовані зазвичай перпендикулярно до траєкторії руху шліфувального круга або у вигляді волосяний сітки.

Глибина тріщин становить 0,07 - 0,13 мм. Подібно гартівно тріщинах вони можуть з'являтися відразу після шліфування, під час подальшого транспортування або зберігання або після деякого часу експлуатації. Тріщини можуть виникати через неправильне режиму шліфування, при занадто великій глибині шліфування, занадто великій швидкості різання, неправильно обраної зернистості або твердості кола або недостатньої подачі охолоджуючої рідини. Шліфувальні тріщини можуть з'явитися в результаті перетворення залишкового аустеніту в мартенсит під дією тепла, що виділяється при шліфуванні, або виникаючої напруги. Вони також можуть бути викликані утворенням крихкого не відпущеного мартенситу при локальної аустенізації і самозагартування під дією місцевого тепловиділення.

Стали з хорошою проштрикуваністю, забезпечується карбідобразуючих елементами, такими як хром, проявляють схильність до утворення шліфувальних тріщин. Це є характерним для цементованих шестерень з високим вмістом вуглецю в поверхневому шарі, особливо при наявності сітки карбідів. Для того щоб уникнути утворення гартівних тріщин, мікроструктура зміцненого поверхневого шару повинна складатися головним чином з відпущеного мартенситу з менш ніж 20% -ним вмістом рівномірно розподіленого залишкового аустеніту і бути вільною від сітки карбідів. Твердість поверхні не повинна перевищувати 60 IPO. Шліфувальні тріщини поряд з Шліфувальні пріжогів можуть бути виявлені при кислотному травленні. Зони відпустки мають коричневий або чорний колір, на фоні світло-коричневої або сірої основи. Зони, де відбулося утворення загартованого мартенситу, пофарбовані білим і оточені чорними областями відпустки. Контроль намагніченими частинками або проникаючої фарбою дозволяє виявити шліфувальні тріщини, як це показано на рис. А.29.

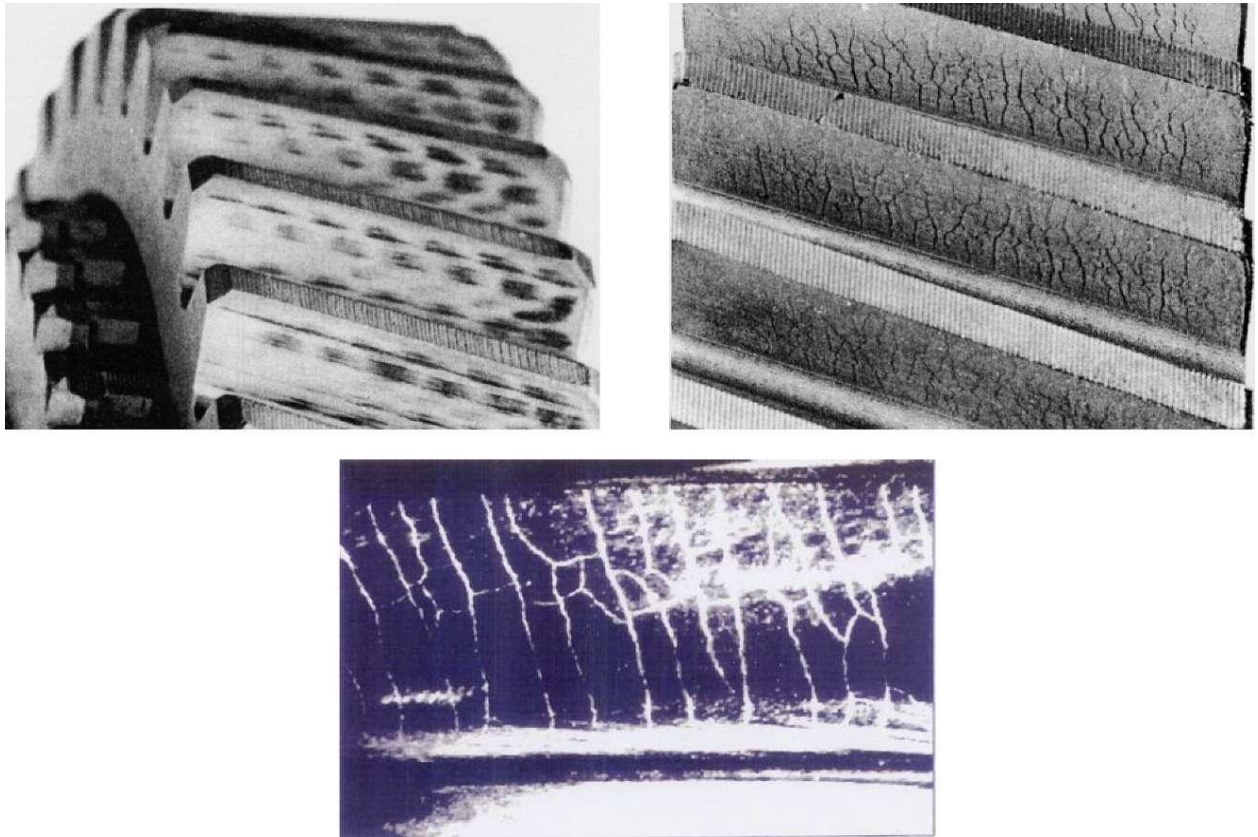


Рисунок А.29 – Приклади шліфувальних тріщин з волосяним візерунком на бічній поверхні зуба

Методи запобігання шліфувальних тріщин включають в себе:

- дотримання необхідних параметрів режиму шліфування (подачі і окружної швидкості шліфувального круга, його зернистості і подачі охолоджуючої рідини);
- забезпечення раціональної мікроструктури цементованого шару (наявність рівномірно розподіленого залишкового аустеніту не більше 20% при іншому складі - мартенситні відпустки, відсутність карбідних сіток);
- забезпечення твердості цементаційна шару не більше 60 HRC.

Пошкодження такого виду може статися у зубчастих коліс з поверхнево зміцненим зубами, коли внутрішні тріщини з'являються на кордоні розділу серцевини зуба і зміцненого шару. Внутрішні тріщини можуть бути причиною відшарування кутів, крайок і цілком вершин зубів.

Тріщини можуть з'явитися відразу ж після термообробки, під час транспортування або зберігання, або через деякий час в процесі експлуатації.

Пошкодження відбувається через надмірно високих залишкових напруг, що розтягують на кордоні сполучення зміцненого шару і серцевини зуба через занадто великої товщини шару, як це показано на рис. А.30.

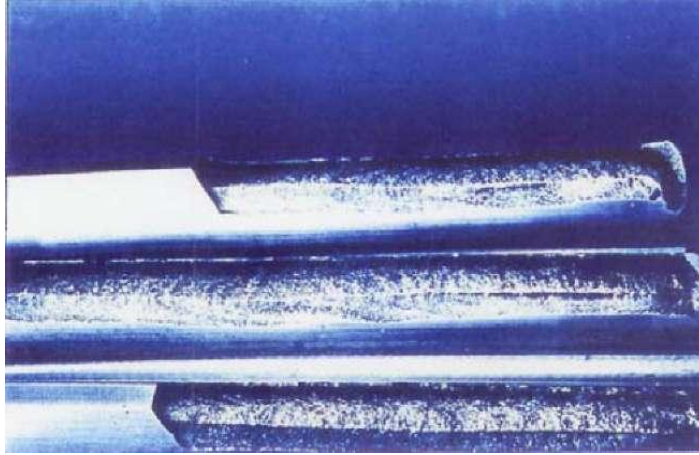


Рисунок А.30 – Тріщини по межі зміцненого шару

Для того щоб в зубчастих колесах, підданих цементації, запобігти утворенню надзвичайно глибоких термоміцних шарів, слід обмежити проникнення вуглецю в процесі цементації, або виключивши призначення вузьких майданчиків на вершинах зубів, або забезпечивши захист цих майданчиків мідними покриттями.

Для того щоб мінімізувати ризик від пошкоджень даного виду, необхідно проводити відпустку заготовок зубчастих коліс відразу ж після гарту. Всілякі фаски і радіуси на крайках зубів будуть сприяти зниженню концентрації напруг.

Методи запобігання тріщин на кордоні зміцненого шару:

- контролювати глибину зміцненого шару, особливо на вершинах зубів.

Для цементованих зубчастих коліс уникати вузьких майданчиків на вершинах зубів і захищати вершини зубів від глибокого проникнення вуглецю;

- проводити відпустку заготовок негайно після гарту;
- використовувати всілякі фаски і радіуси для заокруглення крайок зубів.

Втомні тріщини - це тріщини, що виникають і поширюються під впливом повторних змінних або циклічних напружень, які можуть бути значно нижче межі міцності матеріалу при розтягуванні. Іноді тріщина, що виникла при перевантаженні, показана на рис. А.31, буде розвиватися поступово, подібно втомним тріщинам. Більш детально процес виникнення і розвитку втомних тріщин розглянуто в 4.6.

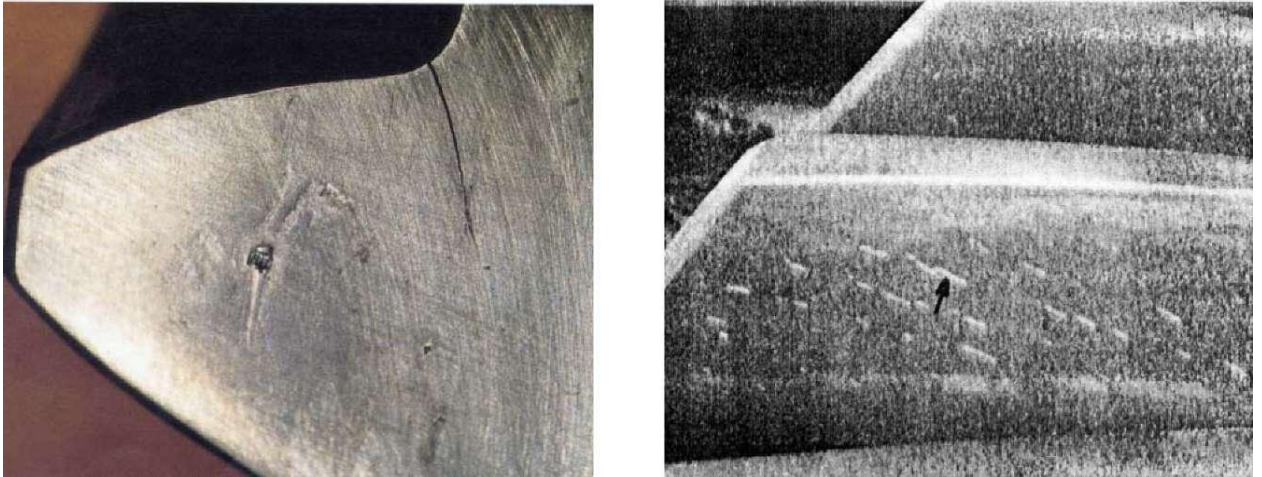


Рисунок А.31 – Втомні тріщини

4.6 Руйнування зуба

Руйнування зуба полягає у відділенні від зубчастого колеса одного або декількох зубів або їх істотних частин. розрізняють:

- злам зуба при перевантаженні;
- зріз зуба;
- поломку зуба після пластичної деформації (тривале руйнування);
- втомний злам зубів.

Злам зубів при перевантаженні може статися при додатку ударних навантажень. Він також може мати місце при попаданні в зачеплення значних сторонніх об'єктів, а також внаслідок порушення правильності

зачеплення через пошкодження валів або підшипників передачі. Характерний вид зламу зуба при перевантаженні показаний на рис. А.32.

Розрізняють такі види зламу зуба при перевантаженні:

- крихкий;
- в'язкий;
- напівкрихкий (змішаний).

При перевантаженні може відбуватися руйнування зубів пластичним деформуванням або зламом. Якщо відбувається злам, то руйнування може відбуватися за механізмом або в'язкого зламу, якому передують значна пластична деформація, або крихкого зламу, з наявністю незначної пластичної деформації, або зламу змішаного виду, який демонструє ознаки вузького і крихкого зламу.

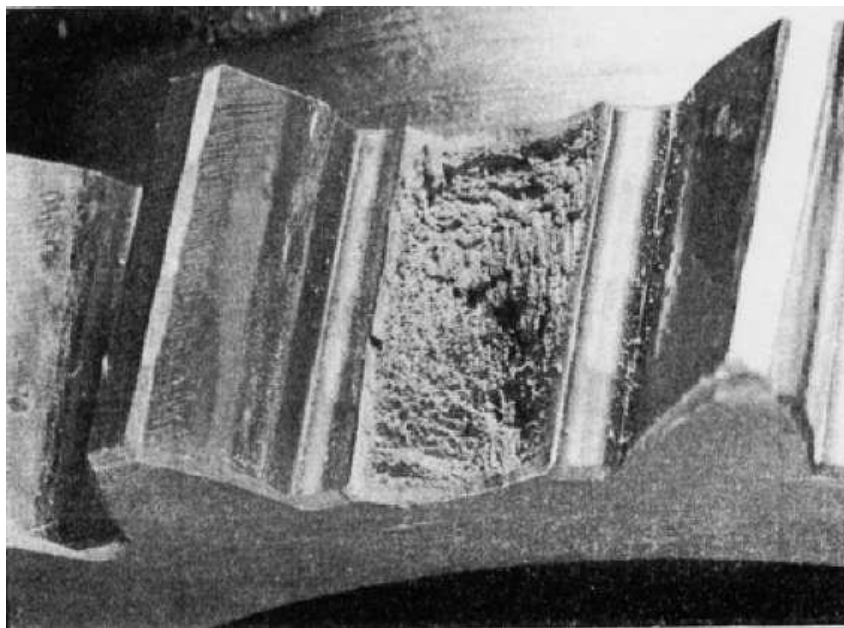


Рисунок А.32 – Злам зуба косозубого колеса при перевантаженні

Втомні пошкодження зазвичай закінчуються зламом в той момент, коли тріщина проросте до точки, де залишився живий перетин зуба не може далі чинити опір навантаженню. У цьому сенсі залишився перетин матеріалу перевантажено, однак злам є вторинним видом, який іде за рахунок причини первинного вигляду - втомного тріщиноутворення.

