

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

Камчатна - Степанова Катерина Валеріївна

УДК 621.914.6

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

05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

_____ К. В. Камчатна - Степанова

Науковий керівник:

Клочко Олександр Олександрович,
доктор технічних наук, професор

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Камчатна - Степанова К. В. Підвищення ефективності механічного оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс при швидкісному зубофрезеруванні. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертацію присвячено розробці процесів підвищення ефективності механічного оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс спеціальними фрезами при швидкісному зубофрезеруванні.

Обґрунтовано актуальність дослідження процесу нарізання загартованих великомодульних шевронних коліс шляхом їх швидкісного зубофрезерування з метою підвищення продуктивності та якості їх оброблення а також раціонального використання лімітованого спеціального зуборізального обладнання та інструмента, що має надзвичайно важливе економічне значення. Підвищення якості оброблених зубів, і, відповідно, надійності та довговічності зубчастих передач дозволяє істотно скоротити час простою та витрати на міжремонтне обслуговування унікальних машин, а також збільшити їх виробничі потужності.

Теоретичною базою виконаних досліджень є фундаментальні положення теорії технології машинобудування, різання металів, моделювання, ймовірності та математичної статистики. Математичне оброблення результатів досліджень виконувалося з використанням програмного забезпечення у пакеті моделювання «Statistica 6.0». Достовірність наукових припущень, положень, висновків і рекомендацій обумовлена коректним використанням фундаментальних законів опору

матеріалів, теоретичних основ технології машинобудування та матеріалознавства при задовільному збігу результатів теоретичних і експериментальних досліджень, оброблених з використанням методів багатовимірного статистичного аналізу.

Досліджено кінематику процесу різання черв'ячними фрезами з роздільною схемою формоутворення. Розроблено геометричну модель кінематики процесу оброблення зубів черв'ячною фрезою з диференціацією роботи різання кожним з її зубів у контактному полі різання та з'ясовано характер врізання зубів фрези в метал заготовки. Відомо, що характер різання зубів черв'ячної фрези має помітний вплив, як на стійкість інструменту, так і на якість обробленої поверхні. Аналіз процесу врізання зубів розглядається як траєкторії руху будь-якої точки різальної кромки кожного з них у кінематиці взаємних рухів інструменту та заготовки.

Досліджено вплив траєкторій руху різальних кромок зубів фрези на товщину зрізуваних шарів, знос фрези, хвилястість і шорсткість обробленої поверхні зубів колеса. Для зручності пошуку аналітичних залежностей розглянуто траєкторії руху профілюючих точок різальних кромок зубів інструменту, тобто точок, що лежать на одній лінії з виробом.

Отримано відхилення проекцій траєкторій точок різальних кромок від площини профілювання в залежності від кута повороту фрези та відхилення проекцій траєкторій точок зубів фрези при обробленні коліс різної кількості зубів та різного модуля. В результаті ковзання зубів фрези відбувається наклеп поверхневого шару металу. Зрізати ці шари металу підвищеної твердості зуби фрези будуть періодично через один оберт заготовки в умовах можливої появи вібрації, що також призводить до зменшення періоду стійкості інструменту і зниженню якості обробки.

Розроблено геометричну модель розподілу припуску

нееквідистантної евольвентної поверхні в товщинах шарів, зрізаних по висоті зуба. Процес врізання зубів фрези впливає на шорсткість обробленої поверхні. Висота мікронерівностей найменша у вершини зуба і збільшується до його основи. Це добре підтверджується практикою оброблення коліс фрезами різних конструкцій і пояснюється більш інтенсивним утворенням наросту на різальних кромках зубів, що урізуються з тривалим ковзанням.

Розроблено алгоритм геометричного моделювання співвідношення сумарних периметрів одночасно ріжучих зубів стандартних фрез і фрез із роздільною схемою формоутворення. Виконано дослідження динаміки зубофрезерування та визначення можливого співвідношення величин крутних моментів, обводових сил і потужності різання за рахунок сумарного периметри зубів інструментів, що одночасно беруть участь у різанні. Аналіз схем різання стандартної черв'ячної фрези і фрези із роздільною схемою формоутворення показує, що у першій одночасно в різанні присутніми є три зуби, що працюють по чергово п'ятьма або сімома ділянками кромок, а у другій три або чотири зуби, що працюють трьома або чотирма ділянками кромок.

Виконано моделювання точності оброблення евольвентної поверхні шевронних зубів черв'ячними фрезами за рахунок впливу конструктивних параметрів і подачі фрези на величину хвилястості обробленої поверхні шевронних зубів. Також розроблено математичну модель розрахунку ефективності фрез із роздільною схемою формоутворення в діапазоні кількостей зубів $z = 30 - 90$, де при значно меншому, ніж для стандартних фрез профільному куті зубів, розрахункова висота хвилі в 2,5 рази менше, що свідчить про можливість суттєвого підвищення подачі інструмента.

Отримано поле кривих залежності максимальної розрахункової висоти хвилі від кількості зубів нарізованого колеса для фрез різних виконань з метою визначення максимальної розрахункової висоти хвилі

при обробленні коліс за допомогою фрез із роздільною схемою формоутворення.

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

Розроблено методику проведення експериментальних досліджень різальних властивостей черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення шевронних зубчастих коліс. Дослідження і обробка результатів проводилася із застосуванням математичного методу планування екстремальних експериментів. Планування за цим методом дозволило при порівняно невеликому числі дослідів встановити математичні моделі досліджуваних процесів, виявити ступінь впливу на вихідні параметри, як окремих факторів, так і їх взаємодій, підвищити точність отриманих результатів.

Проведені серії чисельних експериментів для аналізу якісних показників динаміки процесу при зубофрезеруванні шевронних коліс із урахуванням зміни сил різання, продуктивності обробки, зношення та стійкості фрез.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі системного аналізу і узагальнення досвіду дослідження різальних властивостей черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення загартованих шевронних зубчастих коліс, вимог до забезпечення якості та точності обробленої поверхні зубів відповідальних передач, вперше сформульовані і реалізовані принципи формоутворення евольвентної поверхні загартованих шевронних зубчастих коліс на основі моделювання високоякісної обробки,

що дозволяють інтенсифікувати процес при зустрічному фрезеруванні за допомогою спеціальної фрези з роздільною схемою різання.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

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

2. Уперше встановлено особливості формоутворення черв'ячною фрезою профілю зубів великомодульних шевронних коліс з урахуванням кута нахилу їх гвинтової лінії за рахунок визначення необхідної відстані розположення правого та лівого корпусів інструменту, що дозволило підвищити точність обробленого евольвентного профілю зубів в 2 - 3,5 рази з розширенням зони оброблення коліс за 8-м ступенем точності до модулю зубів 20 мм у діапазоні $z = 18-350$.

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

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

Розроблено практичні рекомендації щодо використання.

Ключові слова: великомодульні шевронні колеса, механічне

оброблення, швидкісне зубофрезерування, кінематика процесу, черв'ячні фрези, роздільна схема різання.

Список наукових праць, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

Публікації, що входять до переліку фахових видань:

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

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

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

4. Камчатна - Степанова К. В. Технологічні засоби обробки крупногабаритних евольвентних шліцьових з'єднань з модифікацією

зуборізного інструменту. / О. О. Анділахай, О. О. Клочко, К. В. Камчатна - Степанова, О. П. Старченко // Наука та виробництво. Машинобудування і зварювальне виробництво. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2019. – № 20. – С. 53 - 66. *(Здобувачем запропоновано модифікацію зуборізного інструменту).*

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

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

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

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

Публікації у закордонних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз:

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

10. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Modern methods of gear milling of hardened large-module gears. / Kateryna Kamchatna - Stepanova, Oleksandr Klochko // Periodyk Naukowy Akademii Polonijnej - Czestochowa, Poland, 2020. - № 6 (43). - С. 312 – 324. *(Здобувачем удосконалено методи зубчастого фрезерування загартованих великомодульних шевронних коліс).*

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

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

Публікації апробаційного характеру:

13. Камчатна - Степанова К. В. Технологія ремонту та відновлення крупномодульних загартованих зубчастих коліс методом високошвидкісної лезової обробки. / О. О. Ключко, О. О. Анциферова, Д. О. Лисиця,

К. В. Камчатна - Степанова // Dynamics of the development of world science. Abstracts of the 6th International Scientific and Practical Conference. Perfect Publishing. - Vancouver, Canada, 2020, February 19 - 21. – P.628 - 636. *(Здобувачем запропоновано методику процесу високошвидкісної лезової обробки великомодульних загартованих зубчастих коліс).*

14. Камчатная - Степанова Е. В. Анализ современных конструкций инструментов для нарезания крупномодульных шевронных колес. / А. А. Клочко, А. Ю. Заковоротный, О. А. Анцыферова, Е. В. Камчатная - Степанова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково - технічної конференції 01 – 04 червня 2021 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2021. – С. 68 - 70. ISBN 978-966-379-987-2. *(Здобувачем виконано аналіз застосування інструментів для нарізування великомодульних шевронних коліс).*

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

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

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

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

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

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

20. Камчатная – Степанова Е. В. Технологические методы скоростного зубофрезерования крупномодульных шевронных зубчатых колес. / А. А. Клочко, Е. В. Басова, Е. В. Камчатная - Степанова // Праці ХХІХ Міжнародної конференції. «Нові технології в машинобудуванні»,

2 - 8 вересня 2019 р. – Коблево – Харків: НАКУ «ХАІ», 2019. – С. 7.
(Здобувачем виконано аналіз методів швидкісного зубофрезерування великомодульних шевронних зубчастих коліс).

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

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

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

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

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

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

ABSTRACT

Kamchatna-Stepanova K.V. Improving the efficiency of mechanical processing of hardened large-module chevron wheels during high-speed gear milling. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.03.01 - processes of mechanical processing, machines and tools (13 - mechanical engineering). – Donbass state engineering academy , Kramatorsk, 2021.

The thesis is devoted to the development of processes of increase of efficiency of mechanical processing of the hardened large-modular chevron wheels by special mills at high-speed gear milling.

The review of the literature, the analysis of existing designs of worm mills, results of research of process of tooth milling is carried out in the work. The theoretical schemes of cutting and on their basis the analysis of loading of separate teeth of worm mills of various designs are considered in a number of works. The least studied are the kinematics of finishing gear milling, cutting schemes and structures of large-modular tools, cutting dynamics, as well as the associated quality of working surfaces and accuracy of cut teeth. According to research results, the level of production of high-modulus chevron gears in terms of performance, quality and accuracy is inferior to cylindrical gears.

The relevance of the study in order to improve the productivity and quality of cutting large-module wheels is extremely important economic importance and rational use of limited special gear cutting equipment and expensive tools. Improving the quality of cutting teeth, and, consequently, the reliability and durability of gears can significantly reduce downtime and maintenance costs of unique machines, as well as increase their production capacity.

The theoretical basis of the research is the fundamental provisions of the

theory of engineering technology, metal cutting, modeling, probability and mathematical statistics. The reliability of scientific assumptions, provisions, conclusions and recommendations is due to the correct use of fundamental laws of resistance of materials, theoretical foundations of engineering technology and materials science with a satisfactory match of theoretical and experimental studies processed using multidimensional statistical analysis.

The kinematics of the process of cutting by worm circuits with separate shaping due to the contact field of cutting of the cutter is investigated.

A geometric model of the kinematics of the process of processing teeth with a worm cutter with differentiation of cutting work by each of its teeth in the contact field of cutting is developed and the nature of incision of the cutter teeth into the workpiece metal is clarified. It is known that the nature of cutting the teeth of the worm cutter has a noticeable effect on the stability of the tool and the quality of the treated surface. The analysis of the process of incision of the teeth is considered as the trajectory of any point of the cutting edge of each of them in the kinematics of mutual movements of the tool and the workpiece.

The influence of the trajectories of the cutting edges of the cutter teeth on the thickness of the cut layers, the wear of the cutter, on the undulation and roughness of the machined surface of the teeth of the wheel is investigated. For convenience of search of analytical dependences trajectories of movement of profiling points of cutting edges of teeth of the tool, ie the points lying on a line with a product are considered.

The deviation of the projections of the trajectories of the points of the cutting edges from the plane of profiling depending on the angle of rotation of the cutter and the deviation of the projections of the trajectories of the points of the cutter teeth when machining wheels of different number of teeth and different modulus. As a result of sliding of teeth of a mill there is a slandering of a surface layer of metal. To cut these layers of metal of the increased hardness of teeth of a mill will be periodically through one turn of preparation in the

conditions of possible emergence of vibration that also leads to loss of stability of the tool and decrease in quality of processing.

A geometric model of the allowance distribution of a non-equidistant involute surface is developed. In the thicknesses of the layers cut along the height of the tooth. The process of cutting the teeth of the cutter affects the size of the roughness of the treated surface. The height of microroughnesses is the smallest at the top of the tooth and increases to its base. This is well confirmed by the practice of machining wheels with cutters of different designs and is explained by the more intense formation of growth on the cutting edges of teeth that cut with prolonged sliding.

An algorithm for geometric modeling of the ratio of the total perimeters of simultaneously cutting teeth of standard mills and mills with a separate shaping scheme has been developed. The study of the dynamics of gear milling and determination of the possible ratio of torques, circumferential forces and cutting power due to the total perimeter of the teeth of tools that simultaneously participate in cutting. Analysis of the cutting schemes of a standard worm cutter and a cutter with a separate shaping scheme shows that in the first simultaneously in cutting there are 3 teeth working alternately with five or seven sections of edges, and in the second 3 or 4 teeth working with three or four sections of edges.

The accuracy of processing the involute surface of chevron teeth with worm mills due to the influence of design parameters and the representation of the cutter on the amount of waviness of the treated surface of chevron teeth is performed. A mathematical model for calculating the efficiency of cutters with a separate shaping scheme in the range of teeth $z = 30 \dots 90$, where at a much smaller than for standard cutters profile angle of the teeth, the estimated wave height is 2.5 times less, indicating the possibility of a significant increase tool.

The field of curves of dependence of the maximum calculated height of a wave on quantity of teeth of a cut wheel for mills of various executions and for

definition of the maximum calculated height of a wave at processing of wheels by means of mills with the separate scheme of forming is received.

The mathematical model of calculation of organic errors of profiling and accuracy of processing of chevron teeth by Archimedean worm mills at the expense of the comparative theoretical analysis of organic errors of profiling of large-modulus worm mills with a standard profile angle of an original contour of a tool rail and special worm mills with the separate scheme of shaping is developed. profile angle of the original contour.

A method for conducting experimental studies of the cutting properties of worm cutters with a separate scheme of shaping of chevron gears has been developed. Research and processing of the results were performed using the mathematical method of planning extreme experiments. Planning by this method allowed with a relatively small number of experiments to establish mathematical models of the studied processes, to identify the degree of influence on the initial parameters, both individual factors and their interactions, to increase the accuracy of the results.

A series of numerical experiments was performed to analyze the qualitative indicators of the process dynamics during gear milling of chevron wheels, taking into account changes in cutting forces, machining productivity, wear and stability of cutters.

Scientific novelty of the obtained results. On the basis of the system analysis and generalization of experience of research of cutting properties of worm mills with the separate scheme of formation of the hardened chevron gear wheels, requirements to quality and accuracy of the processed surface of teeth of responsible transfers, the principles of formation of an involute surface high-quality processing that allows you to intensify the process of counter-milling with a special cutter with a separate cutting scheme.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

1. For the first time a model of shaping the involute surface of hardened chevron gears in counter-milling with a special cutter with a separate cutting scheme due to the location of the cutting blades along the line of engagement.

2. Extended conditions for the final formation of the involute surface of hardened chevron gears by a worm cutter of prefabricated construction due to the location of the cutters of the right and left bodies at the calculated distance.

3. The method of finishing high-speed blade machining of hardened chevron gears is improved due to the ratio of the radius of rounding of the cutting blade and the cutting modes.

According to the results of experimental and production studies, the dependences that characterize the dynamics of the cutting process with a new tool, its cutting ability, as well as the influence of factors on the ripple, roughness and accuracy of the treated tooth surface.

Practical recommendations for use have been developed.