Руйнування зубів без первинної втомної тріщини є рідкісним видом руйнування, однак можуть з'явитися в результаті ударного навантаження, причиною якої може стати або двигунний пристрій, або робоча машина. Руйнування можуть також мати місце при попаданні в зачеплення великих сторонніх предметів, а також внаслідок порушення правильності зачеплення через пошкодження валів або підшипників.

Відмінності характеристик поверхні руйнування при крихкому і в'язкому зламі зуба наведені в табл. А.5.

Таблиця А.5 – Характеристики поверхні руйнування при зламі зубів

Характеристика поверхні зламу	Крихкий злам	В'язкий злам
Поверхня в відбитому світлі	Яскрава, блискуча	Сіра Темна Тьмяна
Структура	Кристалічна Зерниста Груба Велика Гранульована	Гладка Матова Рівна Дрібна Волокниста
Орієнтація	Плоска Під прямим кутом до напрямку максимальних напружень розтягу	Плоска або похила Під прямим чи гострим кутом до напрямку максимальних напруг розтягнення
Рисунок	Струмчастий візерунок Шевронний рисунок	Розхідні рубці
Пластична деформація	Незначна	Істотна
Мікроструктура	Фасетки внутрішньозереного і міжзеренного відколу, ступеньки відколу, язички	Фасетки квазісколу, ямки

Крихкий злам характеризується швидким поширенням тріщини без суттєвої пластичної деформації. Крихкі злами носять як внутрішньокристалічний, так і міжзеренний характер. При крихкому внутрізеренном руйнуванні реалізується внутрікристалічний скол по певних

кристалографічних площинах, що утворює фасетки відколу, які при невеликому збільшенні виглядають як дуже гладкі блискучі ділянки. Мікроструктура фасеток має вигляд розбіжних променів або струмчастогостого візерунка, утворених зливаються окремими мікротріщинами. З'єднання тріщин відбувається крихко уздовж площини спайності або з незначною часткою мікропластичної деформації. У першому випадку утворюються крихкі сходинки, у другому - звивисті гребені. Основна ознака міжзеренного руйнування полягає в наявності рельєфу, відповідного огранювання зерен. Поверхня зламу зазвичай плоска і перпендикулярна до напрямку найбільших напружень розтягу. На поверхні крихкого зламу можна розрізнити три зони: фокус зламу, який представляє собою вогнище руйнування, зону відносно повільного поширення руйнування і зону доломіт - зону, відповідну прискореного руйнування. Фокус зламу розташовується переважно у поверхні зуба в зоні максимальної концентрації напружень. Крихкий злам може мати місце в разі, коли напруги розтягування в поєднанні з дефектами металу створюючи критичну інтенсивність напружень, що перевищує ударну в'язкість матеріалу. Крихкий злам зубів може також відбуватися у шестерень, виготовлених з вуглецевих конструкційних сталей при температурах нижче межі переходу від в'язкого зламу до крихкого.

Крихкий злам (Рис. А.33) починається від концентраторів напружень, якими можуть бути подряпини, тріщини, поверхневі ушкодження, поверхневі або підповерхневі включення або мікропори. Розміри концентратора можуть бути досить малі, але вони можуть привести до зародження тріщини, при швидкому зростанні якої може статися крихкий злам. Критичний розмір концентратора визначається геометрією зубів, формою та орієнтацією концентратора, прикладеними напруженнями і ударною в'язкістю матеріалу при переданому навантаженні і робочої. На мікрорівні крихкий злам, як показано на рис. А.34 і А.35, спостерігається у вигляді чітко видимих міжзеренного і внутрішньозеренних фасеток.



Рисунок А.33 – Крихкий злам (руйнування при швидкому поширенні тріщини без попередньої пластичної деформації)

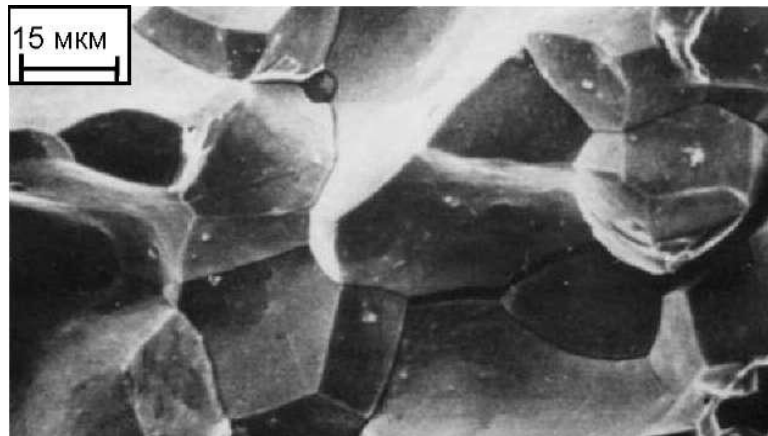


Рисунок А.34 – Мікрофотографія поверхні руйнування за механізмом внутрізеренного крихкого зламу

Методи запобігання крихкому зламу:

- використання матеріалів і термообробки, що забезпечує високу ударну в'язкість;
- застосування високоякісних сталей зі зменшеним вмістом вуглецю, фосфору і сірки;
- застосування сталей з високим вмістом нікелю і молібдену, що забезпечують дрібнозернисту структуру;
- відмова від використання сталей з високим вмістом хрому і марганцю;

- відмова від використання конструкційних вуглецевих сталей при температурах нижче температури переходу від в'язкого зламу до крихкого;
- використання термообробки для отримання мартенситної структури;
- застосування високого відпуски при температурі 250 ° С - 400 ° С для усунення можливої крихкості сталі;
- використання цементації або азотування, а також дрібноструминної обробки для отримання високих залишкових стискаючих напружень;
- зменшення значення згинальних напружень в галтелі зуба шляхом оптимізації її геометрії;
- усунення можливих концентраторів напружень в галтелі зуба;

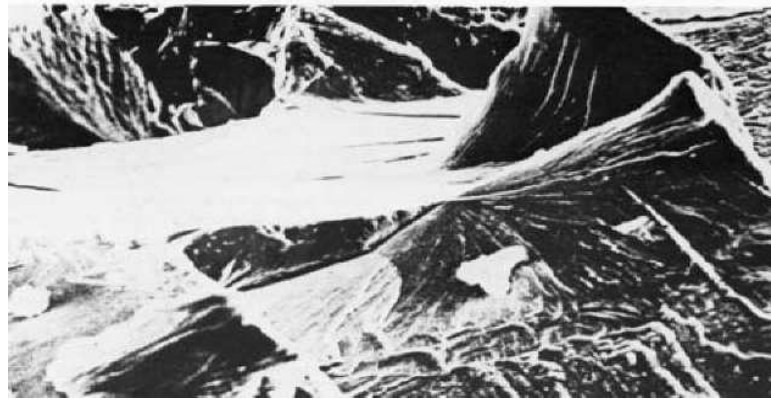


Рисунок А.35 – Мікрофотографія поверхні руйнування за механізмом міжзеренного крихкого зламу

Пошкодження цього виду в більшості випадків виявляється на зубчастих колесах, виконаних з відносно низькоміцних матеріалів, які зачіпляються з зубчастими колесами з міцніших матеріалів. Зріз зуба майже завжди відбувається при значній одноразовій перегрузці. Поверхня зрізу практично плоска і її вигляд нагадує гладку, оброблену на верстаті поверхню. Одним з характерних прикладів зрізу зуба може служити поломка зуба при випробуваннях зубчастого колеса на статичну міцність на пресі. Характерний вид пошкодження показаний на рис А.36. На рис. А.36 наведено вид зуба,

зрізаного одиничним навантаженням при надмірному перевантаженні, яке додається до його правої бічної поверхні (перевантаження при вигині).

При зрізі зуба вид поверхні зрізу нагадує механічно оброблену поверхню.

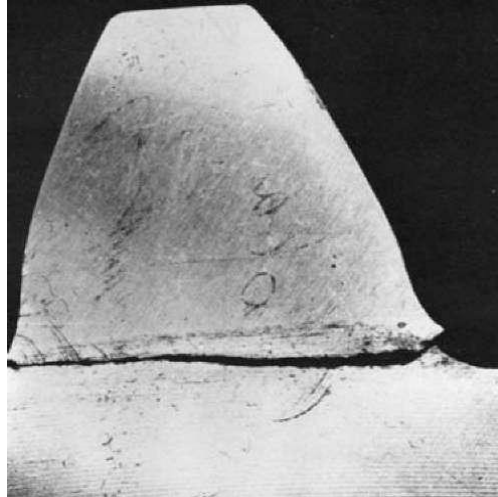


Рисунок А.36 – Характерний вигляд зрізаного зуба

Процес поступового накопичення пошкоджень матеріалу під впливом повторно-змінних напружень, що призводить до зміни його будови і властивостей, утворення і розвитку тріщин і в кінцевому рахунку до поломки зуба, кваліфікується як втомний злам зуба. На відміну від поломки при перевантаженні, при якій зазвичай відбувається злам кількох зубів відразу, втомна поломка зазвичай спостерігається тільки на одному зубі.

Втомна поломка зубів є поступовим процесом, що складається з трьох стадій: - зростання тріщин; - поломка зуба.

На першій стадії пластична деформація, що розвивається від концентраторів напружень, призводить до зародження мікроскопічних тріщин. Зростання тріщини на другій стадії відбувається перпендикулярно до вектору максимальних напружень розтягу. Втомні тріщини виникають і поширюються під впливом повторних змінних або циклічних напружень, які можуть бути значно нижче межі міцності матеріалу при розтягуванні. На третій стадії, коли тріщина поступово, в процесі багаторазового повторення

циклів навантаження, досягає критичного розміру, відбувається раптова поломка зуба.

Більшу частину терміну служби зубчастої передачі займають стадії зародження і зростання втомної тріщини до критичного розміру. Залежно від матеріалу зубчастого колеса, його ударної в'язкості і значення прикладеного навантаження втомний злам зуба може бути крихким, в'язким або напівкрихким.

На стадії зародження тріщин максимальне напруження згину не перевищує межу текучості матеріалу. Однак локальна пластична деформація може мати місце в зонах концентрації напружень, меж зерен або включень. Циклічна пластична деформація розвивається переважно по площинах відколу, які збігаються з напрямком максимальних напружень зрізу. Циклічний скол розвивається всередині цих зерен переважно під поверхнею, де напруги досягають максимальної величини, до тих пір, поки не почнуть зароджуватися втомні мікротріщини. Ці тріщини ростуть в площинах максимальних напружень зрізу і в кінцевому рахунку зливаються в одну головну тріщину.

Стадія зростання втомної тріщини починається з її розвитку через кордони зерен в напрямку, приблизно перпендикулярному до вектора максимальних напружень розтягу. На цій стадії пластична деформація обмежена невеликою зоною в вершині тріщини. Поверхня втомної тріщини виглядає однорідною без явних ознак значної пластичної деформації. При скануванні на електронному мікроскопі на поверхні втомної тріщини можна спостерігати явні хвилеподібні нерівності і западини, звані втомним лініями або втомних борозенками. Орієнтація втомних ліній перпендикулярна до напрямку росту тріщини. Якщо тріщина розвивається стрибкоподібно, то на її поверхні можна спостерігати аналогічні усталостні лінії, видимі неозброєним оком. Можна припустити, що їх поява пов'язана з затупленням і загостренням вершини тріщини і кожна з них відповідає зростанню тріщини за один цикл навантаження. Ці лінії відповідають положенню фронту

тріщини в момент зупинки її зростання через зниження значення діючих циклічних напружень. Зона зародження тріщини зазвичай оточена рядом концентричних втомних ліній. Втомні борозенки є явним доказом розвитку втомної тріщини, однак подібні лінії можуть спостерігатися і при розвитку ушкоджень інших видів, наприклад корозії. Якщо одночасно відбувається розвиток кількох втомних тріщин, то кожна з них утворює свою зону поширення. У цьому випадку близько розташовані тріщини, розвиваючись по різних кристалографічних площинах, зливаються в єдину, утворюючи зубчасту сходинку. Такі сходинки часто присутні на поверхні зламу зуба через численні концентраторів напружень на галтелі зуба, що викликають одночасний розвиток декількох втомних тріщин.

Слід розрізняти:

- малоцикловий втомний злам;
- багатоцикловий втомний злам.

Малоцикловий втомний злам зуба відбувається при розвитку пластичної деформації на кожному циклі навантаження і при загальній кількості циклів навантаження менше 10 000 (Рис. А.37). Такий злам мало характерний для правильно спроектованих зубчастих передач і може відбуватися через істотні перевантаження передачі або значною неспіввісністю розташування зубчастих коліс. При малоцикловій втоми наявність поверхневих концентраторів не грає настільки істотної ролі, так як наявність пластичної деформації знижує вплив концентрації як діючих, так і залишкових напруг. Втомні тріщини можуть виникнути як на поверхні, так і під поверхнею зуба, причому час зародження тріщин відносно малий в порівнянні з часом їх розвитку. Для збільшення терміну служби зубчастих коліс по малоцикловій згинальній втоми зубів доцільно забезпечити підвищення пластичності і ударної в'язкості матеріалу зубчастих коліс. Так, зокрема, для цементованих зубчастих коліс рекомендується:

- використовувати сталі з вмістом нікелю більше 1%;

- забезпечувати при загартуванні вміст залишкового аустеніту в загартованому шарі в межах від 15% до 30%;
- зменшити твердість загартованого шару з 58 до 55 IPO.

Слід зазначити, що прийняття рекомендованих заходів щодо підвищення малоциклової згинальної витривалості зубів знижує їх багатоциклову згинальну витривалість, тому найкращим методом підвищення малоциклової витривалості є зменшення діючих напружень.

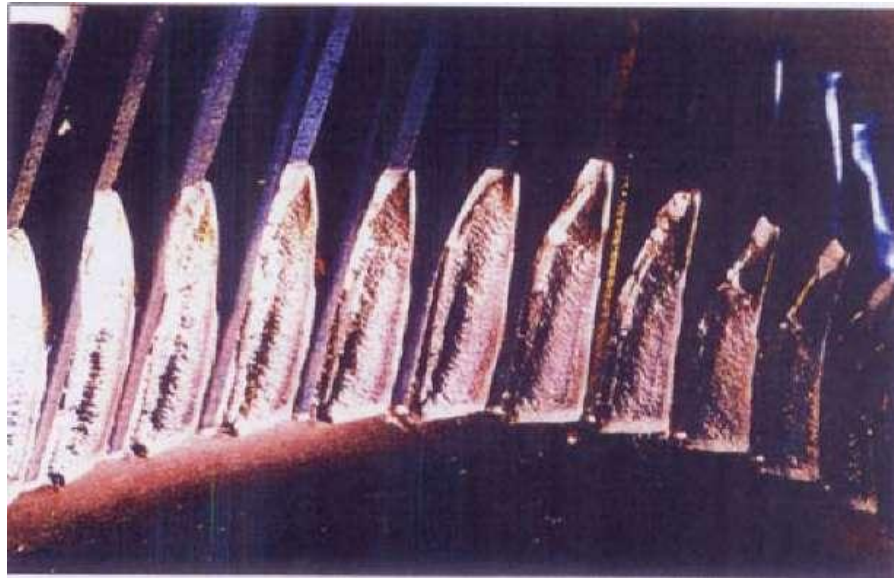


Рисунок А.37 – Втомний злам зуба при малоцикловій втомі

Багатоцикловий втомний злам зубів є найбільш характерним видом зломних пошкоджень зубів зубчастих передач. Він відбувається при циклічних напруженнях, що не перевищують межу текучості матеріалу. Число циклів діючих напружень перевищує 10 000, причому більшу частину терміну служби складає період зародження втомних тріщин, а не їх розвитку.

Поверхня зламу складається з двох різних зон: поширення втомних пошкоджень і остаточної поломки зуба. У зоні втоми ознаки пластичної деформації практично відсутні. Поверхня гладка і матова. На ній можуть спостерігатися лінії розвитку пошкоджень, а також послідовний перехід між стадіями поширення тріщини. Поверхня остаточної поломки зуба відповідає

одному з видів зламів при перевантаженні (хрупкому, в'язкому або в'язкопружні).

Втомні тріщини виникають, як правило, на галтелі робочої сторони зуба, на якій діють напруги розтягнення. У разі наявності значних концентраторів напружень у вигляді раковин викришування, дефектів матеріалу, гартівних або шліфувальних тріщин, втомні тріщини можуть розвиватися на робочій поверхні зубів, як показано на рис. А.38.

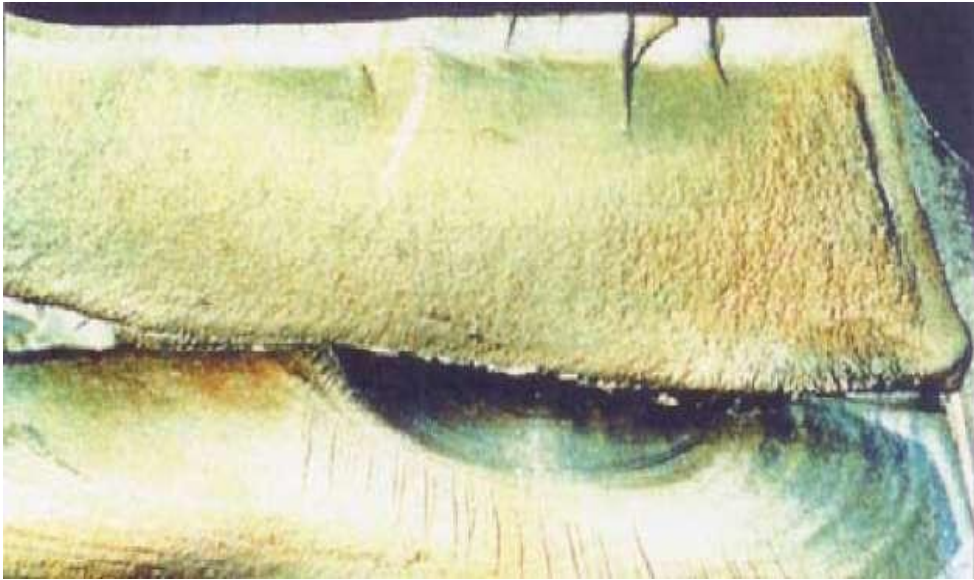


Рисунок А.38 – втомної злам зуба при багатоциклової втоми

Для збільшення терміну служби зубчастих коліс по багатоцикловій згинальній витривалості необхідно підвищувати міцність матеріалу при розтягуванні і оптимізувати мікроструктуру поверхневого і підповерхневого шарів зубів. Зокрема, для підвищення багатоциклової згинальної виносливості цементованих зубчастих коліс рекомендується:

- усунення бейнітного, перлітного і сітчастого карбідного включення і мікротріщини в мікро-структурі загартованого шару, особливо у поверхні галтелі;
- забезпечити отримання мартенситної структури в галтелі зубів;

- забезпечити виникнення максимальних залишкових напружень стиску в загартованому шарі шляхом використання сталей з меншим вмістом вуглецю;
- забезпечити зниження концентрації напружень в галтелі зуба шляхом застосування максимальних радіусів викрижки;
- при шевінгуванні або шліфуванні зубів циліндричних зубчастих коліс застосовувати інструмент з протуберанцем, що дозволяє уникнути слідів обробки в западині між зубами;
- при нарізанні конічних і гіпоїдних коліс забезпечити відсутність канавок від слідів окремих різців в западині між зубами;
- використовувати вільні від домішок сталі, головним чином цементовані або азотовані;
- використовувати дробоструйну обробку, яка збільшить залишкові напруги стиску, створюються при цементації зубів;
- забезпечувати отримання оптимальної мікроструктури загартованого шару, глибини цементації, твердості поверхневого шару і серцевини;
- використовувати дрібнозернисту структуру сталі шляхом легування нікелем і молібденом;
- забезпечити відсутність на поверхні галтелі рисок, слідів обробки, тріщин, неметалевих включень, обезвуглення, корозії, внутрішньозеренного окислення і інших дефектів.

Розрізняють види зламу:

- по тріщині біля основи зуба;
- по тріщині на бічній поверхні зуба;
- по тріщині у торця зуба.

Хоча втомні тріщини можуть з'явитися де завгодно, вони зазвичай виникають на галтелі з боку дії напружень розтягу. Характерний вид зламу по тріщині біля основи зуба показаний на рис. А.39 – А.40.

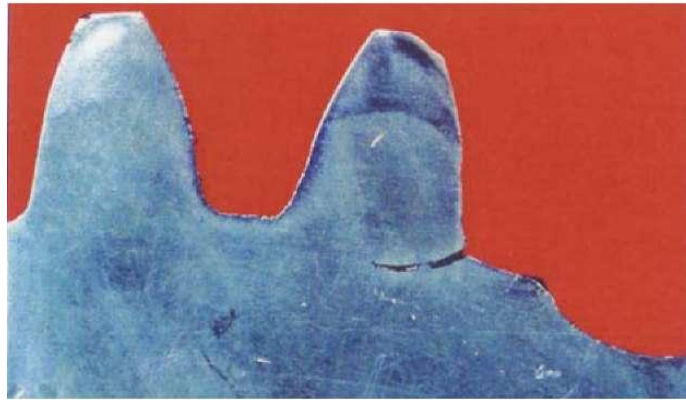


Рисунок А.39 – Злам по тріщині біля основи зуба

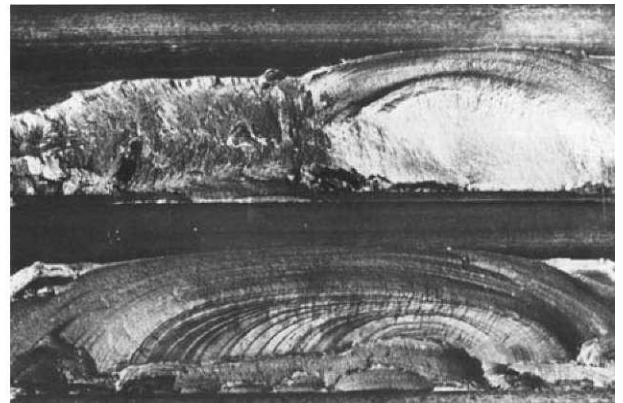
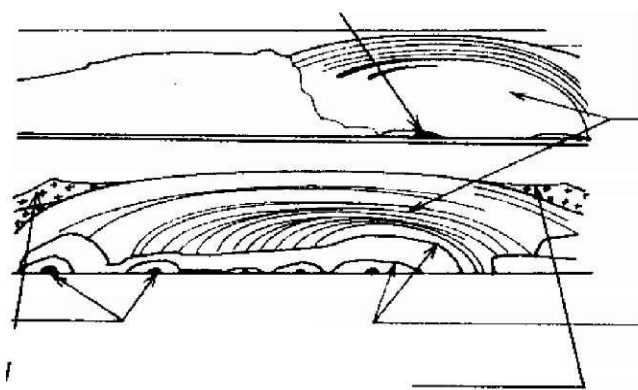


Рисунок А.40 – втомної злам двох зубів прямозубої шестерні

Втомні тріщини можуть виникнути на активній бічній поверхні зуба при наявності концентратів напруг, причиною появи яких можуть бути макровикрашування або дефекти матеріалу, як це показано на рис. А.41 і А.42.

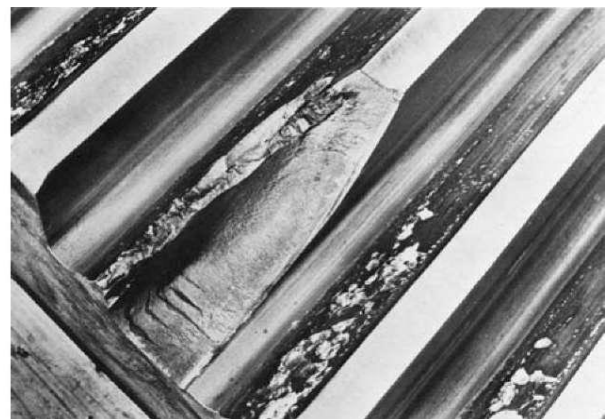
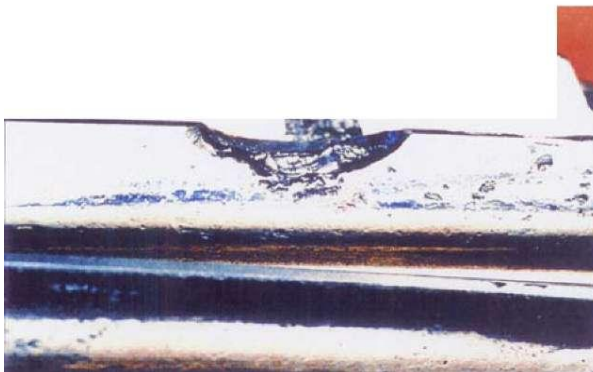


Рисунок А.41 – Втомний злам по тріщині Рисунок А.42 – Злам по тріщині на профілі зуба.

Злом торців зубів циліндричного або конічного зубчастого колеса в більшості випадків відбувається через концентрацію навантаження у цього торця, зумовленої похибками виготовлення або монтажу зубчастих коліс передачі. Появи тріщин і зламу торців зубів можуть також сприяти концентрації напружень і дефекту матеріалу, як це видно з рис. А.43. Особливу небезпеку для конічних і гіпоїдних коліс з криволінійними зубами являє наявність гострих кромek при переході робочої поверхні зубів в торцеві поверхні. Щоб уникнути зламу торців зубів ці кромки повинні бути затуплені. Крім того, необхідно уникати виходу плями контакту при повному навантаженні на зазначені крайки зубів.

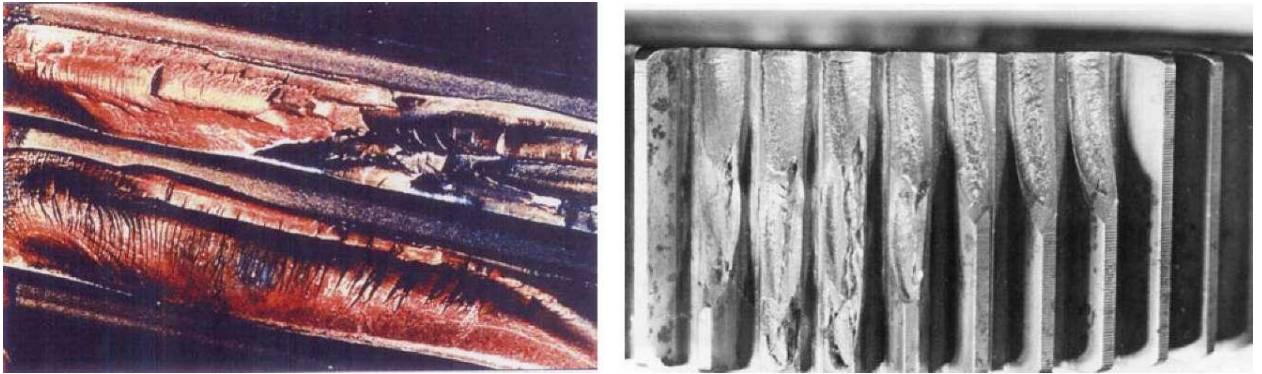


Рисунок А.43 – Приклади втомного руйнування зуба по тріщині у торця зуба

Додаток Б

**ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ВИХІДНИХ КОНТУРІВ
УКРАЇНСЬКОГО, АНГЛІЙСЬКОЇ, НІМЕЦЬКОЇ, ФРАНЦУЗЬКОГО І
АМЕРИКАНСЬКОГО СТАНДАРТІВ ЗУБЧАТИХ ПЕРЕДАЧ У
РЕМОНТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Аналіз впливу окремих елементів і їх параметрів на характер перехідного процесу показує, що постійні часу T_v и T_s , а також ланка $W_{3y}(p)$ несуттєво впливають на динамічні властивості об'єкта управління і в більшості випадків ними можна знехтувати. З огляду на сказане, модель процесу зустрічного зубофрезерування можна спростити і представити структурою [246; 251] з передавальними функціями по обурює і керуючому впливам (рис. 3.18, u):

$$W_{спид}^f(p) = Y(p)/f(p) = W_p^f(p) = W_p^f(p) \cdot W_{y.c.}(p) / [1 + W_p^s(p) \cdot W_{y.c.}(p)] =$$

$$= (g_2 p^2 + g_1 p + g_0) / (l_5 p^5 + l_4 p^4 + \dots + l_0);$$

$$W_{спид}^s(p) = Y(p) \cdot A(p) = W_p^s(p) \cdot W_{y.c.}(p) / [1 + W_p^s(p) \cdot W_{y.c.}(p)] =$$

$$= (c_2 p^2 + c_1 p + c_0) / (l_5 p^5 + l_4 p^4 + \dots + l_0),$$

де $W_p^s(p) = k_p / (T_p p + 1)$; $W_p^i(p) = k_p / (T_y p + 1)$; $W_{y.c.}(p) = W_c(p) =$

$$= W_{2y}(p) - W_{1y}(p) = k_{2c} / (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1) - k_{1c} / (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1).$$

Зміст

1. Вихідний контур зубчастих коліс України
2. Британські стандартні основні рейки
3. Німецька стандартна основна рейка
4. Французькі стандартні основні рейки
5. Американські стандартні основні рейки
6. Модульна і пітчевих системи
7. Співвідношення модульної і пітчевої систем
8. Система подвійного модуля і пітчу

9. Розрахунок зубчастих передач з циліндричними некоррігіргованими колесами при модульній і півчових системах в ремонтному виробництві.