Keywords: large-modulus chevron wheels, machining, high-speed gear milling, process kinematics, worm cutters, separate cutting scheme.

LIST OF PUBLICATIONS OF CANDIDATE FOR THE TOPIC OF THE DISSERTATION

Publications included in the list of scientific professional publications:

1. Kamchatnaia - Stepanova Ye. V. Analiz mekhanizmov realizatsii proizvodstvennoi deiatelnosti promyshlennoho predpriiatia. / Yu. A. Klochko, Ye. V. Kamchatnaia - Stepanova, N. G. Siketina // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichniy instytut». Seriia: «Tekhnolohii v mashynobuduvanni». – Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. – # 4 (1113). – S. 76 - 78. (Zdobuvachem provedeno analiz perspektyvnykh napriamkiv vdoskonalennia i rozvytku mekhanizmiv realizatsii vyrobничoi diialnosti promyslovoho pidpryemstva).

2. Kamchatnaia - Stepanova Ye. V. Modelirovaniie sinerheticheskikh stratehii razvitiia proizvodstvenno - ekonomicheskikh sistem. [Monohrafiia] / Yu. A. Klochko, Ye. V. Kamchatnaia - Stepanova, N. G. Siketina, I. N. Kravtsov // Donbasskaia hosudarstvennaia mashynostroitelnaia akademiia, Kramatorsk: DGMA; Irbit; NIKS, 2015. – 221 s. (Zdobuvachem vykonano traktuvannia i vyznachennia osoblyvosti modeliuvannia rozvytku mashynobuduvannia iz zastosuvanniam aparata synerhetichnoi teorii).
3. Kamchatna - Stepanova K. V. Doslidzhennia metodiv i umov formoutvorennia rizalnykh elementiv tverdosplavnoho instrumentu dlia frezernoï obrobky kompozytsiinykh nemetalevykh materialiv. / A. O. Skorkin, O. L. Kondratiuk, O. P. Starchenko, K. V. Kamchatna - Stepanova // Zbirnyk naukovykh prats. Mashynobuduvannia. – Kharkiv: UIPA, 2019. – # 23. – S. 32 – 42. (Zdobuvachem vykonano analiz metodiv i umov formoutvorennia rizalnykh elementiv tverdosplavnoho instrumentu dlia frezernoï obrobky).
4. Kamchatna - Stepanova K. V. Tekhnolohichni zasoby obrobky krupnohabarytnykh evolventnykh shlitsovykh ziednan z modyfikatsiieiu zuboriznoho instrumentu. / O. O. Andilakhay, O. O. Klochko, K. V. Kamchatna - Stepanova, O. P. Starchenko // Nauka ta vyrobnytstvo. Mashynobuduvannia i zvariuvalne vyrobnytstvo. – Mariupol: DVNZ «Pryazovskyi derzhavnyi tekhnichnyi universytet», 2019. – # 20. – S. 53 - 66. (Zdobuvachem zaproponovano modyfikatsiiu zuboriznoho instrumentu).
5. Kamchatna – Stepanova K. V. Zabezpechennia yakosti shvydkorizalnoho instrumentu pry ploskomu shlifuvanni. / A. O. Skorkin, O. L. Kondratiuk, O. P. Starchenko, K. V. Kamchatna - Stepanova // Zbirnyk naukovykh prats. Mashynobuduvannia. – Kharkiv: UIPA, 2020. – #25. – S. 79 - 89. (Zdobuvachem vykonano analiz metodiv zabezpechennia yakosti shvydkorizalnoho instrumentu).
6. Kamchatna - Stepanova K. V. Doslidzhennia vplyvu tekhnolohichnykh rezhymiv frezuvannia na riven vibratsii shpindelnoho vuzla obrobnoho tsentru. /

A. O. Skorkin, O. L. Kondratiuk, O. P. Starchenko, K. V. Kamchatna - Stepanova // Visnyk Natsionalnoho tehnicnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi institut», Seriya: «Tekhnolohii v mashynobuduvanni». Kharkiv: NTU «KhPI», 2020. – # 1. – S. 58-63. (Zdobuvachem vykonano doslidzhennia vplyvu rezhymiv frezuvannia na riven vibratsii shpindelnoho vuzla).

7. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Analytical approach to determination of surface strengthening of chevron gears. // Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universitetu. Ternopil: TNTU, 2021. – tom # 2 (102). S. 5 - 13.

8. Kamchatnaia – Stepanova Ye. V. Povysheniie effektivnosti frezerovaniia za schet ispolzovaniia sistem dinamicheskoho kontroliia proizvoditelnosti. / A. Skorkin, O. Kondratiuk, E. Starchenko, Ye. Kamchatnaya - Stepanova // Zbirnyk naukovykh prats. Mashynobuduvannia. Kharkiv: UIPA, 2021. – #27. – S. 76 - 86. (Zdobuvachem udoskonaleno protses frezeruvannia za rakhunok system dynamichnoho kontroliu produktyvnosti).

Publications in foreign publications included in international scientometric databases:

9. Kamchatnaya - Stepanova K. V. Sovremennyye metody tekhnolohii formoobrazovaniia krupnomodulnykh zubchatykh kolios. / A. Klochko, A. Skorkin, K. Kamchatna - Stepanova, E. Starchenko, M. Ishchenko // Znanstvena misel journal Ljubljana, Slovenia, 2020. # 48. – C. 25 - 26. (Zdobuvachem vykonano analiz suchasnykh metodiv formoutvorennia velykomodulnykh zubchastykh kolis).

10. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Modern methods of gear milling of hardened large - module gears. / Kateryna Kamchatna - Stepanova, Oleksandr Klochko // Periodyk Naukowy Akademii Polonijnej Czestochowa, Poland, 2020. # 6 (43). C. 312 – 324. (Zdobuvachem udoskonaleno metody zubchastoho frezeruvannia zahartovanikh velykomodulnykh shevronnykh kolis).

11. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Ensuring the High Strength Characteristics of the Surface Layers of Steel Products. / Kateryna Kostyk,

Viktoriia Kostyk, Oleg Akimov, Kateryna Kamchatna - Stepanova, Yurii Shyrokyi // Lecture Notes in Mechanical Engineering Germany: Springer Verlag, 2021. – C. 211 – 216. (Zdobuvachem udoskonaleno protses pidvyshchennia pratsezdatsnosti nakatnykh rolykiv).

12. Kamchatna - Stepanova K. Influence of waviness parameters on the operational properties of cylindrical large - modular gears. / K. Kamchatna - Stepanova, A. Klochko, A. Naidenko, A. Manokhin // International journal of engineering and advanced technology studies. London. United Kingdom, 2021. – Vol. 9, Issue 1. – # 9. P. 30 – 37. (Zdobuvachem rozrobleno alhorytm rozrakhunku sumarnoi hvyliastosti poverkhni zubchatykh kolis).

Publications which prove approbation of the dissertation materials:

13. Kamchatna - Stepanova K. V. Tekhnolohiia remontu ta vidnovlennia krupnomodulnykh zahartovanykh zubchastykh kolis metodom visokoshvydkisnoi lezovoi obrobky. / O. O. Klochko, O. O. Antsyferova, D. O. Lysytsia, K. V. Kamchatna - Stepanova // Dynamics of the development of world science. Abstracts of the 6th International Scientific and Practical Conference. Perfect Publishing. Vancouver, Canada, 2020, February 19 - 21. – P. 628 - 636. (Zdobuvachem zaproponovano metodyku protsesu visokoshvydkisnoi lezovoi obrobky velykomodulnykh zahartovanykh zubchastykh kolis).

14. Kamchatnaia - Stepanova Ye. V. Analiz sovremennykh konstruktsii instrumentov dlia narezaniia krupnomodulnykh shevronnykh kolios. / A. A. Klochko, A. Yu. Zakovorotnyi, O. A. Antsyferova, Ye. V. Kamchatnaia - Stepanova // Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspektyvy rozvytku. Materialy XIX Mizhnarodnoi naukovo - tekhnichnoi konferentsii 01 – 04 chervnia 2021 roku / za zah. red. V. D. Kovaliova. – Kramatorsk: DDMA, 2021. – S. 68 - 70. ISBN 978 – 966 - 379- 987 - 2. (Zdobuvachem vykonano anaiZ

zastosuvannia instrumentiv dlia narizuvannia velykomodulnykh shevronnykh kolis).

15. Kamchatna - Stepanova K. V. Tekhnolohiia eksperymentalnykh doslidzhen vysokoproduktyvnoho zubofrezeruvannia zahartovanykh krupnomodulnykh zubchastykh kolis. / O. O. Antsyferova, K. V. Kamchatna - Stepanova, Ya. V. Vasylichenko, M. V. Shapovalov, Ya. S. Antonenko // Scientific achievements of modern society. Abstracts of the 6th International Scientific and Practical Conference. Liverpool, United Kingdom: Cognum Publishing House, 2020. – P. 418 - 423. (Zdobuvachem rozrobleno metodyku eksperymentalnykh doslidzhen vysokoproduktyvnoho zubofrezeruvannia zahartovanykh velykomodulnykh zubchastykh kolis).

16. Kamchatnaya - Stepanova Ye. V. Tekhnolohicheskiie osnovy zubofrezerovaniia shevronnykh zakalennykh koles s razdelnoi skhemoi formoobrazovaniia. / A. A. Piermiakov, A. A. Klochko, Ye. P. Starchenko, Ye. V. Kamchatnaia - Stepanova, S. P. Sapon // Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system 2019: Materialy tez dopovidei IX Mizhnarodnoi naukovo - praktichnoi konferentsii. m. Chernihiv, 14 – 16 travnia 2019 r. Chernihivskiy natsionalnyi tekhnolohichnyi universytet / vidp. za vyp. A. M. Yeroshenko [ta in.]. – Chernihiv: ChNTU, 2019. – T. 1. - S. 117 - 119. (Zdobuvachem zaproponovano formoutvorennia shevronnykh zahartovanykh kolis z rozdilnoiu skhemoiu rizannya).

17. Kamchatna - Stepanova K. V. Doslidzhennia frezernoi obrobky kompozytsiynykh materialiv. // Abstracts of the VIIIth International Scientific and Practical Conference «Modern problems in science», November 09 - 12, 2020 Prague, Czech Republic, 2020. – S. 663 - 664.

18. Kamchatna – Stepanova K. V. Pidvyshchennia tochnosti, yakosti ta produktivnosti obrobky krupnohabarytnykh evolventnykh shlitsovykh poverkhon. / O. Yu. Zakovorotnyi, O. O. Klochko, O.P. Starchenko, K. V. Kamchatna - Stepanova, O. A. Antsyferova // Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta

perspektyvy rozvytku. Materialy XIX Mizhnarodnoi naukovo - praktichnoi konferentsii 04 - 07 lypnia 2019 r. / za zah. red. V. D. Kovaliova. – Kramatorsk: DDMA, 2019, S. 36 - 37. (Zdobuvachem vykonano analiz metodiv pidvyshchennia tochnosti obrobky velykohabarytnykh evolventnykh shlitsovykh poverkhon).

19. Kamchatnaia - Stepanova Ye. V. Analiz perspektivnykh tekhnolohicheskikh skhem zubofrezerovaniia krupnomodulnykh shevronnykh zakalennykh kolios. / V. F. Novikov, A. A. Klochko, Ye. V. Kamchatnaia - Stepanova // Novyie i netraditsionnyie tekhnolohii v resurso - i enerhosberezhenii: materialy mezhdunarodnoi nauchno - tehnicheckoi konferentsii, 16 - 18 maya 2019 g. – Odessa: ONPU, 2019. – S.124 - 129. (Zdobuvachem zaproponovano skhemu zubofrezeruvannia velykomodulnykh shevronnykh zahartovanykh kolis).

20. Kamchatnaya - Stepanova Ye. V. Tekhnolohicheskiie metody skorostnoho zubofrezerovaniia krupnomodulnykh shevronnykh zubchatykh kolios. / A. A. Klochko, E. V. Basova, Ye. V. Kamchatnaia - Stepanova // Pratsi XXIX Mizhnarodnoi konferentsii «Novi tekhnolohii v mashynobuduvanni», 2 - 8 veresnia 2019 r. – Koblevo – Kharkiv: NAKU «KhAI», 2019. – S. 7. (Zdobuvachem vykonano analiz metodiv shvydkisnoho zubofrezeruvannia velykomodulnykh shevronnykh zubchastykh kolis).

21. Kamchatnaia - Stepanova Ye. V. Vliianiie tekhnolohicheskoho vozdeistviia na obespecheniie ekspluatatsionnykh svoistv tiazhelonahruzhennykh krupnomodulnykh zakalennykh shevronnykh zubchatykh kolios. / A. A. Klochko, O. A. Antsiferova, Ye. V. Kamchatnaia - Stepanova // Informatyka, upravlinnia ta shtuchnyi intelekt. Materialy shostoi mizhnarodnoi naukovo - tekhnichnoi konferentsii (27 - 29 lystopada 2019 roku). Kharkiv - Kramatorsk. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. – S. 50 - 51. (Zdobuvachem vykonano analiz vplyvu na zabezpechennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei vazhkonavantazhenykh velykomodulnykh zahartovanykh shevronnykh zubchastykh kolis).

22. Kamchatna- Stepanova K. V. Suchasnyi metod zabezpechennia tochnosti vyhotovlennia evolventnykh krupnhabarytnykh shlitsovykh ziednan. / O. A. Permiakov, O. O. Klochko, O. P. Starchenko, K. V. Kamchatna - Stepanova // Prohresyvni tekhnolohii v mashynobuduvanni: zbirnyk naukovykh prats IX - oi Mizhnarodnoi naukovo -tekhnichnoi konferentsii. 03 - 07 liutoho 2020 roku. Lviv - Play. – Lviv: Natsionalnyi universytet «Lvivska politehnika», 2020. – S.138. (Zdobuvachem rozrobleno metodyku zabezpechennia tochnosti vyhotovlennia evolventnykh ziednan).
23. Kamchatna – Stepanova K. Methodology for the development of a model for managing the quality and productivity of shaping when processing hardened coarse - modular gears. / V. Kovaliov, Y. Vasylchenko, M. Shapovalov, O. Antsyferova, K. Kamchatna - Stepanova // Informatyka, upravlinnia ta shtuchnyi intelekt. Tezy siomoi mizhnarodnoi naukovo - tekhnichnoi konferentsii (17 - 19 lystopada 2020 r.). Kharkiv - Kramatorsk – Kharkiv: NTU «KhPI», 2020. - S. 36 - 38. (Zdobuvachem zaproponovano model upravlinnia yakistiu formotvorennia shevronnykh zubchatykh kolis).
24. Kamchatnaya – Stepanova Ye. V. Perspektivnyie skhemy zubofrezerovaniia krupnomodulnykh zakalionnykh shevronnykh kolios s razdelnoi skhemoi formoobrazovaniia. // Vazhke mashynobuduvannia. Problemy ta perspekyivy rozvytku. Materialy XVIII Mizhnarodnoi naukovo - tehnicnoi konferentsii 21 - 24 hrudnia 2020 r. / za zah. red. V. D. Kovaliova. – Kramatorsk: DDMA, 2020. S. 36. (Zdobuvachem zaproponovano skhemy zubofrezeruvannia velykomodulnykh zahartovanykh shevronnykh kolis).
25. Kamchatna – Stepanova K. V. Osoblyvosti orhanizatsii pedagogichnoi vzaiemodii vykladacha iz zdobuvachamy tekhnichnoi osvity v haluziakh metalurhii ta mashynobuduvannia. / K. V. Kamchatna - Stepanova, M. M. Yamshynskiy // Scientific and pedagogical intership «Mastery of the organization of pedagogical interaction between a teacher and engineering students. The experience of EU countries». February 15 - March 26, 2021

Wloclawek, Republic of Poland, 2021. C. 33 - 36. (ISBN 978 – 9934 – 26 – 056 - 8). (Zdobuvachem zaproponovano metodyku organizatsii pedahohichnoi vzaiemodii vykladacha iz zdobuvachamy tekhnichnoi osvity v haluzi mashynobuduvannia).