10. Розшифровка геометричних параметрів при відновленні зубчастих передач

11. Ідентифікація геометричних параметрів зубчастих передач і визначення коригувати зубчастих коліс в ремонтному виробництві

12. Забір і визначення елементів вихідного контуру зубчастої рейки в ремонтному виробництві.

13. Визначення модуля і півчу зачеплення при відновленні зубчастих передач

У технічній літературі в основному наводяться розрахунки для проектування нових зубчастих передач, інформації щодо розрахунку зубчастих передач в ремонтному виробництві практично відсутні.

Значна кількість імпортного обладнання на підприємствах і різноманіття систем геометричного розрахунку, особливо коригувати передач, що застосовуються іноземними фірмами, ускладнюють задачу визначення виду зачеплення і його відновлення.

Тому ремонт зубчастих передач обладнання іноземних фірм є надзвичайно складним конструкторсько-технологічним процесом і дозвіл їх в основному є тільки обмеженому колу фахівців.

При ремонтному відновленні зубчастих передач російського, американського, німецького, англійського, французького обладнання виникають суб'єктивні і об'єктивні причини по визначенню основних параметрів вихідної рейки для розрахунку зубчастого зачеплення з наступних причин:

-в умовах ремонту відсутня можливість вибору зачеплення;

-вимагайте розшифровка системи зношеного зачеплення і системи корекції;

-вимагайте відновлення зношеного зачеплення із забезпеченням необхідних параметрів норм точності.

З метою вивчення та освоєння методики вибору і встановлення параметрів зубчастих передач в ремонтному виробництві розглядаються вихідні контури циліндричних зубчастих коліс провідних країн виробників обладнання машинобудівного і металургійного комплексів [123].

1. Вихідний контур зубчастих коліс України

Під вихідним контуром зубчастих циліндричних коліс розуміється контур зубів основної рейки, якого ще називають вихідним контуром зубчастої рейки. У табл. Б.1 наведені стандарти зубчастих циліндричних, рейкових, конічних і гіпоїдних, черв'ячних циліндричних і глобоїдних передач.

Таблиця Б.1 – Основні стандарти зубчатих передач

/п	Найменування параметрів стандартизації	Передачі			
		Циліндричні	Рейкові	Конічні і гіпоїдні	Черв'ячні
	Терміни, визначення та позначення	ГОСТ16530-83 ГОСТ16531-83 ГОСТ16532-70	ГОСТ16530-83 ГОСТ16531-83 ГОСТ16532-70	ГОСТ16530-83 ГОСТ19325-73	ГОСТ16530-83 ГОСТ18498-89
	Розрахунки геометрії	ГОСТ16532-70-зовнішнє зачеплення ГОСТ19274-73-внутрішнє зачеплення ГОСТ 17744-72 Передачі Новікова з двома лініями зачеплення циліндричні. ГОСТ 13552-81 Ланцюги приводні зубчасті. Технічні умови (зі Зміною N 1)		ГОСТ19624-74-прямозубие ГОСТ19326-73-з круговим зубом	ГОСТ19650-97- циліндричні ГОСТ17696-89- глобоїдні
	Модулі	ГОСТ9563-60, ГОСТ 14186-69 Колеса зубчасті циліндричні передач типу Новікова.	ГОСТ9563-80	ГОСТ9563-80	ГОСТ19672-74
	Вихідні контури	ГОСТ13755-81, ГОСТ Р 50531-93-висконапряженние передачі, ГОСТ 9587-81 - дрібномодульні. (Зі Зміною N 1), ГОСТ 30224-96 Передачі зубчасті Новікова циліндричні з твердістю поверхні зубів не менше 35 HRC (e). ГОСТ 15023-76 Передачі Новікова циліндричні з двома лініями зачеплення	ГОСТ17755-81 ГОСТ 9587-81 - Передачі зубчасті дрібномодульні .	ГОСТ 13754-81-з прямими зубами. ГОСТ16202-81-з круговим зубом	ГОСТ20184-74 ГОСТ 24438-80 - Передачі глобоїдні. ГОСТ 19036-94 - Передачі черв'ячні циліндричні.
	Допуски	ГОСТ1643-81 ГОСТ 9178-81 - дрібномодульні ГОСТ 8889-88 Передачі зубчасті турбін і компресорних машин. Технічні вимоги. методи контролю	ГОСТ10242-81 ГОСТ 13506-81 - дрібномодульні. (Зі	ГОСТ1758-81- ГОСТ 9368-81 - мелко модульные	ГОСТ 9774-81 - циліндричні дрібномодульні. ГОСТ 16502-83 - глобоїдні.

		ГОСТ 13678-73- дрібномодульні з годинниковим профілем	Зміною N 1)		ГОСТ3675- 81-циліндричні
/п	Найменування параметрів стандартизації	Передачі			
		Циліндричні	Рейкові	Конічні і гіпоїдні	Черв'ячні
	Основні параметри	ГОСТ2185-66 ГОСТ 13733-77 - дрібномодульні ГОСТ 13678-73- дрібномодульні з годинниковим профілем		ГОСТ12289-76	ГОСТ2144- 76- циліндричні ГОСТ9369- 77- глобоїдні
	Правила виконання креслень	ГОСТ2.308-79	ГОСТ2.308-79	ГОСТ2.405-75 ГОСТ2.308-79	ГОСТ2.308-79
	Розрахунки на міцність	ГОСТ 592-81 Розрахунок ланцюгової передачі			ГОСТ 19650- 97
	Шорсткість поверхонь	ГОСТ2789-73	ГОСТ2789-73	ГОСТ2789-73	ГОСТ2789-73
0	Основні відхилення діаметрів отворів і валів в системі отвору	ГОСТ 7713-62 - Допуски і посадки. Основні визначення	ГОСТ25347- 87 ГОСТ 7713-62 - Допуски і посадки. Основні визначення	ГОСТ25347-87 ГОСТ 7713-62 - Допуски і посадки. Основні визначення	ГОСТ25347- 87 ГОСТ 7713-62 - Допуски і посадки. Основні визначення
1	Допуску форми і розташування елементів зубчастого вінця	ГОСТ24643-81	ГОСТ24643- 81	ГОСТ24643-81	ГОСТ24643- 81

Параметри стандартизації наведені для циліндричних передач зовнішнього і внутрішнього зачеплення, передач Новікова з двома лініями зачеплення, ланцюги приводні зубчасті.

Вихідний контур основної зубчастої рейки приймається в перерізі, нормальному до напрямку зуба по ГОСТ13755-81, по ГОСТ Р 50531-93 для високонапружених передач, по ГОСТ 9587-81 для дрібномодульних, по ГОСТ 30224-96 для передач зубчастих Новікова циліндричних з твердістю поверхні зубів не менше 35 HRC (e), по ГОСТ 15023-76 для передач Новікова циліндричних з двома лініями зачеплення [1, 2, 3].

Профіль зубів ріжучого інструменту здається відповідно до контуром основної (вихідної) рейки.

2. Британські стандартні основні рейки

Основні рейки Англії нормалізовані стандартами BSS 436 і BSS 436 і практично відповідають стандартам СНД [1]

3. Німецька стандартна основна рейка

Основна німецька рейка нормалізована стандартом DIN 867; контур рейки наведено на рис. Б.1.

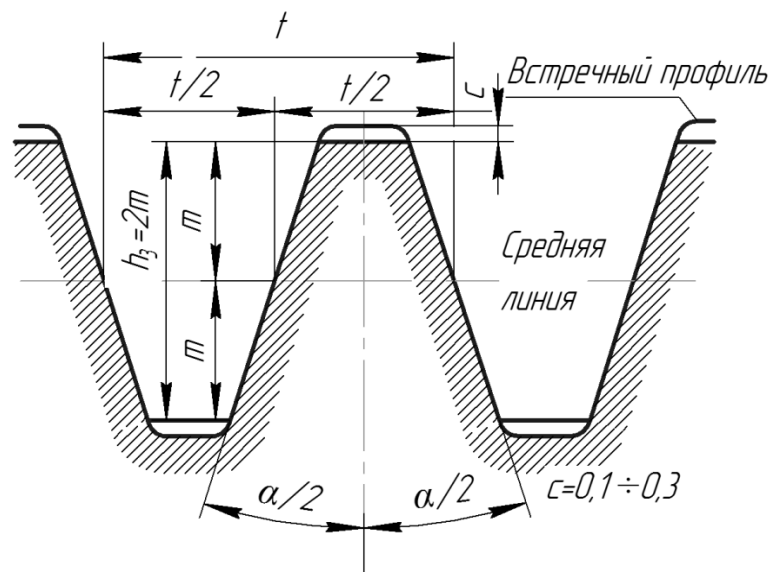


Рисунок Б.1 – Контур німецької стандартної основної рейки DIN 867

4. Французькі стандартні основні рейки

У Франції прийнято дві основні рейки:

- 1) стандартна основна рейка з кутом зачеплення і зубом нормальної висоти;
 - 2) стандартна основна рейка з кутом зачеплення і укороченим зубом;
- контур цієї рейки наведено на рис. Б.2.

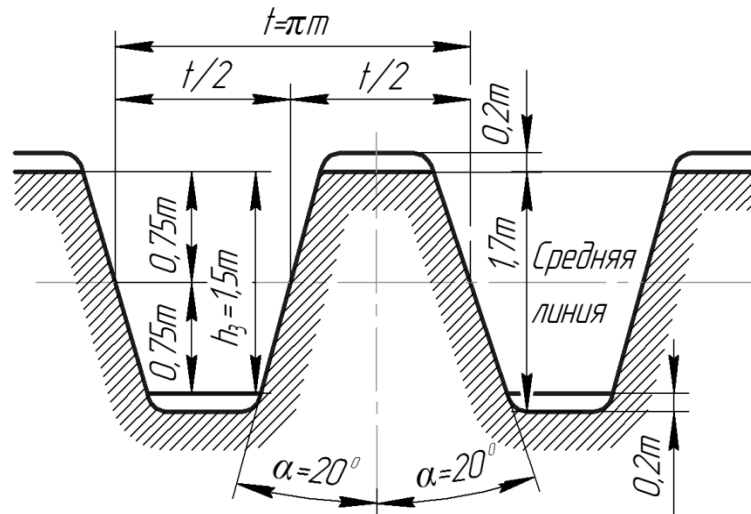


Рисунок Б.2 – Контур французької стандартної основний рейки з укороченим зубом

Стандартна основна рейка з кутом зачеплення (рис. Б.3) застосовується і в даний час. Широке застосування знаходить у відкритих передачах поліграфічних машин.

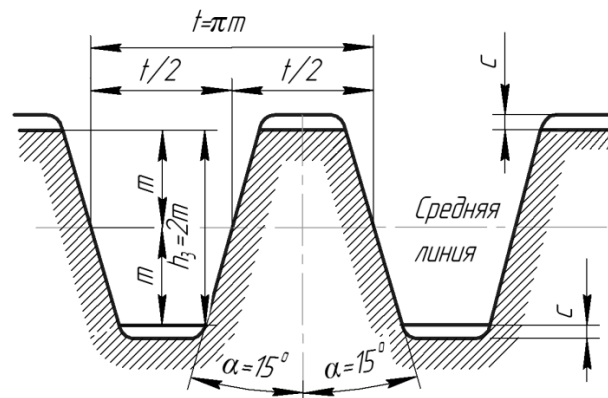


Рисунок Б.3– Контур стандартної основний рейки з кутом зачеплення і зубом нормальної висоти.

5. Американські стандартні основні рейки

У США застосовується цілий ряд систем основних рейок, з яких найбільшим поширенням користаються: одна комбінована евольвентної-циклоїдальних і три чисто евольвентні основні рейки [1]

Стандартна основна рейка з кутом зачеплення $14\frac{1}{2}^{\circ}$ комбінованої системи ASAB61 (Standard $14\frac{1}{2}^{\circ}$ composite involute system).

Контур американської стандартної основної рейки з кутом зачеплення $14\frac{1}{2}^{\circ}$ комбінованої системи наведено на рис. Б.4.

Профіль зуба рейки - щось середнє між евольвентним і циклоїдним профілями. Середня частина профілю зуба рейки являє собою пряму з нахилом $14\frac{1}{2}^{\circ}$. Тому в зв'язаному зубі тільки ця частина окреслена по евольвенті. Головка і ніжка зуба в теоретичному профілі основної рейки окреслені по циклоїді.