26. Kamchatna - Stepanova K. V. Modeliuvannia tekhnolohichnykh protsesiv obroblennia velykomodulnykh zubchastykh kolis. / K. V. Kamchatna - Stepanova, O. O. Klochko, V. D. Kovalov, Ya. V. Vasylchenko, S. P. Sapon // Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZYaTPS – 2021): materialy tez dopovidey XI Mizhnarodnoi naukovo - praktychnoi konferentsii, 26 – 27 travnya 2021 r., m. Chernihiv, Natsionalnyi universitet «Chernihivska politekhnika». – Chernihiv: NU «Chernihivska politekhnika», 2021. – T. 1. – S. 73 - 74.(Zdobuvachem zaproponovano protses modeliuvannia obroblennia velykomodulnykh zubchastykh kolis).

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	13
1.1 Аналіз конструкцій черв'ячних фрез	13
1.2 Аналіз результатів дослідження закономірностей процесу зубофрезерування	22
1.3 Висновки за розділом 1	31
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ З РОЗДІЛЬНОЮ СХЕМОЮ ФОРМОУТВОРЕННЯ	34
2.1 Контактне поле різання фрези з роздільною схемою формоутворення	34
2.2 Вплив траєкторій руху різальних кромок зубів фрези на товщину зрізаного шару, зношення фрези, на хвилястість і шорсткість обробленої поверхні зубів колеса	39
2.3 Співвідношення сумарних периметрів одночасно ріжучих зубів стандартних фрез і фрез із роздільною схемою формоутворення	46
2.4 Висновки за розділом 2	48
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ЕВОЛЬВЕНТНОЇ ПОВЕРХНІ ШЕВРОННИХ ЗУБІВ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ	51
3.1 Вплив конструктивних параметрів і подачі фрези на величину хвилястості обробленої поверхні шевронних зубів	51
3.2 Аналіз органічних похибок профілювання та точності оброблення шевронних зубів архімедовими черв'ячними фрезами	55
3.3 Аналіз конструкцій і точності оброблення профілю зубів шевронних коліс евольвентними черв'ячними фрезами з роздільною схемою формоутворення	62
3.4 Способи зубофрезерування великомодульних шевронних зубчатих	

коліс	64
3.5 Моделювання процесу зубонарізання великомодульних коліс із загартованої сталі методом скінчених елементів	78
3.6 Висновки за розділом 3	94
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ ІЗ РОЗДІЛЬНОЮ СХЕМОЮ ФОРМОУТВОРЕННЯ ШЕВРОННИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС	97
4.1 Методика проведення експериментальних досліджень	97
4.2 Динаміка процесу при зубофрезеруванні шевронних коліс із урахуванням зміни сил різання	100
4.3 Продуктивність обробки, зношування та стійкість фрез	105
4.4 Висновки за розділом 4	113
РОЗДІЛ 5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ЗУБІВ ШЕВРОННИХ КОЛІС ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ	116
5.1 Методика проведення досліджень	116
5.2 Загальний стан обробленої поверхні. Вплив геометрії заточування зубів черв'ячної фрези та технологічних факторів на шорсткість обробленої поверхні	118
5.3 Черв'ячний накатник для обробно - зміцнювальної обробки зубів	122
5.4 Новий спосіб зубофрезерування фрезами з роздільною схемою формоутворення та перспективні конструкції інструменту	129
5.4.1 Новий спосіб оброблення зубів черв'ячними фрезами з роздільною схемою формоутворення	129
5.4.2 Двозаходова черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення	133
5.4.3 Черв'ячна фреза з поворотними непереточуваними різальними елементами	136
5.5 Висновки за розділом 5	138

РОЗДІЛ 6 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	144
ДОДАТКИ	165
Додаток А Список публікацій за темою дисертації	165
Додаток Б Використання методів математичного планування експериментів та оптимізації емпіричних моделей	171
Додаток В Акти впровадження результатів дисертаційної роботи	179

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ЕВ – експлуатаційні властивості

H_{max} – максимальна висота макровідхилення, мкм

H_p – висота згладжування макровідхилення, мкм

W_a – середньоарифметичне відхилення профілю, мкм

W_p – висота згладжування профілю хвилястості, мкм

W_z – висота хвилястості по десяти точках, мкм

S_{mw} – середній крок хвилястості, мкм

R_a – 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

t_m – відносна опорна довжина нерівностей на рівні середньої лінії, %

S_m – середній крок нерівностей, мкм

S – середній крок нерівностей по вершинах локальних виступів, мкм

t_p – відносна опорна довжина профілю на рівні p , %

$H_{\mu 0}$ – поверхнева мікротвердість, МПа

σ_o – величина залишкових напруг на поверхні, МПа

σ_τ – напруга плинності, МПа

$h_{H\mu}$ – глибина залягання зміцненого шару, мм

$h_{\sigma 0}$ – глибина залягання залишкових напруг поверхні, мм

j_{TSC} – жорсткість технологічної верстатної системи, Н / мм

I – інтенсивність зносу зубчастих коліс

V – швидкість різання, м / с

S_m – хвилинна подача, мм / МНН

S_z – подача на зуб, мм / зуб

t – глибина різання, мм

a_i – товщина шару, що зрізається, мм

P_z, P_x, P_y – складові сили різання, Н

ВСТУП

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

Важке машинобудування виробляє унікальні за розмірами і корисними потужностями машини, що використовуються в гірничодобувній, металургійній, будівельній та інших галузях промисловості. Прикладами можуть бути екскаватори, роторні комплекси, драглайни, вугільно- та рудорозмельні млини, стани і т.п. У редукторах, механізмах приводу та повороту цих машин знайшли застосування великомодульні $m = 12-36$ мм циліндричні зубчасті колеса, шевронні колеса з діаметром вершин зубів від 400 мм до 2000 мм і шириною від 100 мм до 800 мм. Необхідна точність коліс ступеню точності 7В – 9В ГОСТ1643-81. Нерідко ступінь точності коліс занижена тільки через відсутність відповідного обладнання та інструменту.

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

При цьому відомо, що виробництво великомодульних передач є однією із найскладніших сфер важкого машинобудування і має свою певну специфіку. При обробленні коліс великих модулів значний обсяг металу, що видаляється з вм'ятин зубів, і відносно великі параметри різаних шарів призводять до різкого зниження точності та збільшення шорсткості

обробки. Значні труднощі в забезпеченні продуктивності і якості різання виникають при обробленні великогабаритних (5000-8000 мм) зубчастих вінців підвищеної точності. Оброблення цих вінців стандартними черв'ячними фрезами займає чималу кількість часу від 100 до 600 верстатогодин, що пов'язане з нежорсткістю системи «Верстат – Пристосування – Інструмент – Деталь» (далі – ВПД), а також нераціональністю схеми різання і геометрією ріжучої частини використовуваного інструменту, що має низьку стійкість.

У зв'язку з цим для великомодульного зуборізального інструменту, зокрема чистових черв'ячних фрез, першочергове значення набуває раціоналізація схеми різання до геометрії ріжучої частини, спрямована на поліпшення динаміки різання, підвищення стійкості і точності інструменту, а значить, і на підвищення продуктивності і якості обробки зубчастих коліс. Водночас важливе значення має спрощення конструкції інструменту, підвищення його економічності.

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

Мета і задачі дослідження.

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

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

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

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

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

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

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

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

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

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

теоретичних і експериментальних досліджень, оброблених з використанням методів багатовимірної статистичного аналізу.

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

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

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

2. Уперше встановлено особливості формоутворення черв'ячною фрезою профілю зубів великомодульних шевронних коліс з урахуванням кута нахилу їх гвинтової лінії за рахунок визначення необхідної відстані розташування правого та лівого корпусів інструменту, що дозволило підвищити точність обробленого евольвентного профілю зубів в 2-3,5 рази з розширенням зони оброблення коліс за 8-м ступенем точності до модулю зубів 20 мм у діапазоні $z = 18 - 350$.

3. Удосконалено спосіб чистового швидкісного зубофрезерування зубів загартованих великомодульних шевронних коліс за рахунок вибору оптимального значення радіусу округлення різального леза в залежності

від величини подачі, що дозволяє забезпечити мінімальне значення кутів ковзання леза фрези і, як наслідок, збільшити коефіцієнт ефективності формоутворення оброблюваного евольвентного профілю зубів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

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

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

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

Результати роботи впроваджено:

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

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

- у навчальному процесі НТУ «ХПІ» (м. Харків) на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів при викладанні дисциплін «Теоретичні основи технології виробництва деталей та

технології ремонту» та «Обробка типових деталей» за спеціальністю 05.03.01- процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

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

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних науково -технічних конференціях: IX Міжнародна науково - практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», (Чернігів, 2017); «Нові та нетрадиційні технології в ресурсо - та енергозбереженні», (Одеса: ОНПУ, 2019); XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (Краматорськ: ДДМА, 2020); XIX Міжнародна науково - практична конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку», (Краматорськ, ДДМА, 2021); XXIX Міжнародна конференція «Нові технології в машинобудуванні», (Коблево – Харків: НАКУ «ХАІ»); Шоста міжнародна науково - технічна конференція «Інформатика, управління та штучний інтелект», (Харків: НТУ «ХПІ», 2019); IX Всеукраїнська науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні», (Національний університет «Львівська

політехніка». Львів, 2020); Сьома міжнародна науково-технічна конференція «Інформатика, управління та штучний інтелект», (Харків-Краматорськ, 2020); XI Міжнародна науково - практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», (КЗЯТПС – 2021, Чернігів, 2021).

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

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

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ. МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Аналіз конструкцій черв'ячних фрез

Теоретичні схеми різання та на їх основі аналіз завантаження окремих зубів черв'ячних фрез різних конструкцій висвітлені в низці робіт [1, 2, 4, 14, 30, 144]. Найменш опрацьованими є питання кінематики чистового зубофрезерування, схем різання та конструкцій великомодульного інструменту, динаміки різання, а також пов'язаної з цим якості робочих поверхонь і точності нарізаних зубів. Як свідчать результати досліджень, рівень виробництва великомодульних зубчастих передач за продуктивністю, якістю і точністю поступається мало- та середньомодульним. [3, 5, 6, 11, 143].

Основні напрями в розробці конструкцій черв'ячних фрез і результати досліджень процесу зубофрезерування є наступними:

- дослідження різальних властивостей черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення загартованих шевронних зубчастих коліс;
- збільшення продуктивності зубофрезерування черв'ячними фрезами досягалося двома шляхами: збільшенням подачі інструменту та збільшенням швидкості різання [7, 8, 16, 19, 28].

Для чистових черв'ячних фрез ріст величини подачі обмежується умовами вимог до чистоти обробки профілю зубів. Тому, використовуючи цей шлях, в конструкції фрези здійснювалися зміни, головним чином, з точки зору зменшення хвилястості на обробленій поверхні зубів колеса [9, 18, 32, 33, 34]. Наближено, зв'язок між висотою гребінців хвилястості h_s , подачею фрези S , профільним кутом зубів інструмента α_u та радіусом r обертання точки зуба фрези, що розглядається [11, 133, 136], визначається

формулою:

$$h_s = \frac{S^2 \sin \alpha_u}{8r} \quad (1.1)$$

Із формули (1.1) видно, що при незмінній подачі S висота гребінців хвилястості зменшується найінтенсивніше зі зменшенням профільного кута зубів фрези α_u . Тому при зменшенні кута можна збільшувати подачу S без збільшення висоти гребінців h_s , які знижують точність профілю.

Зменшити величину хвилястості можна і за рахунок росту розмірів фрези (r). Але цей шлях є менш ефективним, адже для досягнення стійкості інструменту доведеться знижувати оберти інструменту, а відповідно знижувати і продуктивність процесу.

Запропоновано кілька черв'ячних фрез [18, 29, 38] зі зменшеним або рівним 0° кутом профілю зубів. Фреза конструкції Кельнера А.Н. (ENIMS) і фреза «Байкал» конструкції Печерських А.І. мають нульовий кут профілю зубів. Перша з цих фрез призначена також для чорнового нарізання зубів колеса, має кориговані по висоті зуби. Друга - тільки чистова. Обидві фрези складаються з двох корпусів, кожний з яких обробляє лише одну з бокових сторін зуба колеса [20, 27, 30, 41]. Серйозним недоліком розглянутих конструкцій є пошкодження раніше обробленої поверхні зуба колеса на верхній ділянці траєкторії руху зубу інструменту. Однак, роздільну обробку протилежних бокових сторін зубів колеса і відсутність різання вершинними кромками зубів інструмента при чистовому фрезеруванні слід вважати прогресивними рішеннями. Перше дозволяє поліпшити умови різання бічних кромek шляхом створення різнонаправлених стружкових канавок, друге виключає утруднення процесу різання (коробчасті стружки) і тим самим покращує динаміку різання, підвищує стійкість інструменту і точність нарізуваних зубів.

Затиловані фрези зі зменшеним кутом профілю зубів, у тому числі багатозаходні, отримали широке застосування в автомобільній

промисловості. До недоліків цих конструкцій фрез слід віднести бічне затилювання зубів, що сприяє швидкій втраті розрахункових параметрів початкової виробної поверхні фрези після переточувань.

Бажання поліпшити геометричні параметри ріжучої частини черв'ячних фрез, в основному для збільшення задніх кутів різання на верхній та бічній кромках привело дослідників до ідеї створення загостреного збірної інструменту. Першість в цьому належить ВНДІ, де була розроблена конструкція збірних загострених фрез, яка відрізняється наступними особливостями [21, 31, 36, 110]. Заточування фрези здійснюється не по передніх, а по задніх поверхнях зубів, при цьому заточування окремих зубів здійснюється за межами корпусу фрези, комплектами в спеціальному пристрої. Задні кути зубів призначені, виходячи з умов оптимального різання, та складають: $\alpha_b = \alpha_\sigma = 10^\circ - 15^\circ$. Для всіх точок ріжучих кромки вони мають однакове значення. Заточування зубів по задній поверхні, замість звичайного заточування на передній поверхні, дозволяє зрізати менші шари металу, збільшити кількість переточувань і поліпшити загальну роботоздатність інструменту.

Лабораторні дослідження та промислове впровадження інструменту показали, що в порівнянні з дисковими модульними і черв'ячними затилованими фрезами режими різання при роботі загостреними фрезами вище: швидкість різання на 10 - 20%, подача на 50 - 80%. Машинний час обробки колеса скорочується в середньому на 40%. При підвищених режимах різання, як зазначають автори, стійкість загострених фрез у 3 - 4 рази вище за стійкість дискових модульних фрез і в 2 рази вище за стійкість черв'ячних затилованих фрез [19, 30, 40, 106].

Однак фрези конструкції ВНДІ досі не отримали широкого застосування на машинобудівних заводах через складність їх виготовлення та експлуатації, а також високої вартості. Збірна конструкція інструменту вимагає точного виконання корпусу, зубів і установних місць; заточування

і переточування фрези пов'язане з її повторним розбиранням і складанням, що в поєднанні зі швидкою втратою робочих розмірів зубів призводить до втрати точності інструменту. Тому такі фрези використовуються переважно при чорновому нарізанні коліс. Розроблена ВНДІ на цих фрезах галузева нормаль 0Н435/2-64 передбачає найбільший модуль 20 мм, якого явно недостатньо для умов виробництва важкого машинобудування.

Розроблена конструкція збірної загостреної одновиткової черв'ячної фрези для нарізання коліс $m \geq 20$ мм з числом зубів $z > 250$. Фреза має раціональні задні кути зубів ($\alpha_s = 12^\circ$), шліфування яких здійснюється на пласкошліфувальному верстаті в спеціальному пристрої, де вони базуються так само, як і в корпусі фрези. Недоліки цієї фрези такі ж, як і в загострених багатовиткових фрезах конструкції ВНДІ і, крім того, скорочення кількості витків до одного, замість 1,6-1,8 за умовами повного профілювання, вносить похибки до профілю нарізуваних зубів. Зміна кута профілю зуба через один у чистових фрез, що застосовується для компенсації цих похибок, не дає бажаної точності обробки, ускладнюючи заточування і експлуатацію інструменту. Незважаючи на збільшену кількість зубів до окружності витка ($Z_\phi=16$), фреза, яка має коротку довжину активної ділянки верстатної лінії зачеплення з виробом, профілює евольвентний профіль зуба з більшим розміром огранки [21, 22, 37, 86, 120]. Менша кількість зубів у порівнянні зі звичайними черв'ячними фрезами призводить до збільшення зносу внаслідок значного навантаження при різанні. З цих причин такі фрези доцільно використовувати для попереднього прорізування зубів під час чорнової обробки коліс.