У практичному профілі основної рейки циклоїди замінені дугою кола радіуса.

$$r = \frac{3,75}{p} = 3,75m$$

де p -діаметральний питч.

Найменше число зубів колеса цієї системи, нарізується без підрізання, дорівнює 12.

Нарізування коліс цієї системи може проводитися фасонними пальцьовими або дисковими фрезами за методом одиничного поділу. При попередньому нарізанні зубів на робочих поверхнях зубів фрез виконують стружкорозділительні канавки в шаховому порядку, що забезпечує підвищення стійкості фрез. Вершина фрез виконується з радіусом для

стабілізації рівномірного навантаження на вершину зубів. Переточування фрез по передній поверхні повинна забезпечувати мінімальний радіус ріжучої кромки ρ в межах $\rho = 10\text{-}30\text{ мкм}$

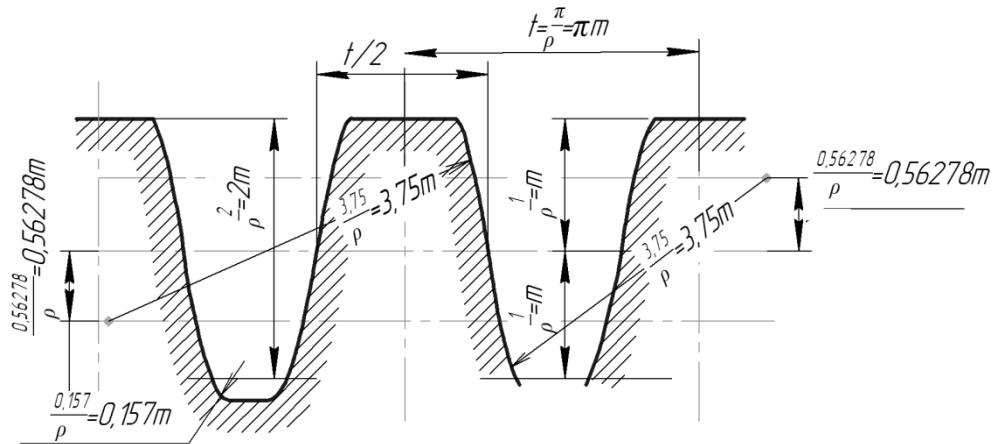


Рисунок Б.4 – Контур американської стандартної комбінованої основний рейки з кутом зацеплення $\alpha = 14\frac{1}{2}^\circ$ (стандарт - AGMA практично застосовуваний профіль)

Стандартна основна рейка з кутом зацеплення $14\frac{1}{2}^\circ$ евольвентної системи ASAB61 (The $14\frac{1}{2}^\circ$ generated system) приведена на рис. Б.5.

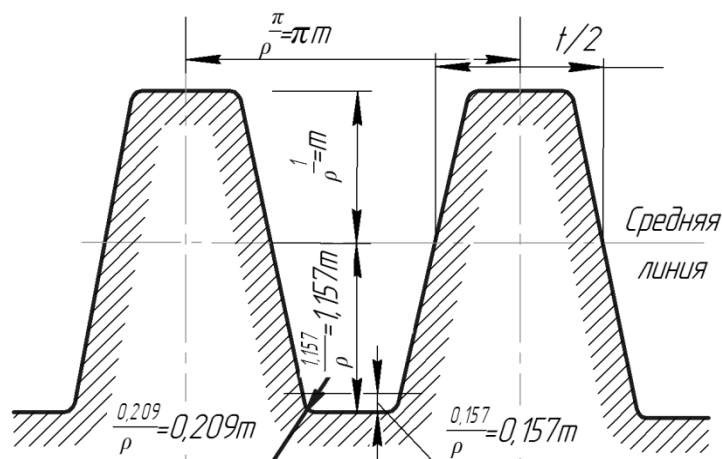


Рисунок Б.5 – Контур американської стандартної основний рейки з кутом зацеплення $\alpha = 14\frac{1}{2}^\circ$ і зубом нормальної висоти.

При колесах з досить великим числом зубів система дасть хороші результати. При колесах з малим числом зубів має місце явище підрізання зубів. Зубчасті колеса цієї системи не можуть правильно зчіплюватися з колесами комбінованої системи.

Ця рейка називається також американської стандартної основний рейкою $14\frac{1}{2}$ -градусного зачеплення з зубом нормальної висоти.

Стандартна основна рейка з кутом зачеплення 20° евольвентної системи ASAB61 (The 20° full-depth system).

Стандартна основна рейка з кутом зачеплення 20° евольвентної Системи приведена на рис. Б.6. Ця рейка називається також американської стандартної основний рейкою 20-градусного зачеплення з зубом нормальної висоти.

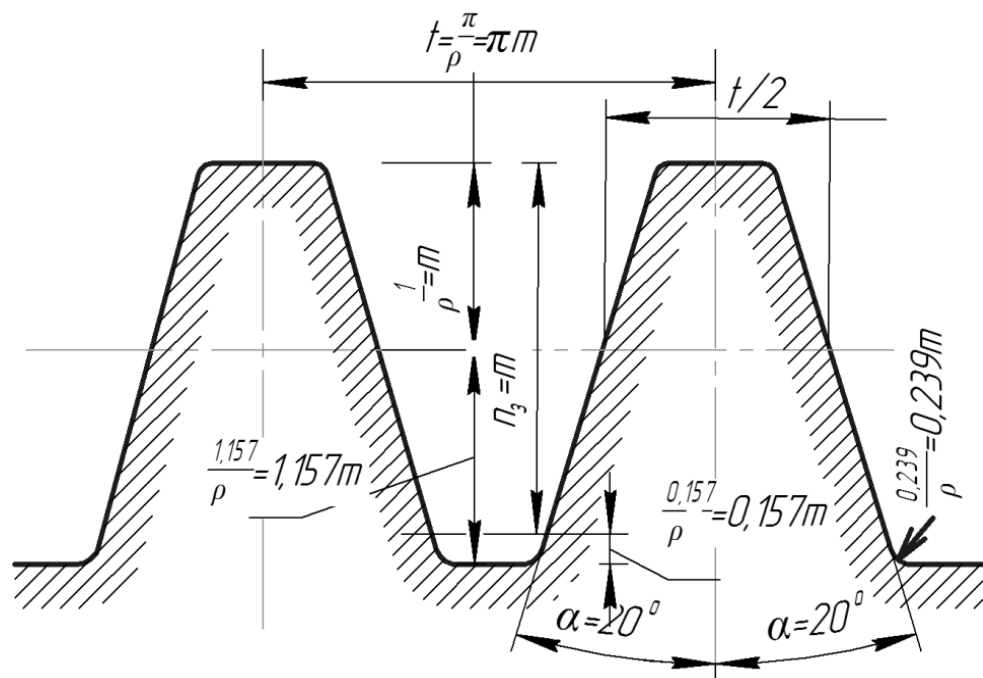


Рисунок Б.6 – Контур американської стандартної основний рейки з кутом зачеплення $\alpha = 20^\circ$ і зубом нормальної висоти.

Стандартна основна рейка з кутом зачеплення $\alpha = 20^\circ$ евольвентної системи з укороченим зубом ASAB61 (The $\alpha = 20^\circ$ stub-tooth system).

Стандартна основна рейка з кутом зачеплення $\alpha = 20^\circ$ евольвентної системи з укороченим зубом приведена на рис. Б.7.

Ця система виникла з розвитком автомобільної промисловості, коли з'явилася необхідність в компактних зубчастих передачах з колесами з малим числом зубів, що витримують значні зусилля.

Евольвентний профіль з кутом зачеплення $\alpha = 20^\circ$ і з укороченим зубом рейок державного стандарту США і стандарту Феллоу не взаємозамінні, що видно з табл. Б.2.

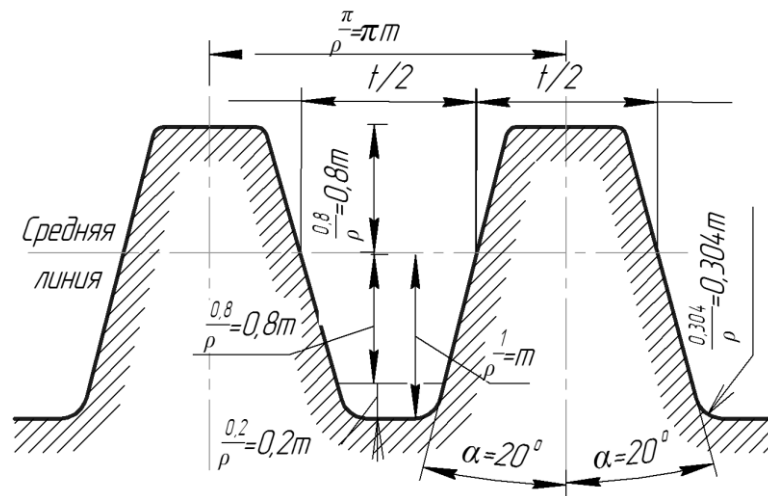


Рисунок Б.7 – Контур американської стандартної основний рейки з кутом зачеплення $\alpha = 20^\circ$ і укороченим зубом.

Таблиця Б.2 – Порівняння американського державного стандарту і стандарту Феллоу на евольвентний профіль $14\frac{1}{2}^\circ$ і 20° з нормальною висотою зуба

Параметри зуба	Повна висота h	Висота головки h'	Висота ножки зуба h''	Радіальний зазор c
Державний стандарт США	$2,157m = \frac{2,157}{p}$	$m = \frac{1}{p}$	$1,157m = \frac{1,157}{p}$	$0,157m = \frac{0,157}{p}$
Стандарт Феллоу	$2,25m = \frac{2,25}{p}$	$m = \frac{1}{p}$	$1,25m = \frac{1,25}{p}$	$0,25m = \frac{0,25}{p}$

6. Модульня і пітчевих системи

Залежності між елементами профілю зуба.

Існують дві основні залежності між елементами зуба: модульня і пітчевих.

Модульня система

Модульня система прийнята в країнах з метричної системою заходів, одиниця довжини в модульній системі - міліметр. У цій системі унормовано відношення кроку по ділильної окружності до $\pi = 3,14159$, яке називається

модулем і рівне $m = \frac{t}{\pi}, \text{мм}$

Всі елементи нормального зубчастого колеса в цій системі прямо пропорційні модулю.

У Україні прийнятий стандарт модулів ГОСТ9563-80 для циліндричних зубчастих коліс зовнішнього і внутрішнього зачеплення, рейкових передач, конічних і гіпоїдних коліс (табл. Б.3);

ГОСТ 14186-69 для коліс зубчастих циліндричних передач типу Новикова;

ГОСТ19672-74 для черв'ячних циліндричних і глобоїдних передач.

Таблиця Б.3 – Ряд модулів (в мм)

1-й ряд	0,05	0,06	0,08	0,1	0,12	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6
2-й ряд	0,055	0,07	0,09	0,11	0,14	0,18	0,22	0,28	0,35	0,45	0,55	0,7

1-й ряд	0,8	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0	3,75*	4,0	5	6	6,5*
2-й ряд	0,9	1,125	1,375	1,75	2,25	2,75	3,25*	3,5	4,25	4,5	5,5	7

1-й ряд	8	10	12	16	20	25	32	40	50	60	80	100
2-й ряд	9	11	14	18	22	28	36	45	55	70	90	

Модуля з * допускається застосування в автомобільній і тракторній промисловості.

У технічно обгрунтованих випадках застосовуються модуля відрізняються від встановлених в стандарті.

Для циліндричних косозубих коліс, рейок, конічних і черв'ячних модуль встановлюється по нормальному кроці, т. Е. $M = mn$.

Німеччині значення модулів нормалізовані стандартом DIN780, який регламентує ряд модулів в межах 0,3-75 мм включно.

Стандартні значення модуля по DIN780 (в мм): 0,3; (0,35); 0,4; (0,45); 0,5; (0,55); 0,6; (0,65); 0,7; 0,8; 0,9; 1; 1,25; 1,5; 1,75; 2; 2,25; 2,5; 2,75; 3; 3,25; 3,5; 3,75; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 18; 20; 22; 24; 27; 30; 33; 36; 39; 42; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75.

Пітчева система

Пітчева система прийнята в країнах з дюймовою системою заходів; одиниця довжини в пітчевій системі - дюйм (1 " = 25,4 мм).

У цій системі унормовано ставлення π до кроку по ділильної окружності, вираженого в дюймах.

Залежно від того, який крок покладено в основу системи, розрізняють наступні основні види пітчевих систем:

- 1) система діаметральної пітчу (p);
- 2) -система окружного пітчу (P);
- 3) система хордального пітчу.

Найбільшого поширення має система діаметральної пітчу, яка застосовується в основному у коліс невеликих, розмірів.

Діаметральним питчем (p) називається відношення числа зубів колеса до діаметра ділильного кола (вираженого в дюймах):

$$p = \frac{z}{d_o}, \text{ мм}$$

Окружним питчем (Р) називається крок між зубами по ділильної окружності в дюймах. Система окружного пітчу застосовується для великогабаритних коліс з великим зубом.

Хордального питчем називається крок між двома зубами, виміряний по хорді дуги ділильного кола між двома сусідніми зубами і виражений в дюймах.

Хордальний питч дорівнює діаметру ділильного кола, помноженому на $\sin\gamma_0$ (половина кутовий товщини зуба на ділильної окружності).

$$P_h = (d_d \sin\gamma_0)$$

Найбільш уживаний ряд жорстка (в дюймах): $\frac{1}{2}$; $\frac{3}{4}$; 1; $1\frac{1}{4}$; $1\frac{1}{2}$; $1\frac{3}{4}$; 2; $2\frac{1}{4}$; $2\frac{1}{2}$; $2\frac{3}{4}$; 3; $3\frac{1}{2}$; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 24; 28; 32; 36; 40; 48.