Також розроблений оригінальний і простий за конструкцією інструмент - обкаточні різці, призначені для чистової обробки великомодульних коліс. При роботі цим інструментом налаштування всіх кінематичних ланцюгів зубофрезерного верстата здійснюється так само, як

і при фрезеруванні черв'ячними фрезами. Кожну сторону зуба можна обробити як по черзі так і одночасно. Конструкція інструменту дозволяє зробити передній і задній кути ріжучої частини набагато більшими, ніж у затіланих черв'ячних фре $m = 20 - 28$ мм: $z = 20 - 47$.

Обкаточні різці знайшли обмежене використання у виробництві при нарізанні відносно невеликих великомодульних вал-шестерен. Шевронні вал - шестерні (рис. 1.1) виготовляють із викових, що мають більш високу твердість і кращу структуру матеріалу, ніж у колес, що виготовляються, зазвичай литтям.



Рисунок 1.1 – Шевронні вал-шестерні

Тому при нарізанні шевронних вал-шестерен обкаточні різці забезпечують продуктивність обробки рівною тій, що досягається при застосуванні черв'ячних фрез, в той час як шорсткість обленої поверхні менша [23, 24, 38]. Спроби застосувати обкаточні різці при обробці коліс, отриманих шляхом лиття і з твердістю матеріалу HB 180-240, поки не дали бажаних результатів. Крім цього, є ще ряд недоліків, які знижують ефективність застосування обкаточних різців. Це інструмент постійного установлення, похибки якого значно впливають на точність профілю

нарізаних зубів. Перехід від багатолезового інструменту до однолезового призводить до зниження стійкості внаслідок зменшення загальної довжини різальних кромek, що беруть участь у різанні. Тому обкаточні різці поступаються черв'ячним фрезам за розмірною стійкістю.

Останнім часом з'явилися і вдосконалюються різні збірні конструкції так званих незатілованих черв'ячних фрез [25, 26, 70, 73, 87, 105], у яких зуби замість затілювання піддаються шліфуванню по заднім поверхням на різьбо-шліфувальних або черв'ячно-шліфувальних верстатах. Зуби шліфуються при установленні їх у робочому корпусі фрези, або в спеціальному пристрої. Раціональні задні кути забезпечуються зміною положення зубів у робочому корпусі відносно до положення при їх шліфуванні.

Спосіб шліфування зубчастих рейок на різьбо- або черв'ячно-шліфувальних верстатах, дозволяє забезпечити високу точність профілю по всій довжині зуба, високу точність кроку витку і шорсткість робочих поверхонь не більше $Ra = 0,63$. Достатнього досвіду застосування великомодульних фрез такої конструкції немає, але сучасні черв'ячно-шліфувальні машини здатні шліфувати фрези до $m = 25$ мм.

Незважаючи на певні переваги незатілованих черв'ячних фрез, слід все ж зазначити, що їх конструкція не вирішує питань суттєвого збільшення кількості зубів фрези, зменшення параметрів різання, економії швидкорізальної сталі, тобто параметрів, дуже важливих саме для великомодульних черв'ячних фрез. Очевидно, що найбільш раціонально застосовувати незатіловані черв'ячні фрези при обробленні шевронних коліс малих і середніх модулів (рис. 1.2).

Стисло розглянемо досвід нарізання великомодульних зубчастих колес. Зубофрезерування черв'ячними фрезами використовується для обробки зубчастих коліс 4-9 класів точності по DIN 3962 [6, 56, 65, 96, 104, 109], що відповідає приблизно 4-9 ступеню по ГОСТ 1643-81.

Конструктивні особливості і підвищення вимог до точності зуборізного інструменту впливають на технологію його виготовлення, використовуване обладнання та вимірювальні прилади [88, 97]. Більшість компаній, що виробляють зуборізальний інструмент, вирішують ці питання комплексно, тобто виготовляють інструмент, спеціальні зубофрезерувальні верстати, а також верстати та вимірювальні прилади для виготовлення інструменту.



Рисунок 1.2 – Оброблення шевронного колеса черв'ячною фрезою

Провідні місця у виробництві обладнання, приладів та інструменту посідають верстатобудівні та інструментні фірми ФРН. Черв'ячні фрези будь-якої точності та розміру існуючих стандартів, шліфувально-затилувальні та заточувальні верстати, а також вимірювальні прилади виробляються в основному двома фірмами – «Klingelnberg» і «Fette». Крім них, існує ряд інших фірм, зокрема, «Pfauter» (ФРН) та «David Broun» (Великобританія), що виробляють черв'ячні фрези, які поступаються за своїми якостями фрезам вищезгаданим «Klingelnberg» і «Fette» .

У ФРН та Франції найпоширенішими стали збірні конструкції черв'ячних фрез, тоді як в США та Великобританії перевага надається

монолітним конструкціям [34, 36, 41]. Чистові великомодульні черв'ячні фрези німецькими компаніями виготовляються як збірні. Профіль зубчастих рейок цих фрез можна відшліфувати відразу після їх остаточного складання в робочому корпусі на шліфувально-затиловувальних верстатах, як правило, пальцевими кругами або, для окремих конструкцій, у спеціальних технологічних корпусах на різьбо-шліфувальних верстатах (незатиловані черв'ячні фрези). Окремі конструкції фрез «Klingelnberg» дозволяють здійснювати обидва вищезгадані методи шліфування. У конструкціях збірних титанованих фрез із поворотними рейками компанії «Fette» використовуються робочі корпуси, а в них одна база- для шліфування профілю зубів і установки зубчастих рейок. Такі конструкції хоч і трудомісткі у виготовленні, але більш економічні, ніж ті, що використовують технологічні корпуси.

У таблиці 1.1 представлені для порівняння основні конструктивні параметри великомодульних чистих черв'ячних фрез вітчизняних підприємств і провідних німецьких фірм [33, 69, 72]. Аналізуючи дані таблиці можна побачити, що фрези провідних німецьких фірм близькі за своїми конструктивними параметрами до фрез вітчизняного виробництва, а по деяких параметрах поступаються останнім.

Таким чином, фрези, виготовлені по DIN 8002 за розміром і діаметром посадкового отвору, близькі до фрез за нормаллю УЗТМ, а фрези за нормаллю «Fette» - до фрез за нормаллю ПрАТ «НКМЗ». Із наведених чотирьох представників більш прогресивними є фрези за нормаллю ПрАТ «НКМЗ» та фірми «Fette», тому що вони мають збільшений до діаметру 100 мм посадковий отвір, що забезпечує системі «інструмент – оправка» більш високу жорсткість. За наявними відомостями, іноземні фірми виготовляють черв'ячні фрези до модулю 40 мм. Виготовлення фрез більш великого модулю пов'язане зі значними складнощами забезпечення їхньої необхідної точності [37, 88, 98].

Таблиця 1.1 – Порівняння конструктивних параметрів великомодульних чистових твердосплавних черв'ячних фрез різних виробників

Модуль фрези m, мм	Фрези УЗТМ		Фрези ПрАТ «НКМЗ» СТП 48.15.70			Фрези із роздільною схемою формоутворення			Фрези ФРН					
									DIN 8002			Фирма Fette		
	D _φ d	Zφ	D _φ	d	Zφ	D _φ	d	Zφ	D _φ	d	Zφ	D _φ	d	Zφ
20	280 70	0	95	00	0	275	0	16	250	60	9	290	100	10
25	300 70	8	20	00	0	280	0	16	230	60	9	310	100	10
28	320 70	8	50	00	9	285	0	16	320	80	9	340	100	10
30	-	-	-	100	0	295	0	18	340	80	9	-	-	-
40	-	-	-	-	-	335	0	18	-	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-	375	100	20	-	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-	415	100	24	-	-	-	-	-	-

1.2 Аналіз результатів дослідження процесу зубофрезерування

Підвищення продуктивності зубофрезерування тісно пов'язане з забезпеченням раціональних геометричних параметрів ріжучої частини черв'ячних фрез [54, 55, 103]. Дослідження нарізання зубчастих коліс $m = 10$ мм, сталь 45, HRC 38...42, черв'ячними затилованими фрезами з позитивним переднім кутом $\varphi = 10^\circ$ при режимах різання: $V = 24-23$ м/хв, $S = 1,6-2,47$ мм/об. показали, що стійкість цих фрез збільшується в порівнянні зі стійкістю фрез, які мають $\varphi = 0^\circ$, в 1,5 рази. Споживання верстатом потужності на процес різання зменшується на 15 - 20%, що дозволяє збільшити подачу інструменту. Однак при роботі на швидкостях понад 28 м/хв ця різниця зменшується, а при $V = 37$ м/хв спостерігається протилежне явище.

При обробленні шевронних коліс зі сталі 18ХГТ $m = 4,5$ мм, $z = 35$ за один прохід черв'ячними фрезами з різними передніми ($\varphi = 0^\circ-15^\circ$) та задніми кутами ($\alpha_b = 15^\circ-18^\circ$) отримані наступні дані. Збільшення переднього кута фрези до $\varphi = 15^\circ$ зменшує тангенціальну складову зусилля різання P_z на 16%. Збільшення заднього кута на 5° зменшує P_z на 28,6%. Одночасна зміна переднього та заднього кутів у вищезазначених межах зменшує силу на P_z на 40%. Остання конструкція фрези ($\varphi = 15^\circ$, $\alpha_b = 18^\circ$) мала знос в 3 рази менше по задній поверхні зубів, ніж фреза з $\varphi = 0^\circ$, $\alpha_b = 15^\circ$, незважаючи на те, що подача на кожний її зуб була в 2 рази більше, тому що фреза була двозаходовою.

Раціоналізація геометрії ріжучої частини чистових черв'ячних фрез, зменшення діючих зусиль різання та крутильних моментів позитивно впливає як на стійкість інструменту, так і на якість і точність оброблених поверхонь зубів [38, 43, 113].

Лабораторні та виробничі дослідження факторів, що впливають на шорсткість поверхонь зубів, показали, що найбільший вплив з них має

подача і швидкість різання

Зі збільшенням подачі висота мікронерівностей збільшується, інтенсивніше при подачах більше 1 мм/об. При збільшенні швидкості різання від 8 до 12 м/хв збільшується висота мікронерівностей, подальше збільшення швидкості різання до 18 м/хв практично не впливає на шорсткість, а при швидкостях вище 18 м/хв якість обробленої поверхні покращується.

Залежність шорсткості поверхні зубів від режимів різання свідчить про її зв'язок з процесом формування наростоутворення [40, 77, 119, 122]. Спостерігається збільшення шорсткості з ростом модуля нарізаних зубів, що пов'язується зі зниженням жорсткості системи ВПД. Зміна переднього кута черв'ячної фрези в межах $0^\circ - 6^\circ$, а заднього - від 8° до 15° не мали помітного впливу на шорсткість поверхні в умовах, що вивчаються. Найкращу якість поверхні надають сталі, які мають мікроструктуру дрібнозернистого перліту. Підвищення твердості оброблюваного матеріалу з HB 200 до HRC 47 знижує висоту мікронерівностей у 2 рази.

Відзначено збільшення в умовах виробництва шорсткості в 2-3 рази при обробці сталей марок 35ХМЛ, 30ХГН, 34ХНЗА, особливо на заготовках великих розмірів (лиття, виковки). При модулі нарізаних зубів понад 20 мм не вдається за допомогою черв'ячної фрез отримати шорсткість менше $R_z = 20$ мкм [43, 58].

Враховуючи результати цих робіт відносно до чистового нарізання коліс великого модуля, ми бачимо, що застосовувані швидкості різання на важких зубофрезувальних верстатах ($V = 12-18$ м/хв) являють собою несприятливий по відношенню до шорсткості інтервал швидкостей. У зв'язку з цим необхідно створювати нові швидкісні та жорсткі зубофрезувальні машини.

Хвилястість в поздовжньому напрямку зуба шевронних коліс обумовлена подачею інструменту на кожний оберт нарізаного колеса, а в поперечному - обмеженою кількістю різів зубів фрези, що формують

евольвентний профіль. Поперечна хвилястість отримала назву «огранування» [44, 79]. Необхідно розрізняти геометричні відхилення в профілі нарізованого зуба - їх можна отримати за допомогою розрахунків, та фактичні відхилення, які є сумою геометричних і додаткових, викликаних динамікою процесу різання.

Результати роботи показують, що хвилястість перевищує огранування та за своїм розміром для великих модулів і при подачі $S = 5$ мм/об вже співрозмірна з висотою поперечних мікронерівностей. З цих двох нерівностей огранування більш шкідливе, оскільки більшою мірою впливає на нерівномірне обертання сполучених коліс. У хвилястості вершини нерівності є гострішими і швидше припрацьовуються. Існують два найбільш раціональних шляхи зменшення величини зазначених нерівностей. Для зниження хвилястості необхідно зменшити профільний кут зубів інструменту, а для зниження огранування необхідно збільшити кількість зубів на довжині одного витка нарізи фрези.

Слід зазначити, що проведені роботи стосуються питань вивчення розміру огранування і хвилястості тільки з теоретичного боку [59, 81]. Вони не враховують, наприклад, фактори обробки, які мають вирішальний вплив на розмір хвилястості обробленої поверхні. Спроба врахувати вплив факторів уперше здійснена в роботі [132]. Нижньою межею подач при чистовому зубофрезеруванні слід вважати подачу $S = 2$ мм/об, оскільки її подальше зменшення не призводить до зменшення розміру хвилястості на обробленій поверхні зубів. Наведені в роботі формули для визначення розмірів хвилястості та огранування не враховують дію таких факторів, як модуль нарізованих зубів, швидкість різання, твердість оброблюваного матеріалу і т.п.

Як показує практика, в умовах оброблення великомодульних і великогабаритних шевронних зубчастих коліс, де діють значні сили різання і жорсткість системи ВПД недостатня, великий вплив на розмір хвилястості має правильний вибір технологічних факторів

оброблення - припуск, подача, швидкість різання [74, 75, 89]. Однак вплив технологічних факторів на хвилястість до цього часу ще не вивчено.

Макровідхилення в евольвентній поверхні зубів виникають і внаслідок впливу наступних факторів:

- похибок при виготовленні черв'ячної фрези;
- систематичних похибок профілювання інструментів;
- технологічних факторів обробки.

Вплив похибок виготовлення затилованої черв'ячної фрези на точність нарізаних зубів добре вивчено [45, 83, 123, 125]. Як випливає з результатів проведених досліджень, велика кількість похибок (близько 15) тим чи іншим чином переноситься на зуби оброблюваного колеса. Майже третина з них пов'язана з наявністю затилування та заточування зубів фрези по передніх гранях, що мають гвинтову поверхню. Однак слід зазначити, що подібні дослідження не проводилися для черв'ячних загострених фрез зі зменшеним профільним кутом зубів. Зменшення профільного кута нахилу зубів фрези може суттєво зменшити вплив радіального биття інструменту на точність нарізання зубів колеса, а гостре заточування зубів, замість затилування, зменшує дію таких відхилень, як похибка кроку стружкових канавок та похибка форми передніх поверхонь зубів.

Макровідхилення в профілі зубів коліс, пов'язані з систематичними похибками профілювання черв'ячних фрез, мають декілька методик розрахунку [45, 90, 119]. Під систематичними похибками черв'ячної фрези розуміють відхилення профілю її зубів від профілю теоретичного евольвентного черв'яка в певному перерізі - вісному або віддаленому від вісного на відстані, що дорівнює радіусу основного циліндра евольвентного черв'яка. Систематичні похибки повністю переносяться на профіль нарізуваних зубів колеса. Їхній розмір різко збільшується зі збільшенням модуля фрези. Так, при збільшенні модуля від 8 мм до 16 мм, тобто в 2 рази, систематичні похибки архімедових черв'ячних фрез по

ГОСТ 9324-60 збільшуються майже в 5 разів, дорівнюючи, відповідно, 11 мкм і 53 мкм. Тому питання точності профілювання великомодульних черв'ячних фрез є особливо важливими.