7. Співвідношення модульної і пітчевої систем

Співвідношення між модулем і пітчами визначається наступними залежностями:

$$p = \frac{z}{\frac{mz}{25,4}} = \frac{25,4}{m}$$

$$p = \frac{z}{\frac{Pz}{\pi}} = \frac{\pi}{P}$$

Отношение $\frac{\pi}{P}$ нормировано в США и Англии:

$$P = \frac{\pi}{p}$$

$$P = \frac{\pi m z}{25,4 z} = \frac{\pi m}{25,4} = \frac{m}{8,09}$$

$$m = \frac{25,4}{p}; \quad m = 8,09P.$$

8. Система подвійного модуля і пітчу

Для зменшення мінімального числа зубів $z_{\text{МИН}}$ колеса, вільного від підрізання, застосовують 20-градусні системи зачеплення, для кожного модуля або пітчу яких існує особливе співвідношення розмірів зуба по висоті.

У таких системах розміри зуба визначаються двома модулями, що даються на кресленні у вигляді дроби $\frac{m_1}{m_2}$. Модуль в чисельнику (m_1) являє собою відношення кроку по ділильної окружності в міліметрах до π і служить для розрахунку діаметра ділильного кола ($d_{\partial} = mz$) і товщини зуба. Модуль в знаменнику (m_2) служить для визначення розмірів зуба по висоті.

Висота головки зуба:

$$h' = m_2$$

висота ніжки зуба:

$$h'' = m_2 + c$$

повна висота зуба

$$h = h' + h'' = 2m_2 + c$$

Де c - радіальний зазор.

Застосовуються також системи зачеплення з подвійним пітчем.

Вони задаються у вигляді дроби $\frac{p_1}{p_2}$. Діаметральний пітч в чисельнику (p_1)

служить для визначення діаметра ділильного кола і товщини зуба, діаметральний пітч в знаменнику (p_2) - для визначення розмірів зуба по висоті.

Таким чином, в цій системі зачеплення висоти головок зубів малого н великого коліс залишаються однаковими, т. е. $h'_1 = h'_2$, а змінюється повна висота зуба h , яка зазвичай береться рівній $h = 1,8m$ замість $h = 2,2m$ у нормального зачеплення.

Другий модуль для підрахунку висоти зуба ставити не обов'язково, так як він

не має певного геометричного сенсу і знижувати висоту зуба можна за допомогою

зміни його коефіцієнта висоти $f = \frac{h''}{m}$.

Цей вид зачеплення називають також зачепленням із застосуванням спеціальних стандартних укорочених зубів.

Недоліком цього зачеплення є, зменшення ступеня перекриття.

9. Розрахунок зубчастих передач з циліндричними некоррігірованими колесами при модульній і пітчевих системах в ремонтному виробництві.

Циліндричні некоррігорованні зубчасті колеса є одними з найбільш поширених видів зубчастих передач.

Всі елементи цих коліс підлягають розрахунку і визначаються по нижче наведеним залежностям. Розрахунок необхідно перевірити по заміряному міжцентровій (міжосьовому) відстані; зчипною пари зубчастих коліс (Табл. Б.4 і Б.5).

Таблица Б.4 – Расчетные формулы при модульной системе.

№ п/п	Найменування параметрів	Розрахункові формули при модульній системі (Розміри в мм)	Приклад розрахунку
1	Число зубів коліс	$Z1 / Z2$ визначаються виміром	40/60
2	Діаметр окружності виступів	$De1 / De2$ визначаються виміром	
3	Висота зуба	h визначаються виміром	
4	Міжцентрову (міжосьова) відстань	A визначаються виміром	200
5	Коефіцієнт висоти головки зуба	$f0$ визначаються виміром	

6	Модуль	$m = \frac{D_{e1}}{z_1 + 2}; m = \frac{D_{e2}}{z_2 + 2};$ $m = \frac{h}{2,25}; m = \frac{2A}{z_1 + z_2}$ <p>(З отриманих значень вибирається найближче стандартне значення модуля)</p>	$m = \frac{2 \cdot 200}{40 + 60} = 4 \text{ мм}$
7	Крок за ділильної окружності	$t = \pi m$	
8	Діаметр ділильної окружності	$d_{d1} = z_1 m; d_{d2} = z_2 m;$	160/240
9	Діаметр окружності виступів	$D_{e1} = d_{d1} + 2 f_0 m = (z_1 + 2) m$ $D_{e2} = d_{d2} + 2 f_0 m = (z_2 + 2) m$ (при $f_0 = 1$)	168 248
10	Висота головки зуба	$h' = m; h' 1 = h' 2$ (при $f_0 = 1$)	4
11	Висота ніжки зуба	$h'' = 1,25 m; h'' 1 = h'' 2$	5
12	Висота зуба	$h = h' + h'' = 2,25 m; h 1 = h 2$	9
13	Номінальна товщина зуба по дузі ділильного кола	$S_{d1} = \frac{\pi m}{2} = \frac{t}{2}; S_{d1} = S_{d2}$	
14	Половина кутів товщини зуба на ділильної окружності	$\gamma_{d1} = \frac{S_{d1}}{d_{d1}} \cdot \frac{180}{\pi};$ $\gamma_{d2} = \frac{S_{d2}}{d_{d2}} \cdot \frac{180}{\pi}$	
15	Номінальна товщина зуба по хорді ділильної окружності	$S_{d1} = d_{d1} \sin \gamma_{d1};$ $S_{d2} = d_{d2} \sin \gamma_{d2};$	
16	Глибина виміру товщини зуба	$h_{x1} = \frac{1}{2} (D_{e1} - d_{d1} \cos \gamma_{d1};)$ $h_{x2} = \frac{1}{2} (D_{e2} - d_{d2} \cos \gamma_{d2};)$	

17	Міжцентрову (міжосьова) відстань	$A = \left(\frac{z_1 + z_2}{2}\right)m = \frac{d_{d1} + d_{d2}}{2}$	
18	Для косозубих, шевронних коліс визначається кут нахилу зубів на ділильному циліндрі	$\cos \beta_d = \frac{mz_1 + mz_2}{2A}$	При розрахунку косозубих коліс діаметри ділильних кіл множаться на коефіцієнт: $\frac{1}{\cos \beta_d}$

Таблиця Б.5 – Розрахункові формули при пітчевої системі.

№ п/п	Найменування параметрів	Розрахункові формули при модульній системі (Розміри в дюймах)	Приклад розрахунку
1	Число зубів коліс	Z1 /Z2 визначаються виміром	
2	Діаметр окружності виступів	De1/ De2 визначаються виміром	
3	Висота зуба	h визначаються виміром	
4	Міжцентрову (міжосьова) відстань	A визначаються виміром	
5	Коефіцієнт висоти головки зуба	f ₀ визначаються виміром	
6	діаметральний питч (З отриманих значень вибирається найближче стандартне значення діаметральної або окружного питчу) ($p = \frac{\pi}{P}$)	$p = \frac{z+2}{D_e}; p = \frac{2,157}{h};$ $p = \frac{z_1 + z_2}{2A};$	
7	Крок за ділильної окружності	$t = \frac{\pi}{p}; t = P$	

8	Діаметр ділильної окружності	$d_{d1} = \frac{z_1}{p} = \frac{z_1 P}{\pi};$ $d_{d2} = \frac{z_2}{p} = \frac{z_2 P}{\pi};$	
9	Діаметр окружності виступів	$D_{e1} = \frac{z_1 + 2}{p} = \frac{(z_1 + 2)P}{\pi}$ $D_{e2} = \frac{z_2 + 2}{p} = \frac{(z_2 + 2)P}{\pi}$ <p>(при $f_0=1$)</p>	
10	Висота головки зуба	$h' = \frac{1}{p} = \frac{P}{\pi}$ <p>(при $f_0=1$)</p>	
11	Висота ніжки зуба	$h'' = \frac{1,157}{p} = \frac{1,157P}{\pi}$	
12	Висота зуба	$h = \frac{2,157}{p} = \frac{2,157P}{\pi} = \frac{P}{0,68}$	
13	Номінальна товщина зуба по дузі ділильного кола	$S_d = \frac{\pi}{2p} = \frac{P}{2};$	
14	Половина кутовий товщини зуба на ділильної окружності	$\gamma_{d1} = \frac{S_{d1}}{d_{d1}} \cdot \frac{180}{\pi};$ $\gamma_{d2} = \frac{S_{d2}}{d_{d2}} \cdot \frac{180}{\pi}$	
15	Номінальна товщина зуба по хорді ділильної окружності	$S_{d1} = d_{d1} \sin \gamma_{d1};$ $S_{d2} = d_{d2} \sin \gamma_{d2};$	
16	Глибина виміру товщини зуба	$h_{x1} = \frac{1}{2}(D_{e1} - d_{d1} \cos \gamma_{d1});$ $h_{x2} = \frac{1}{2}(D_{e2} - d_{d2} \cos \gamma_{d2});$	
17	Міжцентрову (міжосьова) відстань	$A = \left(\frac{z_1 + z_2}{2p}\right) = \frac{z_1 + z_2}{2} P$	
18	Для косозубих, шевронних коліс визначається кут нахилу зубів на ділильному циліндрі	$\cos \beta_d = \frac{mz_1 + mz_2}{2A}$	<p>При розрахунку косозубих коліс діаметри ділильних кіл множаться на коефіцієнт:</p> $\frac{1}{\cos \beta_d}$

10. Ідентифікація геометричних параметрів зубчастих передач і визначення коригувати зубчастих коліс при відновленні зубчастих передач

У ремонтних роботах однієї з найважливіших завдань є ідентифікація геометричних параметрів зубчастої передачі, особливо якщо при ремонті має бути замінено одне колесо з зубчастої пари. Під ідентифікацією геометричних параметрів зубчастої передачі розуміється визначення основних елементів зачеплення, зазначених в табл. Б.4 і Б.5, необхідних для виготовлення нової передачі або одного нового колеса передачі при відсутності конструкторської документації [1, 2].

При ідентифікації ретельно обмірять ряд основних елементів зачеплення, які легко і надійно піддаються цьому обміру. Інші елементи, а також (з метою додаткової перевірки) і ряд елементів визначають шляхом розрахунку.

Геометрія зачеплення пари зубчастих коліс характеризується параметрами вихідного контуру зубчастої рейки, який покладено в основу при розрахунку передачі. Тому при ідентифікації зачеплення необхідно в першу чергу встановити основні параметри вихідного контуру зубчастої рейки, по якому виготовляють інструмент, потім товщину зуба, а для косозубих коліс, крім того, кут нахилу зубів.

Основними- параметрами вихідного контуру зубчастої рейки є: α_0 - профільний кут вихідного контуру, f_0 - коефіцієнт висоти зуба вихідного контуру, c - радіальний зазор.

11. Розшифровка геометричних параметрів зубчастих передач в ремонтному виробництві

У табл. Б.6 наведені практично застосовуються основні параметри вихідного контуру зубчастої рейки.

Таблиця Б.6 – Найбільш часто зустрічаються значення основних параметрів вихідного контуру зубчастої рейки

Параметри	СН Г	США			Англія		Германія			Франція	
α_0	20^0	$14\frac{1}{2}''$	20^0	20^0	$14\frac{1}{2}''$	20^0	15^0	20^0	20^0	20^0	20^0
f_0	1,0	1,0	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	0,8	1,0	0,7 5
c	0,25	0,157	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
вихідна база	Мо дуль, ь, m	Діаметральний питч р			діаметральни й питч р		Модуль, m			Модуль, m	

12. Замер і визначення елементів вихідного контуру зубчастої рейки в ремонтному виробництві

У зубчастих передачах в модульній системі можуть зустрітися наступні значення кута зачеплення α : 15° , $17^\circ 30'$, 20° , $22^\circ 30'$, іноді і 25° .

У зубчастих передачах в пітчевої системі можуть зустрітися наступні значення кута зачеплення α : $14^\circ 30'$, 15° , 16° , $17^\circ 30'$, 20° і $22^\circ 30'$.

При некомплектної заміні зубчастої передачі, якщо одне з зубчастих коліс зберігається і необхідно виготовити тільки інше, правильне визначення кута зачеплення надзвичайно важливо для роботи майбутньої зубчастої передачі.

Існує кілька способів визначення кута зачеплення.

1. обкатки інструментом - візуально з контролем на просвіт. Для цієї мети зубчасте колесо, у якого необхідно визначити кут зачеплення, встановлюють на оправлення зуборізного верстата і обкатують зуборізних інструментів: черв'ячними фрезами, здолб'яком або зуборізна гребінками, фасонними д позовними або пальцьовими фрезами.

Інструменти вибирають з різними кутами зачеплення і в процесі обкатки встановлюють, при якому куті виходить найбільш плавне прилягання інструмента до колеса.

2. Графічний спосіб. Будують нормальний евольвентний профіль зуба для даного модуля, числа зубів і найбільш ймовірного в даному випадку кута зачеплення. Для зручності користування профіль зуба викреслюють з допомогою комп'ютерної графіки збільшеному масштабі. На кресленні профілю зуба наносять в тому ж масштабі сітку фактичних розмірів зуба. Для цієї мети зубоміри через кожен 1 мм по висоті вимірюють товщину зуба з точністю до - 0,01 мм.

Що стосується розбіжності профілів необхідно побудувати новий профіль зуба для іншого кута зачеплення і знову нанести сітку фактичних розмірів зуба.

1. Розрахунковий спосіб. Формули для визначення кута зачеплення мають такий вигляд:

$$\cos \alpha = \frac{m(z_1 + z_2)}{2A} \cos \alpha_0$$

$$\cos \alpha = \frac{t_o}{\pi m}$$

де А-міжцентрову відстань, мм, t_o - основний крок, мм.

13. Визначення модуля і півчугу зачеплення при відновленні зубчастих передач

Для визначення системи зачеплення (модульна або півчугих) і встановлення величини модуля або діаметральної півчугу рекомендується:

1.Вияснить, в якій системі виміру - метричної або дюймової виконаний редуктор, вузол, або машина, якій належить левередж.

Зазвичай редуктора, вузли, машини американського, англійського і канадського виробництва зазвичай виконуються в дюймовому вимірі.