Внаслідок доцільності застосування для напівчистового та чистового зубофрезерування черв'ячних фрез зі зменшеним профільним кутом зубів запропонована нова методика їх профілювання [53, 95, 102]. Для підвищення точності фрез і оброблюваних ними коліс, відправну точку профілювання, в якій визначається профільний кут основного архімедового черв'яка фрези, рекомендується розташовувати не на початковому циліндрі базового евольвентного гелікоїда, а в середині робочої ділянки його витка. Як видно з результатів зазначених робіт, відсутність правильного підходу до профілювання фрез зі зменшеним профільним кутом зубів може значно знизити їх точність навіть по відношенню до стандартних фрез. Розмір систематичних похибок профілювання, навіть за зазначеною методикою, при модулі фрез понад 20 мм може стати настільки великим, що обмежить сферу застосування інструменту тільки 9-м ступенем точності зубчастого колеса. В цьому випадку доцільно знайти спосіб профілювання фрези на основі евольвентного черв'яка, адже це повністю позбавить інструмент від систематичних помилок профілювання і дозволить значно підвищити точність нарізання зубів великого модуля.

Значний вплив на точність нарізання зубів мають фактори процесу обробки [46, 61, 91, 120, 125]. Залежно від режимів різання та зрізуваного припуску, система ВПД піддається дії різних за розміром сил різання. Під дією пружних деформацій, спричинених силами різання, відбувається зміщення оригінальний початкового контуру інструменту, пружний поворот фрези навколо своєї осі, додатковий поворот оброблюваного колеса тощо.

Зубооброблення загартованих шевронних зубчастих коліс на сучасних зубофрезувальних верстатах з ЧПУ (рис. 1.3) дозволяє нарізати

зуби без обмеження швидкості різання, в залежності від стійкості твердосплавної фрези та обробляти зі швидкістю до 5 м/с.

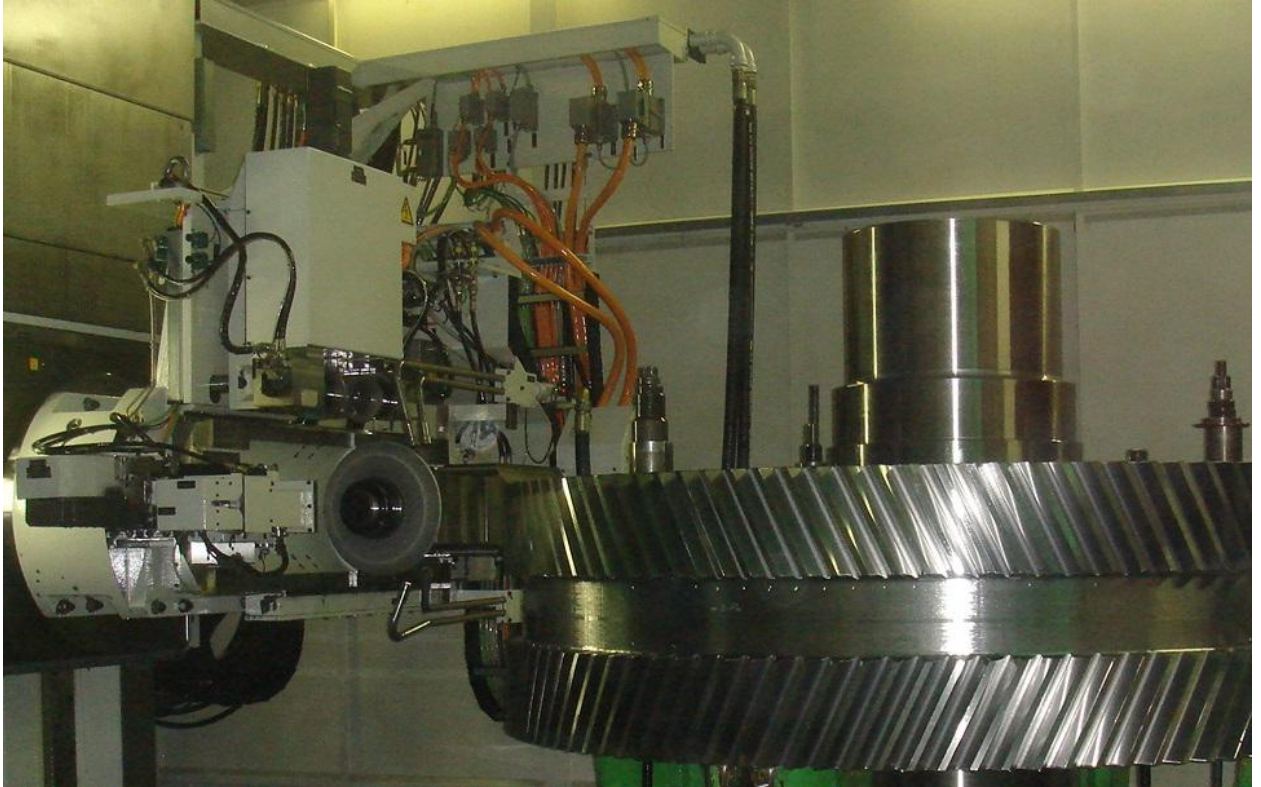


Рисунок 1.3 – Зубофрезерування шевронних коліс на верстаті з ЧПУ

За даними роботи [30], зміна подачі в межах $S = 0,5 - 1,4$ мм/об незначним чином впливає на точність зубофрезерування. При $S = 1,5$ мм/об спостерігається суттєве зростання похибки профілю різаних зубів, відхилення довжини загальної нормалі, накопиченої похибки обводових кроків зубів. Наприклад, при збільшенні подачі з 1,5 мм/об до 2,5 мм/об, тобто в 1,6 рази, похибка профілю зубів збільшилася з 18 мкм до 40 мкм, тобто в 2,2 рази, а накопичена похибка обводового кроку зубів збільшилася з 30 мкм до 65 мкм, тобто в 2 рази.

Швидкість різання має найбільш значний вплив на похибку профілю зуба [47, 92, 112, 121, 124]. Так, при збільшенні швидкості різання з 20 м/хв до 40 м/хв, тобто в 2 рази, похибка профілю зубів збільшилася з 16

мкм до 60 мкм, тобто в 3,7 рази. Вплив швидкості різання на точність обводових кроків, напрямок зубів, радіальне биття зубчастої коронки за даними невеликий. Точність фрезерування черв'ячними фрезами збільшується зі зменшенням глибини різання (припуску на чистову обробку). При $t = 0,5-1$ мм відхилення показників точності колеса не виходили за межі 7-го ступеня точності. Результати роботи свідчать, що похибки профілю зубів колеса, що виникають під впливом сил різання, менші, ніж похибки, які є наслідком недостатньо точного виготовлення самої черв'ячної фрези. Тільки в умовах недостатньої жорсткості ці похибки стають порівнянними [52, 64, 103, 110].

Результати досліджень впливу технологічних факторів обробки на точність нарізання зубів не завжди співпадають, а іноді і суперечливі. Наприклад, у роботі [29, 30] показано, що при збільшенні швидкості різання точність обробки зубів збільшується, а в роботах [35,50] отримують протилежні результати. Протиріччя даних свідчить, перш за все, про відсутність поглибленого вивчення зазначеного питання. Слід зазначити, що в галузі обробки шевронних коліс великих модулів таких досліджень практично не існує.

На ТОВ «КЗМО» застосовувалися різні конструкції великомодульних затилованих черв'ячних фрез зі зменшеним кутом профілю зубів, які отримали назву - фрези з роздільною схемою формоутворення [48, 57, 63, 122]. Виходячи з можливості забезпечення радіальним затиловуванням достатніх задніх кутів на бічних кромках зубів, автор призначив оптимально-мінімальний кут профілю зубів фрез, що дорівнює 10° . Виходячи з цього, для різної кількості зубів нарізаних шевронних коліс фрези з роздільною схемою формоутворення мають різне конструктивне оформлення, але можуть виробляти як чорнове, так і чистове фрезерування.

Для коліс з кількістю зубів менше 56 фрез використовуються суцільні фрези з можливістю внесення корекції висот зубів. Для коліс з

$z = 56 - 65$ застосовуються фрези складені з різним напрямком стружкових канавок в обох частинах. Колеса з кількістю зубів понад 65 нарізуються фрезами конструкції рознімної конструкції, що складаються з двох корпусів, з проміжним дистанційним кільцем. Якщо перші два види фрез є спеціальними, призначені для нарізання певної кількості зубів, то останній тип фрези - універсальний, що досягається шляхом зміни ширини дистанційного кільця.

Незважаючи на прогресивність розглянутих конструкцій фрез із роздільною схемою формоутворення, яка добре зарекомендувала себе в умовах виробництва ТОВ «КЗМО», слід сказати, що за окремими конструктивними параметрами вони вигідні тільки для умов нарізання мало- та середньо-модульних зубчастих коліс. Для нарізання зубів великого модуля ($m = 12 - 36$ мм) при відносно великих периметрах та перерізах зрізу задні кути $\alpha_o = 1.5 - 2$ не є оптимальними з точки зору процесу різання та якості обробленої поверхні [49, 51, 123]. Зростання розміру зубів фрези зі збільшенням модуля не тільки ускладнює заточування інструменту та забезпечення його належної точності, але і робить інструмент дорогим за витратами дефіцитної швидкорізальної сталі.

Досить зазначити, що за даними ПрАТ «НКМЗ», при виготовленні черв'ячної фрези $m = 20$ мм витрачається 102 кг сталі Р18, тоді як вага готової фрези становить 84 кг.

Схема різання фрези з роздільною схемою формоутворення (рис. 1.4) така, що кожен з двох її корпусів обробляє повністю тільки одну, що відповідає йому, бічну поверхню зубів колеса, не торкаючись дна жолобів [27, 50, 93, 99, 100]. Чорнове нарізання зубів коліс із обробкою дна жолобів у розмір здійснюється черв'ячними, дисковими або пальцевими фрезами з «протуберанцем», а також спеціальними дисковими прорізними фрезами.

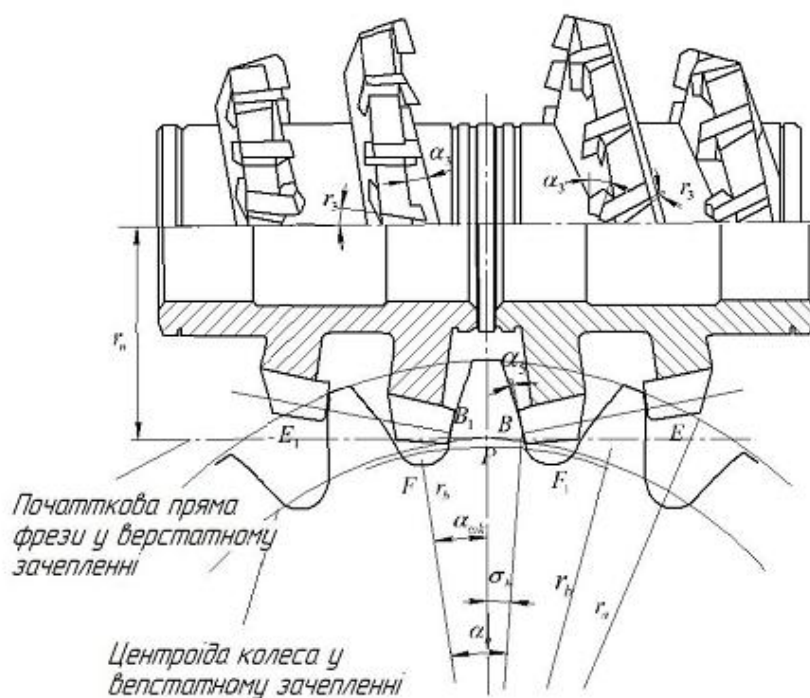


Рисунок 1.4 – Схема верстатного зачеплення фрези з роздільною схемою формоутворення та оброблюваним зубчастим колесом

З розгляду сукупності вище зазначених основних відмінностей випливає, що конструкція черв'ячних фрез з роздільною схемою формоутворення найбільш повно відповідає вимогам до великомодульного зуборізального інструменту [24, 47, 63, 94, 111]. Фрези з роздільною схемою формоутворення розширюють сферу застосування методу обкатування при обробленні зубчастих коліс до модуля 36 мм. Враховуючи, що виконані раніше роботи не торкалися питань динаміки різання фрезами з роздільною схемою формоутворення, ріжучих здатностей інструменту, якості та точності обробленої поверхні, проведення досліджень в цих напрямках є надзвичайно актуальним.

Окрім суто технічної складової обраної теми здобувачем досліджені економічні аспекти, пов'язані із впровадженням новітніх технологій у машинобудуванні. Зокрема, в монографії, присвяченій моделюванню синергетичних стратегій розвитку виробничо - економічних систем, викладено трактування та визначення особливостей моделювання

розвитку машинобудування із застосуванням апарату синергетичної теорії [72]. Також, у праці [69] здійснено аналіз перспективних напрямків удосконалення та розвитку механізмів реалізації виробничої діяльності промислового підприємства.

1.3 Висновки за розділом 1

За наслідками критичного аналізу стану виробництва великомодульних зубчастих передач та результатів досліджень, проведених в сфері зубооброблення можна дійти наступних висновків:

- виробництво великомодульних зубчастих коліс є однією з найскладніших сфер важкого машинобудування і за своїми якісними показниками поступається галузі виробництва мало- та середньомодульних коліс; при обробленні коліс великих модулів значний обсяг металу, що видаляється інструментом із жолобів зубів, та порівняно великі периметри і перерізи зрізуваних шарів призводять до різкого зниження точності і збільшення шорсткості обробленої поверхні;

- наявність дефіциту придбаного інструменту і невідповідність його конструкції умовам продуктивного та якісного оброблення великомодульних і великогабаритних зубчастих коліс є причиною того, що провідні заводи галузі виготовляють великомодульні черв'ячні фрези самостійно; витрати, пов'язані з виготовленням великомодульних фрез на заводах галузі високі, а точність і розмірна стійкість чистових фрез недостатні, що демонструє необхідність подальшого поліпшення фрез в напрямку ріжучих здібностей та в економічності виготовлення;

- в конструкціях великомодульних чистових черв'ячних фрез, як вітчизняних, так і зарубіжних, не вирішені питання раціоналізації геометрії різальної частини, схеми різання інструменту, збільшення кількості зубів, зменшення периметрів різання, економії швидкорізальної сталі, тобто параметрів, найважливіших саме для великомодульного інструменту;

- при модулі нарізаних зубів понад 20 мм неможливо черв'ячною фрезою отримати шорсткість поверхні менше $Ra\ 20$ на достатньо ефективних режимах різання; знизити шорсткість можна шляхом отримання оптимальної структури матеріалу заготовки та підвищенням його твердості, а також збільшуючи швидкохідність і жорсткість важких зубофрезувальних верстатів;

- проведені дослідження хвилястості при зубофрезеруванні мають теоретичний характер і не враховують вплив технологічних факторів оброблення, які при нарізанні великомодульних і великогабаритних коліс мають значний вплив на її розмір;

- систематичні похибки профілювання черв'ячних фрез, які знижують точність профілю оброблених зубів колеса, різко збільшуються зі збільшенням модуля фрез; аналіз органічні похибок великомодульних черв'ячних фрез і експериментальна перевірка їх впливу на точність обробки зубів не проводилися;

- результати робіт з дослідження впливу технологічних факторів обробки на точність нарізання зубів є суперечливими, що свідчить про відсутність поглибленого вивчення зазначеного питання;

- черв'ячні фрези з роздільною схемою формоутворення вигідно відрізняються конструктивними параметрами від відомих фрез. Вони найбільш повно відповідають вимогам до великомодульного зуборізального інструменту і розширюють сферу застосування методу обкатування до модуля 75 мм; у вітчизняній практиці практично відсутні дослідження, які всебічно розкривають особливості процесу різання новим інструментом та його технологічні можливості.

Аналіз стану питання дозволив окреслити мету та основні задачі дослідження.

Метою роботи є підвищення ефективності механічного оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс на основі дослідження закономірностей швидкісного зубофрезерування з роздільною схемою

утворення.

Задачі дослідження.

1. Дослідити схему різання і завантаження зубів фрези в контактному полі різання; траєкторії руху зубів фрези та їх вплив на товщину зрізуваних шарів, знос інструменту і якість обробленої поверхні.
2. Розробити методику профілювання та конструкції теоретично точних черв'ячних фрез з роздільною схемою формоутворення.
3. Провести порівняльні дослідження динаміки чистового зубофрезерування великомодульних коліс стандартними черв'ячними фрезами і фрезами з роздільною схемою формоутворення в широкому діапазоні змін режимів різання. Дослідити вплив технологічних факторів обробки на крутний момент, обводову силу та потужність різання.
4. Провести порівняльні дослідження зносу і стійкості стандартних фрез і фрез з роздільною схемою формоутворення при обробленні великомодульних шевронних коліс.
5. Дослідити вплив конструктивних параметрів інструментів і технологічних факторів на хвилястість, шорсткість і точність обробленої поверхні зубів великомодульних шевронних коліс.
6. Розробити рекомендації щодо режимів різання, дати техніко-економічну оцінку результатів та впровадити їх у виробництво.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ З РОЗДІЛЬНОЮ СХЕМОЮ ФОРМОУТВОРЕННЯ

2.1 Контактне поле різання фрези з роздільною схемою формоутворення

Зрозуміти фізичну сутність низки явищ, що супроводжують процес різання черв'ячної фрези з роздільною схемою формоутворення, таких як нерівномірність завантаження та стійкість її зубів, шлях різання та характер розподілу зносу зубів та ін., допомагає вивчення контактних полів різання фрези та заготовки [23, 33, 42, 106, 127].

Контактне поле різання АВСД (рис.2.1) правого корпусу фрези при зустрічному фрезеруванні прямозубого колеса, вибудоване спеціально розробленим графічним способом, уявляє собою розгортку на площину обробленої поверхні зуба колеса зі слідами на ній профілюючих точок зубів інструмента. Зуби, кількість яких скорочена з метою розуміння графічних побудов, пронумеровані згідно їх вступу до різання по лінії зчеплення.

Графічна побудова контактного поля та подальше виведення формул довжин різаних шарів базуються на приблизному визначенні проекцій дуг контакту l_i кожного з зубів фрези з припуском як відрізків прямих, при повороті від зуба до зуба на кут $\varphi_{\pi} = \frac{360^\circ}{z_{\phi}}$. Похибка визначення параметрів за запропонованими формулами не перевищує 1%, що є досить прийнятним для практичних висновків.

Крива CD – основа контактного поля – геометричне місце точок виходу зубів інструмента з припуску Δ , що має нерівномірний характер розподілу впродовж евольвентної поверхні зуба після чорнової прорізки

западин спеціальними дисковими фрезами.

Для визначення ширини різаного шару додатково розглянемо побудовання на рис. 2.2

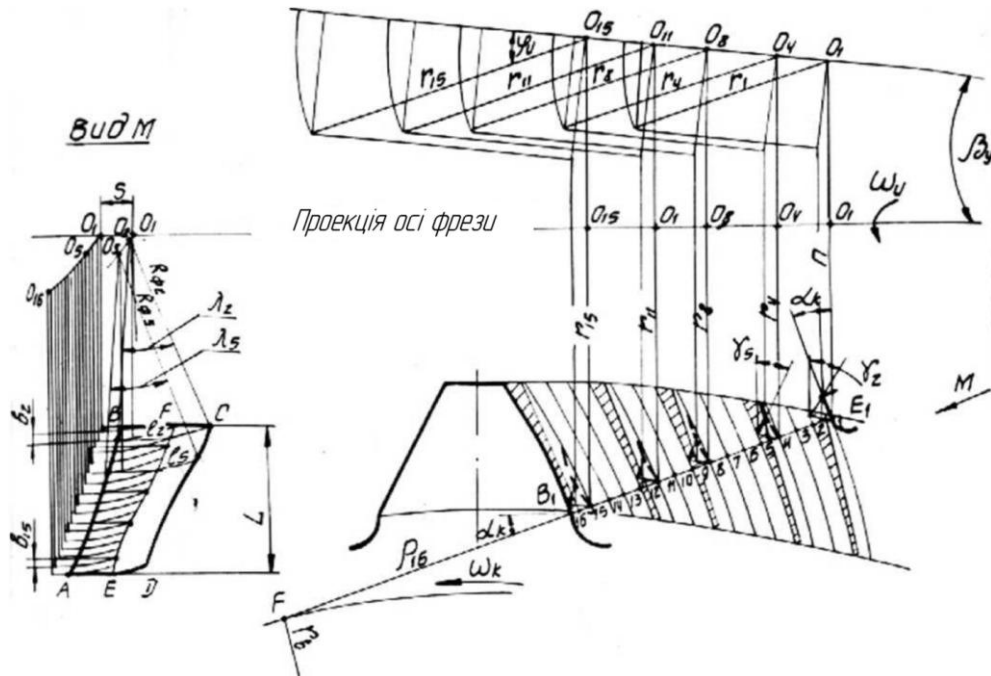


Рисунок 2.1 – Графічний спосіб побудування кконтактного поля різання правого корпусу черв'ячної фрези з роздільною схемою формоутворення

Ширина шару дорівнює сумі змінних по довжині робочих ділянок a_i и b_i кромки (рис.2.2,б) та сталих по довжині робочих ділянок c і d (рис. 2.2, а). Таким чином, ширина стружок, зрізаних зубами правозахідної фрези визначається за формулами:

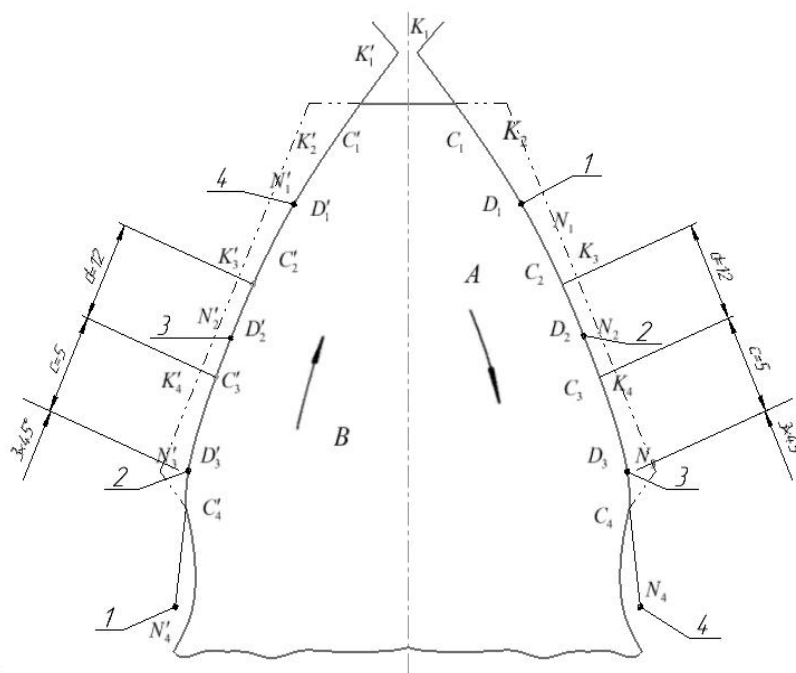
для лівого корпусу:

$$b_{\text{л}} = a_i + d = \left[r_b (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \left(\frac{\psi}{2} \right)) - \frac{P_b}{z_\phi} (i - 1) \right] \operatorname{tg} (\psi - \mu) + d \quad (2.1)$$

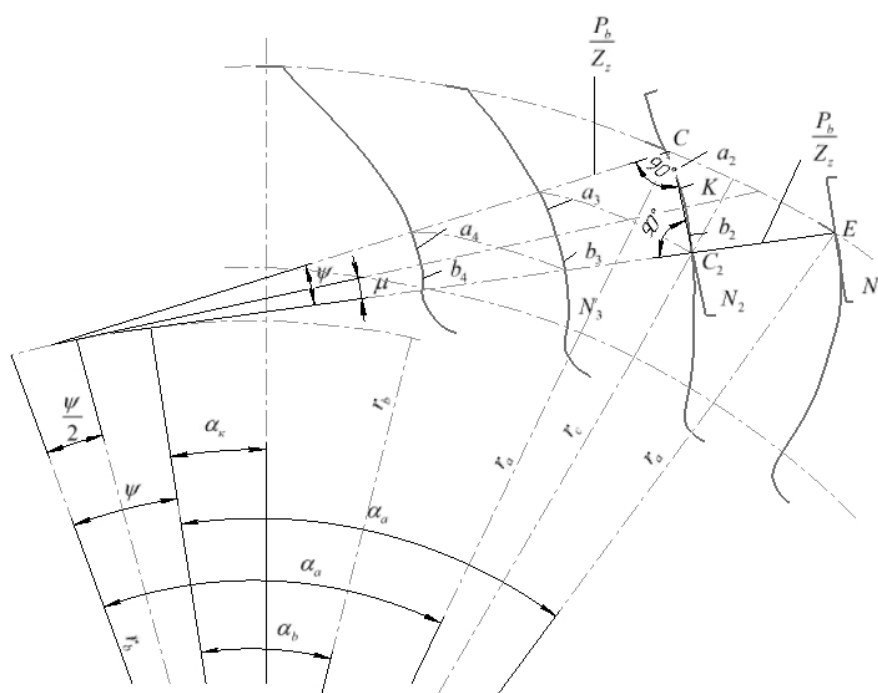
для правого корпусу:

$$b_{\text{п}} = b_i + c = \left[r_b (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \left(\frac{\psi}{2} \right)) - \frac{P_b}{z_\phi} (i - 1) \right] \operatorname{tg} (\mu) + c \quad (2.2)$$

Для лівозахідної фрези формули (2.1) и (2.2) міняються місцями.



а)



б)

Рисунок 2.2 – Визначення ширини різаних шарів:

а - схема послідовного накладення кромок фрези на профіль зубів колеса;

б - робочі ділянки кромок, розташовані вище (b_i) та нижче (a_i) точок профілювання

На рис. 2.3,б,г показані недеформовані шари, які зрізуються зубами обох корпусів правозахідної фрези з роздільною схемою формоутворення. Обробка правої бічної поверхні зуба колеса (рис.2.2, і рис.2.3,а) з правильним корпусом фрези (ПК) здійснюється в напрямку стрілки А від головки зуба до ніжки. Зуби корпусу, внаслідок відносно невеликої довжини ділянок кромки С (рис.2.2,а) і відсутності перекриття прорізів на виході з припуску, утворюють виступи [36, 44, 125, 128].

При подальших прорізах через оберт колеса на різаних шарах (див. рис. 2.3,б) утворюються виступи Р. Ці виступи, які є своєрідними ребрами жорсткості, ускладнюють деформування металу шарів, що може сприяти підвищенню температури різання.

Зуби лівого корпусу (рис.2.3,в), які вступають у різання за стрілкою В, не утворюють уступів на виході з припуску. Перекриття прорізів не порушується, тому що ділянки кромки d (рис.2.2,а) в 2,5 рази довші за ділянки С. Тому шари, різані зубами лівого корпусу, більш сприятливі за формою, ніж у правого корпусу. Форма різаних шарів, як відомо, впливає на температуру різання. У зв'язку з цим можна припустити, що зуби правого тіла, що зрізують шари більш складної форми, будуть мати більший, в порівнянні з зубами лівого корпусу, знос.

Для повного розуміння процесу оброблення зубів черв'ячною фрезою, необхідно вивчити, як виконується робота різання кожним з її зубів у контактному полі різання, тобто з'ясувати характер врізання зубів фрези в метал заготовки. Відомо, що характер різання зубів черв'ячної фрези має помітний вплив, як на стійкість інструменту, так і на якість обробленої поверхні. Аналіз процесу врізання зубів можна зробити, якщо розглянути траєкторії руху будь-якої точки різальної кромки кожного з них у кінематиці взаємних рухів інструменту та заготовки [46, 89, 115].

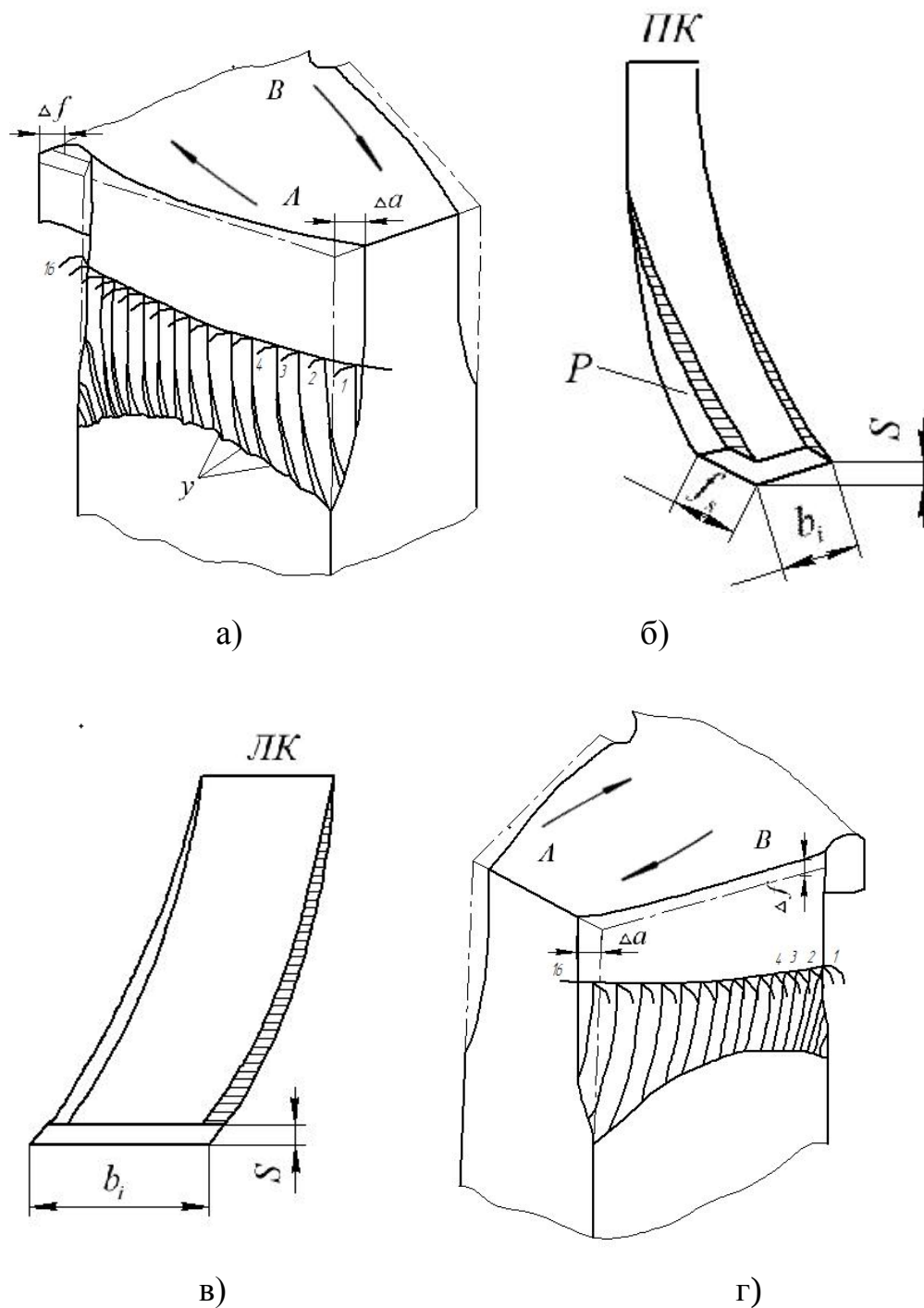


Рисунок 2.3 – Форма шарів, різаних зубами правозахідної фрези з роздільною схемою формоутворення: а - утворення уступів (Y) при роботі правого корпусу; б - форма шару, різаного зубами правого корпусу; в - форма шару, різаного зубами лівого корпусу; г - схема обробки поверхні зуба лівим корпусом

2.2 Вплив траєкторій руху різальних кромок зубів фрези на товщину різаних шарів, знос фрези, на хвилястість і шорсткість обробленої поверхні зубів колеса

Для зручності пошуку аналітичних залежностей розглянемо траєкторії руху профілюючих точок різальних кромок зубів інструменту, тобто точок, що лежать на лінії з виробом [60, 124, 128, 130].