2. Виконати розрахунок значення модуля m або діаметральної пiтчу p (з перекладом останнього в міліметри) за такими формулами:

$$m \approx \frac{h}{2,2}; m = \frac{D_e}{z + 2};$$

$$p \approx \frac{2,157}{h} \cdot 25,4 \text{ мм}; p \approx \frac{z + 2}{D_e} \cdot 25,4 \text{ мм}$$

3. На підставі отриманих підрахунком значень m і p уточнити, користуючись табл. 4 і 5, модуль або пiтчу зачеплення /

Висота зуба h .

Розмір висоти зуба h може служити для визначення модуля або пiтчу і наявності коригування [1, 2]

Висоту зуба вимірюють одним з наведених нижче способів:

1. Штангенциркулем. Замір штангенциркулем може здійснюватися двома способами:

а) шляхом вимірювання відстані від стінки отвору зубчастого колеса до головки зуба H_1 і до ніжки зуба H_2 (Рис. Б.8 і Рис. Б.9); в цьому випадку висоту зуба визначають за формулою:

$$h = H_1 - H_2$$

б) шляхом вимірювання діаметрів кіл виступів і западин; в цьому випадку висоту зуба визначають як половину їх різниці:

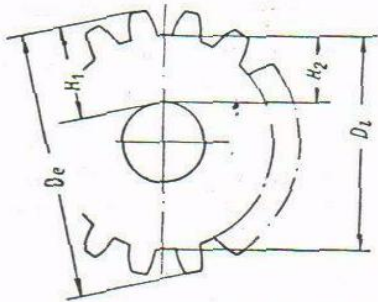


Рисунок Б.8 – Схема вимірювання висоти зуба штангенциркулем

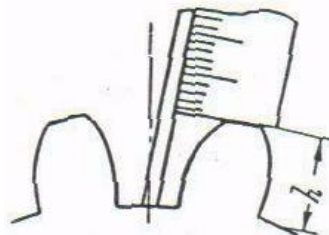


Рисунок Б.9 – Схема вимірювання висоти зуба глибомером

2. Глибиномір. При цьому способі висота зуба h виходить безпосередньо виміром глибомером (Рис. Б.9). Спосіб не дає достатньо точних результатів і може застосовуватися з метою орієнтовного контролю.

3. По відбитку на папері. Рекомендується зробити на папері чіткі відбитки покритих фарбою зубів або навіть (якщо дозволяють розміри) всього вимірюваного колеса. Після виміру ряду зубів на відбитку, величину h визначають як середнє-арифметичне з показань замірів.

Крім визначення величини h , чіткі відбитки зубів па папері можуть служити для контролю інших параметрів вимірюваного колеса.

Додаток В

Діагностичний стенд для вимірювання моментів, що крутять, зусиль різання, вібрації на базі модуля USB-3000 виробництва компанії R-Technology

Вимірювання параметрів шорсткості зношених і відновлених великогабаритних зубчастих колесосуществляється профілометри-профілографі Mitutoyo Surftest SJ-301 (табл. В.1), що працює за методом обмацування поверхні алмазної голкою. Портативний профілометр-профілограф (рис. В.1) обладнаний пілзахисною сенсорною панеллю керування і вбудованим принтером.



Рисунок В.1 – Профілометр-профілограф Mitutoyo Surftest SJ-301

Для підвищення оперативності роботи профілометр-профілограф оснащений великими клавішами, а на сенсорному РК-дисплеї розташовуються іконки, які дозволяють управляти настройками і режимами вимірювань за допомогою спеціальної сенсорної ручки - стилуса.

У пам'яті профілометра-профілографа SJ-301 може зберігатися п'ять різних умов вимірювань. Дані вимірювань можуть бути завантажені на зовнішній ПК. Дані вимірювань відразу зберігаються в пам'яті приладу, а обробка і / або роздруківка даних можуть бути зроблені пізніше. Висновок даних здійснюється за основними стандартами: DIN, ISO, ANSI і JIS.

Додаткова карта пам'яті дозволяє зберігати до 20 налаштувань умов вимірювань і їх статистичну обробку.

Таблиця В.1 – Технічні характеристики Mitutoyo Surftest SJ-301

Діапазон вимірювань:	
1	2
Ось Z	350 мкм
Ось X	12,5 мм
Блок приводу:	
Вимірювання	0,25 мм/с, 0,5 мм/с
Повернення	1,0 мм/с
Довжина кабеля	1 м
Стандартний датчик	(178–395)
Метод вимірювань	Індуктивний метод
Діапазон вимірювань	350 мкм
Щуп	Алмазний наконечник
Радіус	2 мкм
Радіус опори	40 мм
вимірювальне зусилля	0,75 мН
Дисплейний блок:	
Профілі	Вихідний профіль (P), профіль шорсткості (R), DIN 4776, MOTIF
Параметри	Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Rq, Rv, Sm, S, Pc, R3z, mr, Rpk, Rvk, dc, Rk, Mr 1, Mr 2, Lo, Ppi, R, AR, Rx, A1, A2
Аналітичні графіки	BAC 1, BAC 2, ADC
Стандарти	ГОСТ, DIN, ISO, ANSI, JIS DIN, ISO, ANSI, JIS

шорсткості	
Довжина оцінки (L)	0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм, 0,08 мм, 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм, 8 мм або ввод
Відсічення кроку	lс: 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм lс: 2,5 мкм, 8 мкм lс: 0,08 мм, 0,25 мм, 0,8 мм, 2,5 мм, 8 мм lс: 2,5 мкм, 8 мкм, 25 мкм
Число базових довжин	x 1, x 3, x 5, x L
Фільтр	2RC–75 %, 2RC–75 % (Фазокоректований фільтр), Гаусів фільтр - 50%
Діапазон відображуваних величин	<i>Ra, Rq: 0,01 мкм...100 мкм</i> <i>Ry, Rz, Rt, Rv, Rz, Rk, Rpk, Rvk, R, Rp, Rx, AR, W,</i> <i>Wx, Wte: 0,02 мкм...350 мкм</i> S, Sm: 2 мкм...4000 мкм HSC, Pc: 2,5/см...5000/см, Ppi: 6,35...12700/inch dc: – 350 мкм... + 350 мкм Lo: 0,1 мм...99,999 мм mr, Mr 1, Mr 2: 0...100 % A1, A2: 0...15000
Збільшення зображення на дисплеї:	
Вертикальне	10 x, 20 x, 50 x, 100 x, 200 x, 500 x, 1000 x, 2000 x, 5000 x, 10000 x, 20000 x, 50000 x, 100000 x, автоматично
Горизонтальне	1 x, 2 x, 5 x, 10 x, 20 x, 50 x, 100 x, 200 x, 500 x, 1000 x, автоматично
Термопринтер (Ширина друку: 48 мм)	

Статистика	Max / Min, середнє значення, стандартне відхилення (s), проходження, таблиця частотного розподілу
Оцінка допусків	Значення верхнього / нижнього меж для трьох параметрів
Збереження налаштувань вимірювання	5 наборів налаштувань вимірювань
Сплячий режим (виключення)	Автоматично після 5 хвилин бездіяльності
Калібрування	Автоматичне калібрування Введення значень і вимір еталона шорсткості
Джерело живлення	Мережевий адаптер AC (DC 7,5 В 1,5 Вт) або вбудований заряджається акумулятор
Акумулятор:	
Час зарядки	12 годин (на 500 вимірів) 15 годин (на 600 вимірів без печатки)
Введення / висновок даних	RS-232 C інтерфейс для введення / виведення, DIGIMATIC вихід

Вимірювання моментів, що крутять, зусиль різання проводилися динамометром типу 9257BA. Динамометром одночасно вимірюється крутний момент $M_{кр}$ і три взаємно перпендикулярні сили P_x , P_y , P_z . Чутливим елементом приладу є п'єзоелектричний пластина (використовується набір пластин), яка виробляє електричний заряд при додатку навантаження. При додатку навантаження заряд подається на підсилювач, з якого знімається напруга, пропорційне прикладається навантаження (табл. В.2).

Таблиця В.2 – Характеристики динамометра і підсилювача заряду

Динамометр Тип 9257BA

Допустимі величини зусиль в діапазонах	Діапазон 1	P_x, P_y	кН	-0,5...0,5
		P_z	кН	-1...1
	Діапазон 2	P_x, P_y	кН	-1...1
		P_z	кН	-2...2
	Діапазон 3	P_x, P_y	кН	-2...2
		P_z	кН	-5...5
	Діапазон 4 P_z как $P_x; P_y \leq 0; 5 P_z$	P_x, P_y	кН	-5...5
		P_z	кН	-5...10
	$M_{кр} = d\phi P_z$	$M_{кр}$	кНм	0...40
Мінімальна величина зусилля, що сприймається динамометром			Н	<0,01
Чутливість		P_x, P_y	мВ / Н	10,0
Діапазон 1		P_z	мВ / Н	5,00
Лінійність			%FSO	$\leq \pm 1$
Гістерезис			%FSO	$\leq \pm 0,5$
Перехресне вплив датчиків			%	$\leq \pm 3$
Жорсткість		C_x, C_y	кН / мкм	>1
		C_z	кН / мкм	>2
Власна частота		$f_o(x; y)$	кГц	$\approx 2,0$
		$f_o(z)$	кГц	$\approx 3,5$
Інтервал робочих температур			оС	0...60
Температурний дрейф нуля при 25°С (від підсилювача)		$P_x, P_y;$	Н / с	$\leq \pm 0,005$
		P_z		$\leq \pm 0,01$
Зеднувальний кабель		L	м	5
Рівень захисту				IP 67
Вага			кг	7,4

Вібрації вимірюються трикомпонентним акселерометром «ГлобалТест AP2043-50». Акселерометр має високу чутливість (≈ 50 мВ / g), тому підсилювач сигналу йому не потрібно (табл. В.3).

При установці на досліджуваний об'єкт акселерометр «ГлобалТест AP2043-50» використовується з магнітом. Недоліками датчика типу AP2043-50 є обмеження по верхньому діапазону вимірюваних частот (до 8 КГц) і висока чутливість при великих амплітудах коливань.

Внаслідок цього акселерометр, при вимірюванні коливань ріжучого інструменту, необхідно встановлювати на відстані від ріжучої кромки з подальшим перерахуванням значень. Перерахунок значень здійснюється за формулою:

$$A_P = K_{\Pi} \cdot A_{И}, \quad (B.1)$$

де A_P - розрахункова амплітуда; $A_{И}$ - виміряна амплітуда; K_{Π} - коефіцієнт пропорційності.

Таблиця В.3 – Характеристики акселерометра «ГлобалТест AP2043-50»

Акселерометр AP2043-50		
Діапазон вимірів	g (9,81м / с ²)	±100
Осьова чутливість (± 2) X	мВ / g	48,4
Осьова чутливість (± 2) Y	мВ / g	43,6
Осьова чутливість (± 2) Z	мВ / g	46,5
Відносна поперечна чутливість X	%	≤1,4
Відносна поперечна чутливість Y	%	≤4,9
Відносна поперечна чутливість Z	%	≤5
Діапазон частот	Гц	0,5...8000
Інтервал робочих температур	С°	-40...125
Маса	г	13
Перевантаження Прискорення	g	±200

Удар		±200
Власна частота	кГц	≈ 30
Лінійність	% FSO	≤±1
Постійний струм	мА	2...20
Напруга живлення	В	18...30
Вихідна напруга максимальне	В	±5
Вихідний опір	Ом	<500
Матеріал, що використовується		титан
Габарити	мм	14×14×14

Уявімо черв'ячну модульну фрезу, встановлену на оправці. Тоді зміщення вершини фрези позначимо точкою ($z = l$), яка знаходиться як добуток виміряного переміщення в т. А (A_{IA}) і коефіцієнта пропорційності (K_{II}). Значення коефіцієнта пропорційності (K_{II}) визначається за формулами (В.1 – В.2).

В діагностичному стенді для збору даних використовується модуль USB-3000 виробництва компанії R-Technology. Модуль призначений для збору і обробки аналогової і цифрової інформації на базі персональних комп'ютерів. Дане обладнання є багатофункціональним пристроєм і може використовуватися як осцилограф, реєстратор і аналізатор спектру. Суттєвою характеристикою модуля USB-3000 є висока швидкість обробки інформації, що дозволяє досліджувати швидко протікають процеси і широкосмугові сигнали. До складу модуля додатково входять двоканальний ЦАП (цифро-аналоговий перетворювач) і логічні входні і вихідні лінії.

$$\begin{aligned}
 Y_A &= \frac{P}{EJ_x} \cdot \left(l \cdot \frac{z^2}{2} - \frac{z^3}{6} \right); \\
 Y_{MAX} &= \frac{Pl^3}{3EJ_x}; \\
 K_{II} &= \frac{Y_{MAX}}{Y_A} = \frac{2l^3}{3lz^2 - z^3}; \\
 A_P &= A_{IA} \cdot \left(\frac{2l^3}{3lz^2 - z^3} \right).
 \end{aligned}
 \tag{B.2}$$

USB-інтерфейс модуля USB-3000 значно спрощує процес підключення до ПЕОМ, забезпечує можливість роботи в режимі Plug & Play і дозволяє використовувати універсальний модуль збору даних (УМСД) в складі мобільних вимірювальних комплексів на базі ноутбука. Застосовувана в модулі шина USB 2.0 дозволяють вести безперервний двобічний введення / виведення даних в режимі реального часу на максимальній швидкості.

Наявність внутрішньої буферизації аналогових каналів дозволяє вирішити проблему міжканального проходження при високих частотах перемикання каналів і гарантує відсутність проникнення комутаційних шумів в лінії зв'язку з об'єктом. Підключення аналогових каналів модуля USB-3000 - диференціальне. Таке підключення джерела сигналу дозволяє знижувати рівень синфазних перешкод. Диференціальне підключення джерел сигналу дозволяє струмів сигнальних ланцюгів протікати по різних каналах, а не через один загальний провід, що підвищує точність вимірювань.

Наявність режимів внутрішньої і зовнішньої синхронізації введення і виведення даних дає можливість застосовувати модуль USB-3000 (табл. В.4) при найрізноманітніших режимах роботи в складі систем збору і обробки інформації.