Траєкторія руху профілюючої точки є просторовою кривою і визначається в складному, відносному русі точки навколо осі фрези з кутовою швидкістю ω_{ϕ} і навколо осі нерухомого колеса зі швидкістю ω_k . Для цього системі «заготівка – фреза» (рис. 2.4,а) надано обертальний рух навколо осі з кутовою швидкістю ω_k . Координати траєкторії x , y і z визначаються в системі координат, центр якої збігається з точкою N_i в момент її розташування на найкоротшій відстані від осі заготовки. Вісь OZ системи спрямована перпендикулярно торчовій площині заготовки, а вісь OX - під кутом α до лінії зачеплення MN_i . При повороті точки N_i радіусом обертання r_{ui} на кут ϕ_i навколо осі фрези центр її обертання O_i одночасно переміститься в горизонтальній площині в положення O_i . Проекція ділянки траєкторії руху точки N_i , розташованої нижче осі OX , на площину XOY , показана на рис. 2.4, а пунктиром [38, 69].

Координати точок траєкторії визначаються шляхом розгляду довжин відрізків, отриманих додатковою побудовою на відповідних осях координат.

$$X=AC+CD-BD; \quad (2.3)$$

$$Y=AK+KF-AN_i; \quad (2.4)$$

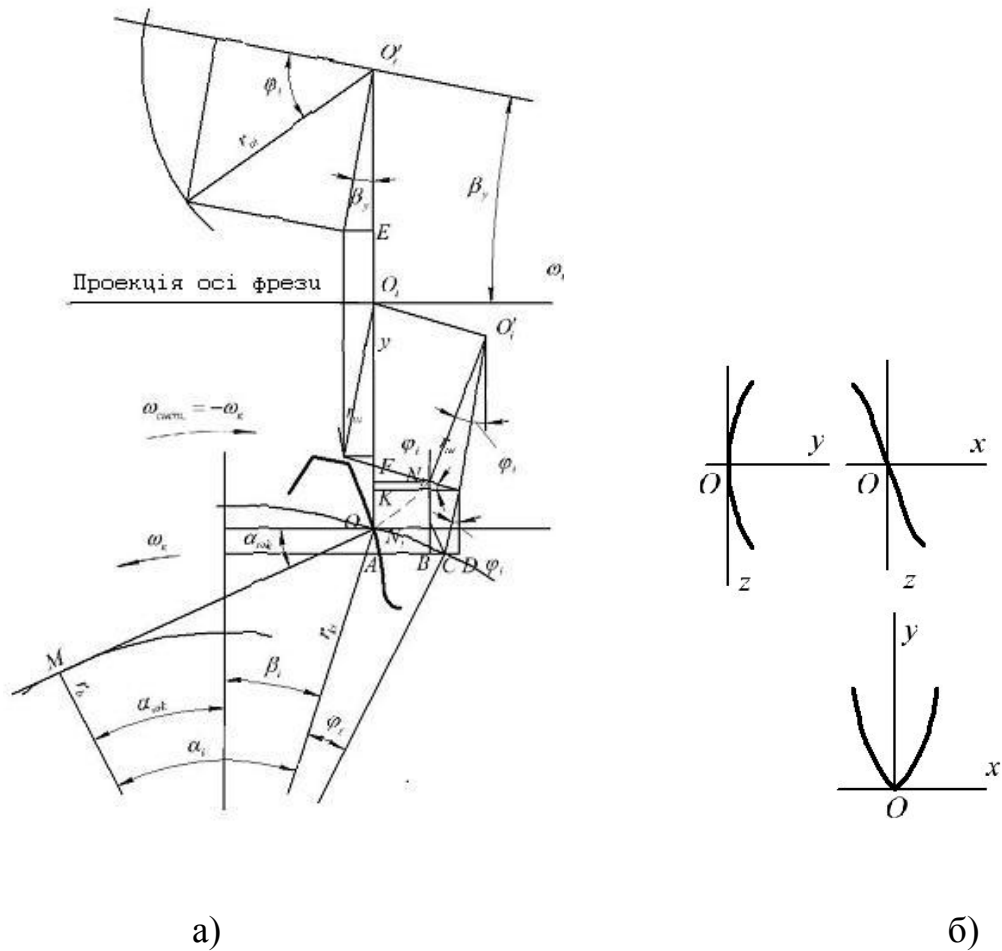


Рисунок 2.4 – До виведення рівняння просторової кривої-траєкторії точки різальної кромки у відносному русі: а - графічне визначення проекції траєкторії; б - проекції траєкторії на різні координатні площини

Схематично проекції траєкторій на різні координатні площини показані на рис. 2.4,б. Характер врізання зубів фрези можна визначити при розгляді проекцій траєкторій руху їх точок на площину XOZ . Для зручності графічної побудови розрахуємо координату X , а замість координати Z візьмемо значення кута повороту точки, що розглядається, в інтервалі $5^\circ - 35^\circ$. Таблиця 2.1 містить значення координати X проекцій траєкторій 3-х точок зубів фрези $m = 28$ мм, $z = 53$. Точки вибрані так, що в одна з них профілює евольвентну поверхню зубів у ділильного діаметра колеса (r_w), інша - по колу виступів зубів (r_{w-10}), а третя профілює останню точку евольвенти біля основи зуба (r_b). Координатами є відхилення

траєкторій руху точок від площини $Y0Z$, яка є площиною, що профілювання евольвентної поверхні.

Таблиця 2.1 – Значення координати X проєкцій траєкторій 3-х точок зубів фрези $m = 28 \text{ мм}$, $z = 53$

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

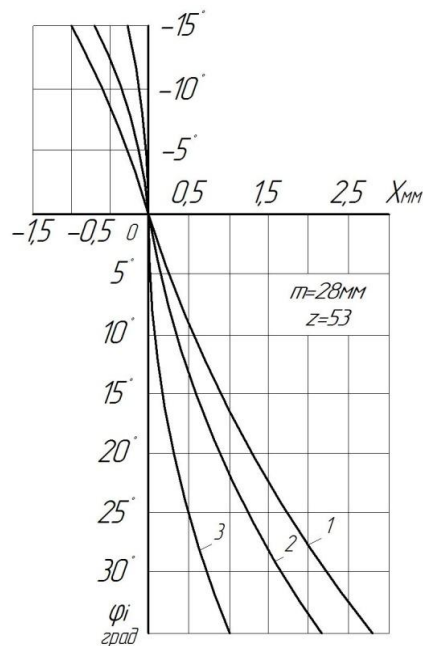


Рисунок 2.5 – Відхилення проєкцій траєкторій точок різальних кромek від площини профілювання в залежності від кута повороту фрези.

Зони обробки : 1 - вершина зубного колеса; 2 - дільний діаметр;

3 - основа зуба

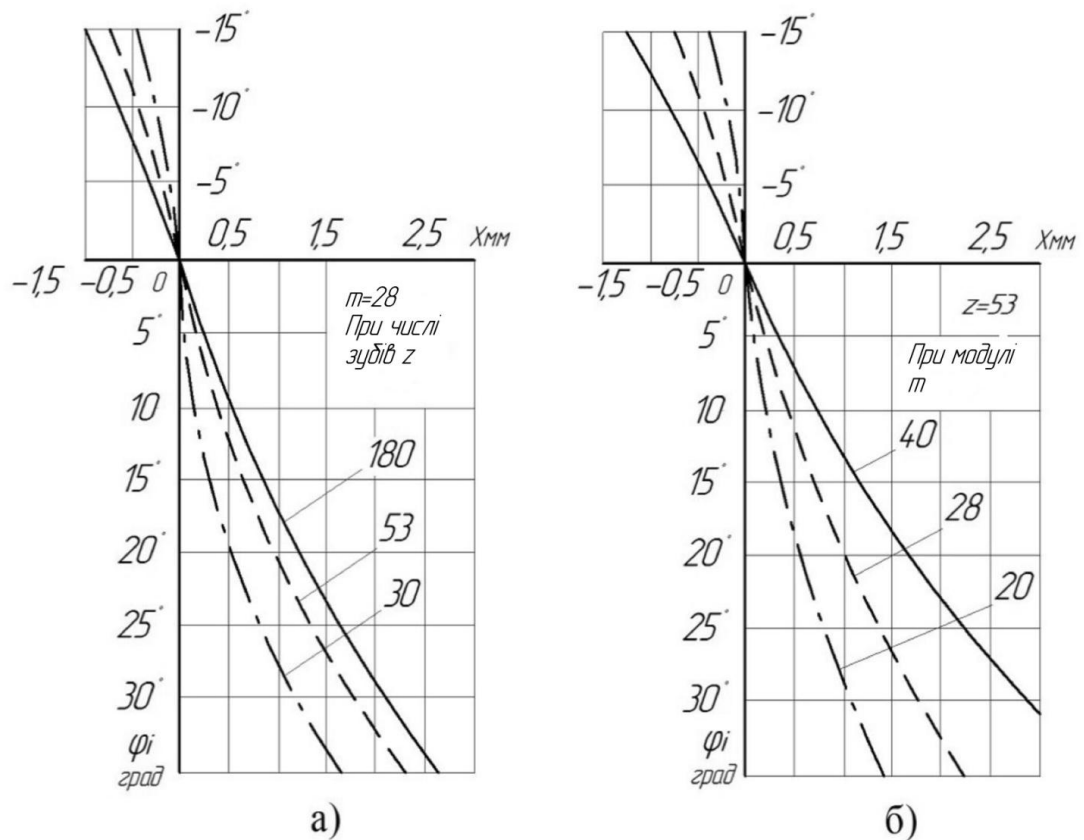


Рисунок 2.6 – Відхилення проєкцій траєкторій точок зубів фрези при обробленні коліс: а - різної кількості зубів, б – різного модуля

З графіка (рис. 2.5), побудованого за даними табл.2.1, видно, що проєкції траєкторій руху точок, що обробляють різні ділянки евольвентної поверхні, розрізняються [44, 121, 124, 132, 133]. Найменші відхилення кривої 3 від осі $O\varphi$ до точки, яка профілює евольвентну поверхню основи зуба колеса, свідчить про найгірші умови врізання зуба фрези в метал припуска порівняно з іншими зубами (криві 1 і 2). Перш ніж зуб фрези увійде в процес різання, а різання почнеться з нульової товщини шару, він протягом відносно більш тривалого часу буде ковзати по оброблюваній поверхні. У цей момент слід очікувати збільшення зусиль різання, а в результаті тертя ковзання відбувається інтенсивне нагрівання зуба в зоні різання, що призводить до зниження його стійкості.

В результаті ковзання зубів фрези відбувається наклеп поверхневого

шар металу. Зрізати ці шари металу підвищеної твердості зуби фрези будуть періодично через один оберт заготовки в умовах можливої появи вібрації, що також призводить до втрати стійкості інструменту і зниженню якості обробки.

За формою траєкторії можна зробити висновки про знос зуба. Чим менше відхилення траєкторії від осі $O\phi_i$, тим більшим є шлях різання зуба і тим більшим буде його знос.

На підставі вищевказаних міркувань, можна сказати, що кращі умови різання мають зуби фрези, які обробляють вершини зубів колеса (рис. 2.5, крива 1) і ці умови поступово погіршуються для всіх наступних зубів інструменту.

При рівних радіусах обертання зубів тут проявляється вплив їх профільного кута α_k , який збільшується з ростом z , і кутом установки фрези, який, відповідно, зменшується [49, 98, 131, 134].

Таблиця 2.2 – Значення координати X в залежності від модуля та кількості зубів колеса, мм

γ_i , град	Кількість зубів нарізованого колеса			
	30	53	90	180
5°	0,106	0,215	0,265	0,295
10°	0,229	0,441	0,540	0,598
15°	0,384	0,670	0,834	0,918
γ_i , град	Модуль нарізованих зубів			
	20	28	40	
5°	0,108	0,215	0,405	
10°	0,241	0,441	0,823	
15°	0,373	0,670	1,242	

При зростанні модуля нарізаних зубів покращуються умови обробки - крива $m = 40$ мм, найбільш сильно відхиляється від осі $O\phi_1$. Тут також, при рівних радіусах обертання зубів, на форму їх траєкторій впливає кут установки фрези β_y , який збільшується з ростом модуля. Однак, таке покращення процесу різання слід розглядати тільки з боку кінематики врізання, адже при рості модуля збільшуються периметри різання і товщини різаних шарів.

Для вивчення зміни товщини шарів були відібрані чотири зуба фрези: № 3 та 5 - які оброблюють верхівки зубів колеса, №17 - , який обробляє поверхню зубів на ділільному діаметрі та № 28 - , який оброблює основи зубів. Як видно з даних таблиці та графіка, найбільш товсті шари зрізують зуби фрези, які обробляють верхівки зубів колеса, найменш товсті шари зрізують зуби фрези, які обробляють основу зубів колеса.

Таблиця 2.3 – Довжина та товщина різаних шарів

Номер зуба	Довжина різаного шару l_i , мм	Кут контакту зуба λ_i , град	Товщина різаного шару $\delta_{\max}$, мм
	$\Delta_a=1,5$ мм	$\Delta_f=0,7$ мм	
№ 5	50,2	23°00′	0,77
№ 17	24,0	10°12′	0,49
№ 29	30,8	12°02′	0,40
$\Delta = \text{const} = 0,5$ мм			
№ 3	23,2	10°50′	0,48
№ 17	24,7	10°30′	0,41
№ 29	26,1	10°02′	0,33

При розподілі припуску нееквідистантної евольвентної поверхні різниця в товщинах шарів, різаних по висоті зуба, є більш значною, ніж

при еквідистантному розподілі і досягає двох раз. При $\Delta = \text{const} = 0,5 \text{ мм}$ зуби фрези зрізують шари, які несуттєво відрізняються за товщиною. У цьому випадку слід очікувати також кращої динаміки різання, процес обробки буде здійснюватися більш рівномірно.

Аналіз товщин різаних шарів свідчить, що в діапазоні зазвичай застосовуваних подач 3-5 мм/об і при значному розмірі різаного припуску 2-3 мм немає необхідності призначати розмір забірної фаски зубів фрези f рівним розміру припуску.

Процес врізання зубів фрези впливає на розмір шорсткості обробленої поверхні. Висота мікронерівностей найменша у вершини зуба і збільшується до його основи [55, 68, 135, 142]. Це добре підтверджується практикою оброблення коліс фрезами різних конструкцій і пояснюється більш інтенсивним утворенням наросту на різальних кромках зубів, що урізуються з тривалим ковзанням.

На основі аналізу даних таблиць 2.1. і 2.2. та графіків рис. 2.5 і рис. 2.6 можна сказати, що шорсткість обробленої поверхні зуба збільшується від його вершини до основи. Шорсткість зменшується зі збільшенням кількості нарізуваних зубів коліс.

За розмірами координати X траєкторії руху точки можна оцінювати величину хвилястості обробленої поверхні. Чим далі крива проекція траєкторії знаходиться від осі $O\phi_i$ (рис. 2.5 і 2.6) при одному й тому ж ϕ_i , тим більшою буде висота хвилястості. Найбільшу висоту хвилястості мають ділянки евольвентної поверхні зуба колеса поблизу вершини, найменшу - біля основи зуба. Величина хвилястості біля вершини є обмежувальною при призначенні режимів різання та при визначенні похибки профілю різаних зубів. Висота хвилястості зростає зі збільшенням кількості зубів оброблюваного колеса, модуля нарізуваних зубів і подачі інструменту. Найбільший вплив на висоту хвилястості має модуль зубів і подача інструменту. Кількість зубів колеса найбільше впливає в інтервалі

$z = 30-90$ [54, 87, 136, 139, 140].