У модуль вбудований цифровий сигнальний процесор (DSP), що дає можливість управляти об'єктом в реальному часі без використання ресурсів комп'ютера і вести первинну цифрову обробку сигналу при введенні і виведенні.

У конструкцію модуля інтегровано незалежне призначене для користувача ПЗУ (ППЗУ) ємністю 256 байт. Наявність ППЗУ дає можливість користувачеві зберігати в ньому будь-яку необхідну інформацію (калібрувальні коефіцієнти АЦП і ЦАП, серіальний номер, назва і т. Д.). Роботу з даними ППЗУ здійснює через шину USB і не вимагає додаткових апаратних засобів.

Калібрувальні коефіцієнти, записані в ППЗУ виробником або користувачем, дозволяють програмними засобами коректувати дані, що

надходять з АЦП на ЦАП. Така функція дає можливість не застосовувати підлаштування резистори, підвищуючи тим самим надійність модуля і покращуючи його шумові характеристики.

Таблиця В.4 – Технічні характеристики USB-3000

Аналого-цифровий перетворювач	
Кількість каналів	8
Максимальна частота дискретизації	3 МГц
Максимальна частота перемикавання каналів	3 МГц
Розрядність АЦП	14 бит
Діапазон вхідного сигналу	$\pm 5\text{В}$
Вхідний опір	$\geq 10 \text{ МОм}$ є
Придушення синфазної складової (для вхідного Сігала 4В; 10 кГц)	-75 дБ (тип)
Придушення міжканального проходження (для вхідного Сігала 10 кГц при частоті перемикавання каналів 2 МГц)	-89 дБ (тип)
Динамічний діапазон	81 дБ (тип)
Зсув нуля (з використанням калібрувальних коефіцієнтів)	0.03 % (макс)
Зсув повної шкали (+ 5 В; з використанням калібрувальних коеф.)	0.03 % (макс)
Інтегральна нелінійність перетворення	$\pm 2.5 \text{ МЗР}$ (тип)
Диференціальна нелінійність перетворення	$\pm 0.6 \text{ МЗР}$ (тип)
Температурний догляд нуля	20 ppm /°C (тип)
Температурний догляд повної шкали	20 ppm /°C (тип)
Синхронізація введення	Внутрішня; зовнішня (ТТЛ)
Захист входів від перенапруги:	

Постійна напруга (10 секунд)	±25 В
Імпульс (1 мс)	±250 В
Цифроаналоговий перетворювач	
Кількість каналів	2 буферізований каналу
Максимальний час встановлення вихідного сигналу	10 мкс
Розрядність ЦАП	12
Вихідний діапазон	±5В
Логічний аналізатор (цифрові входи)	
Кількість входів	10
Вхідна напруга високого рівня	1.7...5.75В
Вхідна напруга низького рівня	-0.5...+ 0.8 В
Вхідний струм ($V_I = 3.3 \text{ В}$)	0мкА
Цифровий сигнальний процесор	
Тип процесора	ADSP-2185M
Тактова частота	72 МГц
Внутрішня пам'ять програм	16 кСлов
Внутрішня пам'ять даних	16 кСлов
Загальні характеристики	
Інтерфейс	USB2.0;USB1.1 1
Харчування	Від шини USB або від зовнішнього джерела
Використаний струм	До 450 мА
Габарити	140x110x35 мм

Дані, що надходять з модуля USB3000, обробляються програмою DataInp.exe (рис. В.2). Програма дає можливість зберігати дані на жорсткому диску комп'ютера, умови прийому даних і коментарі в базі даних Experiment.mdb.

На закладці «Експеримент» проводиться вибір даних експерименту, що містяться в базі, введення опису поточного експерименту. На закладці «Канали» вибираються канали, за якими будуть проводитися прийом і запис даних. Задаються коефіцієнти перетворення датчика і посилення первинної апаратури. На закладці «Графіка» виділяються канали, з числа активних, за якими буде виводиться графічна інформація. Там же задаються параметри виведення графічної інформації. На закладці «Вступ» призначаються установки програми для прийому даних. На закладці «Вимірювання» задаються установки по реєстру апаратури.

Програма обробки даних Data Convert.exe [242] виконує наступні функції: зчитує дані, записані за допомогою програми DataInp.exe; будувє графічні залежності даних від часу; розбиває файл даних на фрагменти і зберігає їх на жорсткому диску комп'ютера; зберігає статистичні параметри фрагмента в базі даних Experiment.mdb.

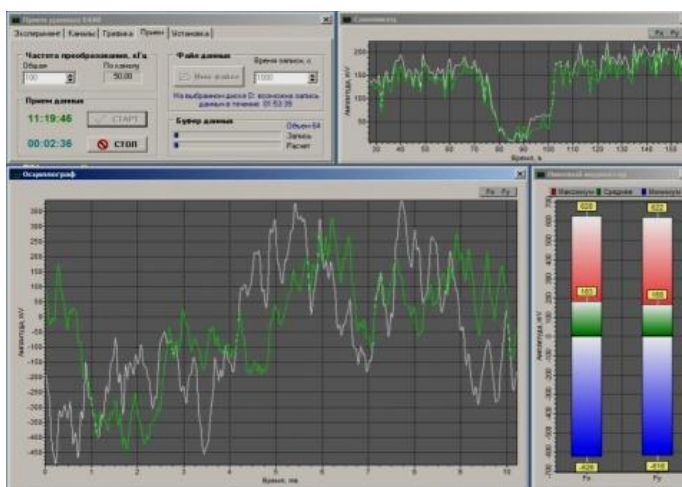


Рисунок В.2 – Робоче вікно програми DataInp.exe

Програма зберігає оброблені файли в декількох типах форматів, що дає можливість в подальшому працювати з ними в таких програмах, як Matlab і Power Graph. Для обробки даних великих масивів використовується база даних Experiment.mdb.

Додаток С

Довідка
про впровадження результатів дисертаційних досліджень здобувача
Гасанова Магомедміна Ісамагомедовича

Гасанов М. І. приймав участь у виконанні наступних науково-дослідницьких та науково-технічних робіт за тематичним планом Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (НТУ «ХПІ»):

1. Прикладна держбюджетна робота М1212 (2019–2020 рр.) «Забезпечення міцності елементів машин військового та цивільного призначення на основі дослідження нелінійних моделей контактної взаємодії (№ д.р. 0119U002569).
2. Прикладна держбюджетна робота М2425 (2017–2018 рр.) «Меркурій» (№ д.р. 0117U000015т).
3. Договір про співробітництво із ДП «Завод ім. В. О. Малишева», м. Харків.
4. Договір про співробітництво із ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О. О. Морозова».
5. Договір про співробітництво із ДП «Харківське конструкторське бюро з двигунобудування».

За цими договорами були виконані роботи із розробки методів та моделей для дослідження та забезпечення працездатності та високих технічних і техніко-тактичних характеристик елементів машин військового та цивільного призначення.

Результатами досліджень за докторською дисертацією Гасанова М. І. впроваджені за переліченими роботами, що дало можливість досягнути економічного ефекту у дольовому розмірі, що складає 775,0 тис. грн. Розмір ефекту визначено згідно актів впровадження з урахуванням особистого вкладу здобувача Гасанова М. І.

Проректор НТУ «ХПІ»



(Handwritten signature)

А. П. Марченко

Науковий керівник, відповідальний виконавець виконаних робіт

(Handwritten signature)

М. А. Ткачук

Відповідальний виконавець договорів

(Handwritten signature)

А. В. Грабовський

В роботі сформульовані розроблена математична структурно-параметрична модель процесу обробки крупногабаритних зубчастих коліс, що забезпечує задані експлуатаційні властивості поверхонь відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс, що враховує дійсну форму профілю зуба після зносу, розроблена імітаційна модель управління процесом фінішної лезової обробки зубів відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс в умовах обмежень по якості і точності формованих поверхонь зубів, визначена і математично описана 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. Встановлені і науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки стану поверхонь, довговічності, мінімально можливих пластичних деформацій зубів зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс після лезової обробки.




Основні положення дисертаційної роботи Гасанова М.І., способи 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), якості відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс впроваджені на ДП „Завод імені В.О. Малишева”.

Крім того, впроваджено пропозиції, викладені в патентах України №№114964, 118124, 1179049.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи на ДП „Завод імені В.О. Малишева” при відновленні крупногабаритних зубчастих коліс складає 250,0 тис. грн.

Цей акт не є підставою для матеріальної винагороди.

Члени комісії

 А.М. Малакей
 С.С. Яців
 І.І. Шаповалов

Директор ГОВ «Костянтинівський завод механічного обладнання»

_____ Е.В. Григоренко

«_____» 2018р.

АКТ

впровадження результатів дисертації «Основи процесу відновлення точності та якості крупногабаритних зубчатих передач із застосуванням методів імітаційного моделювання» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук М.І. Гасанова

Основні наукові положення, висновки, рекомендації та розробки, отримані в дисертаційній роботі професора Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Гасанова М.І. забезпечують підвищення технічного рівня робочих машин, його збереження протягом певного періоду експлуатації, а також відновлення на етапі ремонту і модернізації є актуальними завданнями сучасного машинобудування.

. 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.

На основі аналізу методів відновлення функціональних характеристик крупномодульних зубчастих передач розроблена структурна схема відновлення великогабаритних зубчастих пар в якій розрізняють види характеристик передач, розташованих у вигляді блоків, що з'єднуються відповідно до регламенту восстановлення крупногабаритних зубчастих коліс.

Подальші дослідження процесів, що забезпечують відновлення функціональних властивостей крупногабаритних зубчастих коліс, дозволили створити зв'язок процесів обробки зубів коліс з їх функціональними параметрами в рамках використання одного з методів зубообработки, швидкісного зубофрезерування.

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 включає: 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

оптичної мікроскопії. Всі вимірювання проводилися на повірених приладах.

В роботі сформульовані принципи дефектації КЗК і на їх основі розроблено методику систематизації дефектів і методів їх усунення, розроблена методологія відновлення КЗК на основі імітаційного моделювання виробничих процесів та розроблені ефективні процеси високошвидкісний лезової зубообробки на основі швидкісного зубофрезерування спареними фрезами і фрезами типу «Перемога», що забезпечують якість поверхневого шару в межах $R_z = 10-20$ мкм, швидкістю різання $V = 3-5$ 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 та розроблені 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.

В роботі вперше встановлені і науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки стану поверхонь, довговічності, мінімально можливих пластичних деформацій зубів зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс після лезової обробки. Удосконалено теорію імітаційного моделювання взаємозв'язків якості зубчастого зачеплення крупногабаритних модульних коліс в процесі експлуатації при зношуванні і процесів їх обробки при відновленні, вперше встановлено вплив удільного зносу зубів в контактній зоні на потужність, затрачену на подолання сил тертя з урахуванням забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубів відновлюваних коліс.

Основні положення дисертаційної роботи Гасанова М.І., способи 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), якості відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс впроваджені на ТОВ «КЗМО».

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи на ТОВ "Костянтинівський завод механічного обладнання" при відновленні крупногабаритних зубчастих коліс складає 787 тис. 375 грн.

Головний інженер

Начальник цеха

Проф. кафедри «Технологія машинбудування та металорізальні верстати», д.т.н, проф..

Проф. кафедри «Технологія машинбудування та металорізальні верстати», к.т.н, проф..



Від НТУ «ХПІ»

Є. М. Кирєєв

Ю.М. Шаповалов

О.О. Клочко

М.І. Гасанов

Головний інженер
ТОВ "Слобожанська промислова компанія"

 А.Н. Харланцев
« — » 2019р.

АКТ

впровадження результатів дисертації «Основи процесу відновлення точності та якості крупногабаритних зубчатих передач із застосуванням методів імітаційного моделювання» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук М.І. Гасанова при відновленні зубчатих коліс важких тракторів

При ремонті та відновленні зубчатих коліс важких тракторів застосовані висновки, рекомендації та розробки, отримані в дисертаційній роботі професора Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Гасанова М.І. які забезпечили підвищення технічного рівня навантажених вузлів важких тракторів, в яких експлуатуються зубчаті колеса.

При ремонті та відновленні зубчатих коліс важких тракторів покладено єдиний підхід щодо проведення теоретичних і експериментальних досліджень, що базується на фундаментальних положеннях теорій процесів машинобудування та триботехніки, Експериментальні дослідження проводилися в виробничих і лабораторних умовах на реальному технологічному обладнанні.

На основі аналізу методів відновлення функціональних характеристик зубчастих передач розроблена структурна схема відновлення зубчастих пар в якій розрізняють види характеристик передач, розташованих у вигляді блоків, що з'єднуються відповідно до регламенту відновлення зубчастих коліс.

Впровадження процесу відновлення функціональних властивостей зубчастих коліс, дозволили створити зв'язок процесів обробки зубів коліс з їх функціональними параметрами в рамках використання одного з методів зубообробки, швидкісного зубофрезерування.

Сформульовані принципи дефектації зубчастих коліс і на їх основі розроблено методику систематизації дефектів і методів їх усунення, розроблена методологія відновлення зубчастих коліс на основі імітаційного моделювання виробничих процесів та розроблені ефективні процеси високошвидкісний лезової зубообробки на основі швидкісного зубофрезерування

Запропоновано методику розрахунку параметрів стану поверхневого шару відновлюваних поверхонь зубів коліс в залежності від умов їх обробки та розроблені методики моделювання взаємозв'язку експлуатаційних властивостей поверхонь зношених і відновлюваних зубчастих коліс з їх показниками якості.

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи на ТОВ "Слобожанська промислова компанія" при відновленні зубчастих коліс важких тракторів складає 495 тис. 240 грн.

Від "Слобожанська промислова компанія"

Заступник директора

 Д.Є. Сергієнко

Начальник цеха

Ю.И.Сапегин

Від НТУ «ХПІ»

Проф. кафедри «Технологія машинбудування та металорізальні верстати», д.т.н, проф..

 О.О. Ключко

Проф. кафедри «Технологія машинбудування та металорізальні верстати», к.т.н, проф..

 М.І. Гасанов