При зустрічному фрезеруванні гребінець хвилястості остаточно оформлюється при вході зубів фрези в метал заготовки, а при попутному - навпаки, при виході зубів. Оскільки в першому випадку зрізування шарів починається з нульових товщин і зуби деякий час ковзають по раніше обробленій поверхні, можна сказати, що при зустрічному зубофрезеруванні хвилястість буде більшою.

Оскільки хвилястість є важливим параметром, який з одного боку визначає точність обробки профілю зубів колеса, а з іншого - істотно впливає на продуктивність чистового зубофрезерування, розгляду питань, пов'язаних з розміром і характером її розподілу, присвячені окремі розділи 3.1 і 5.1 цієї роботи.

2.3 Співвідношення сумарних периметрів одночасно ріжучих зубів стандартних фрез і фрез із роздільною схемою формоутворення

Для дослідження динаміки зубофрезерування та визначення можливого співвідношення величин крутних моментів, обводових сил і потужності різання важливо знати сумарні периметри зубів інструментів, що одночасно беруть участь у різанні [54, 137, 142]. Аналіз схем різання стандартної черв'ячної фрези і фрези із роздільною схемою формоутворення (рис. 2.7 - різальні ділянки кромek виділені жирно) показує, що у першій одночасно в різанні присутніми є 3 зуби, що працюють по чергово п'ятьма або сімома ділянками кромek, а у другій 3 або 4 зуби, що працюють трьома або чотирма ділянками кромek.

На ділянках KD і $K'D'$ лінії зачеплення BE і $B'E'$ в різанні беруть участь по одному зубу від кожного корпусу фрези, а на ділянках BK , DE , $B'K$ і $D'E'$ - по два зуби (рис. 2.7.а, позначено цифрами 1 і 2). Довжину ділянок KD і $K'D'$ можна визначити за формулою:

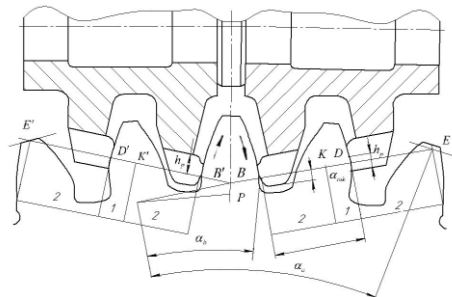
$$l_0 = \pi \cdot m \cdot \cos 20^\circ \cdot 2 - \pi b \quad (2.5)$$

де πb – кількість обертів фрези, що бере участь у різанні:

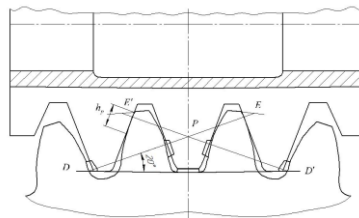
$$\pi b = \frac{r_b \operatorname{tg} \alpha_a - \operatorname{tg} \alpha_b}{P_b} \quad (2.6)$$

Довжина ділянок КД і К'Д, в залежності від кількості нарізуваних зубів, зазвичай складає $(0,25 - 0,5)P_b$., де P_b – шаг зачеплення. Співвідношення кількості працюючих зубів фрези таке, що коли від одного з корпусів у різанні бере участь один зуб, то від другого – два і навпаки. Більшу частину оберту фрези у різанні одночасно знаходяться по два зуби від кожного корпусу. Таким чином, у певні моменти обробки одночасно в різанні знаходяться три або чотири зуби.

Розрахуємо величину сумарних периметрів одночасно різальних кромок зубів для кожної з фрез при кількості зубів оброблюваного колеса $Z_1 = 90$ и $Z_2 = 270$ і модулі зубів $m = 20 - 60$ мм.



а)



б)

Рисунок 2.7 – Визначення сумарного периметра одночасно різальних кромок: а - для черв'ячної фрези з роздільною схемою формоутворення;

б - для стандартної фрези

2.4. Висновки за розділом 2

За допомогою приблизного графо-аналітичного способу, досліджене завантаження зубів фрези з роздільною схемою формоутворення в контактному полі різання. Отримані залежності для визначення довжини та ширини різаних зубами шарів при різному характері розподілу припуску на чистову обробку.

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

Ширина шарів, що зрізаються зубами лівого корпусу фрези, в 2 - 2,5 рази більше, ніж у правого корпусу. По мірі збільшення кількості зубів нарізаного колеса різниця в ширині різаних шарів збільшується. Отже, зі збільшенням кількості зубів коліс покращуються умови їх обробки фрезами з роздільною схемою формоутворення, оскільки переважання сумарних периметрів різальних кромek лівого корпусу, а рівно і осьових сил створює постійний натяг в ділильній черв'ячній парі верстата, що підвищує плавність її роботи та знижує вібрацію заготовки.

Отримані рівняння просторової кривої - траєкторії точки різальної кромки краю зуба черв'ячної фрези у відносному русі. Надано аналіз форми проєкцій траєкторії на площину профілювання в залежності від положення оброблюваної ділянки на профілі зуба колеса, модуля і кількості зубів колеса. Показано, що кінематика врізання зубів інструменту, що оброблюють вершини колісних зубів, найбільш сприятлива в порівнянні з іншими, тому що це відбувається при мінімальному ковзанні. Стійкість цих зубів фрези буде вище. Умови врізання зубів фрези з роздільною схемою формоутворення поліпшуються

при зростанні модуля і кількості зубів оброблюваних коліс.

На основі рівнянь траєкторії руху фрез отримані аналітичні залежності для визначення максимальних товщин різаних шарів в площині, перпендикулярній площині профілювання. Показано, що найбільш товсті шари зрізують зуби фрези, які обробляють вершини зубів колеса. При розподілі припуску нееквідистантно евольвентної поверхні різниця в товщині по висоті зуба шарів, що зрізуються, є більшою, ніж при еквідистантному розподілі, у два рази. У другому випадку зуби фрези з роздільною схемою формоутворення зрізують шари, що несуттєво відрізняються за товщиною. Аналіз товщин різаних шарів показує, що в діапазоні зазвичай використовуваних подач і при значній величині припуску, що зрізується, немає необхідності призначати розмір забірної фаски зубів фрези рівним розміру припуску. У цьому випадку достатньо фаски $1,5 \times 45^\circ$.

За формою траєкторії руху зубів фрези можна дійти висновку щодо розміру та характеру розподілу шорсткості і хвилястості на обробленій поверхні зубів колеса. Шорсткість обробленої поверхні зуба збільшується від її вершини до основи. У міру збільшення кількості колісних зубів покращуються умови врізання зубів фрези і шорсткість зменшується. Величина хвилястості обробленої поверхні зростає зі збільшенням модуля та кількості зубів нарізуваних коліс. Висота хвилі при зустрічному зубофрезеруванні більша, ніж при попутному, адже в першому випадку, при вході в метал, зуби фрези деякий час ковзають по раніше обробленій поверхні, що збільшує висоту хвилі.

Установлено, що при збільшенні модуля нарізуваних зубів у 3 рази загальні периметри одночасно різальних кромок зубів фрези з роздільною схемою формоутворення збільшуються в 1,1 рази, а для стандартної фрези - в 1,9 рази. Крім того, периметри першого в 2 - 5 разів менші за другий. Це свідчить, по-перше: про менш значний, порівняно зі стандартними фрезами, вплив модуля зубів на величину крутного

моменту, обводової сили та потужності різання при обробленні коліс за допомогою фрез із роздільною схемою формоутворення, а по-друге: про набагато менші значення величин позначених параметрів динаміки для фрез із роздільною схемою формоутворення. Ефективність застосування фрез із роздільною схемою формоутворення збільшується з ростом модуля кількості зубів оброблюваних коліс.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ТОЧНОСТІ ОБРОБЛЕННЯ ЕВОЛЬВЕНТНОЇ ПОВЕРХНІ ШЕВРОННИХ ЗУБІВ ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ

3.1 Вплив конструктивних параметрів і подання фрези на величину хвилястості обробленої поверхні шевронних зубів

Хвилястість (рис. 3.1. а) утворюється в результаті поздовжньої подачі S черв'ячної фрези на кожний оберт заготовки [12, 15, 118]. Розрахункову або геометричну висоту хвилі по нормалі до профілю зуба визначають (табл. 3.1.) за формулою:

$$h_s = \frac{S^2 \cdot \sin \alpha_u}{8r_i}, \quad (3.1)$$

α_u - профільний кут зубів фрези;

r_i - радіус обертання точки, що розглядається, різальної кромки, яка формує хвилю.

Таблиця 3.1 - Розрахункова висота хвилі h_s , мкм

Характеристика фрези з роздільною схемою формоутворення			При подачі S , мм/об						
m	z	α_k	2	3	4	5	6	7	8
20	316	18°39'	1.5	3.4	6.1	9.6	13.8	18.8	24.6
25	40	8°50'	0.7	1.6	2.9	4.6	6.6	9.0	11.8
25	110	15°56'	1.3	2.9	5.3	8.3	11.9	16.2	21.2
28	170	17°22'	1.4	3.2	5.6	8.8	12.6	17.2	22.1

З формули (3.1) видно, що при інших рівних умовах фрези із роздільною схемою формоутворення, які мають зменшений профільний кут зубів ($\alpha_k = 5^\circ - 19^\circ$), в порівнянні зі стандартними фрезами ($\alpha_u = 20^\circ$) забезпечують отримання меншої хвилі на обробленій поверхні зубів колеса [12, 57, 108].

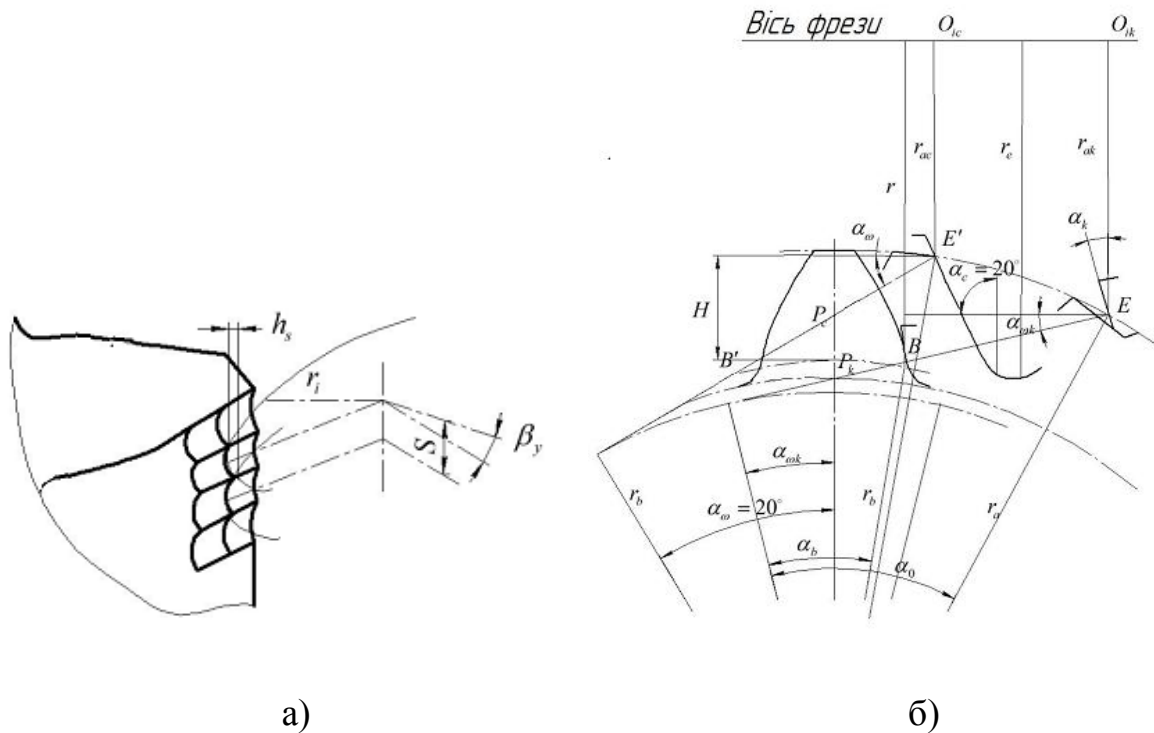


Рисунок 3.1 – Визначення розрахункової (геометричної) величини хвилястості обробленої поверхні: а - схема утворення хвилі на бічній поверхні зуба колеса; б - визначення розміру радіусів обертання точок зубів фрези, що формують хвилю біля вершини зуба колеса

Наявність у формулі радіусу точки, що розглядається, зуба фрези r_i визначає розмір і характер розподілу хвилястості в поперечному по зубу колеса напрямку. Найвища висота хвилі h_s буде біля вершини зуба колеса, де r_i є мінімальним, а далі, зі зростанням r_i , вона поступово зменшується до основи зуба. Величина хвилі у вершини зуба є визначальним фактором призначення режимів різання і визначення похибок профілю різаних зубів.

На графіку рис. 3.2. показана залежність максимальної геометричної

висоти хвилі від кількості зубів оброблюваного колеса.

У всьому діапазоні кількостей зубів, про який йде мова, $z = 30 - 330$ розрахункова хвиля для фрез із роздільною схемою формоутворення менша, ніж для фрез НКМЗ. Різниця в висоті хвиль зменшується зі збільшенням кількості зубів колеса, що пояснюється поступовим зближенням профільних кутів зубів фрез [66, 67, 116].

Черв'ячні фрези $m = 20$ мм, виконані за ГОСТ 9524-80, поступаються обом вищезазначеним типам фрез. Для стандартних фрез із профільним кутом зубів 20° характерна стабільність зміни висоти хвилі (в межах 1 мкм), що пояснюється постійністю кута профілю нахилу α_c і незначними змінами радіуса r_{ac} .

Ефективність фрез із роздільною схемою формоутворення особливо проявляється в діапазоні кількостей зубів $z = 30 - 90$, де при значно меншому, ніж для стандартних фрез профільному куті зубів, розрахункова висота хвилі в 2,5 рази менше, що свідчить про можливість суттєвого підвищення подачі інструмента. Однак, розглядаючи хвилястість як відхилення від евольвентної поверхні, можна стверджувати, що точність оброблення зубів коліс фрезами з роздільною схемою формоутворення, в порівнянні зі стандартними фрезами, вище. Вона зростає зі зменшенням кількості нарізуваних зубів колеса [67, 76].

Для орієнтовного вибору подачі при обробці зубчастих коліс за допомогою фрез із роздільною схемою формоутворення на графіку рис. 3.3. наведена узагальнена залежність геометричної висоти хвилі h_{sk} від подачі інструмента та кількості нарізуваних зубів колеса. При визначенні висоти хвилі h_{sk} потрібно отриману величину h_{sm} поділити на відповідний до обраного модулю коефіцієнт k_T , вказаний у верхньому лівому куті графіка.

Розрахункові значення висоти хвиль визначаються без урахування умов реального процесу різання. Їх слід розглядати як мінімальні і неминучі, викликані кінематикою рухом інструменту і його конструктивними параметрами. Реальна хвилястість буде більшою, оскільки значною мірою

визначається жорсткістю та пов'язаними з нею вібраціями системи ВПД, які в свою чергу, залежить від технологічних факторів обробки - припуску, подачі, швидкості різання, а також від схеми різання та геометрії різальної частини інструменту [67, 85].

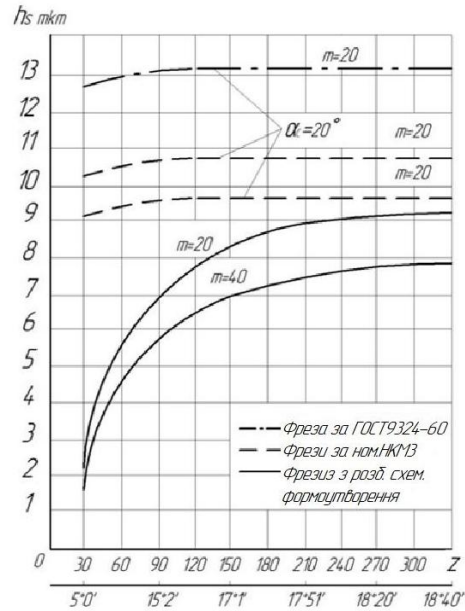


Рисунок 3.2 – Залежність максимальної розрахункової висоти хвилі від кількості зубів нарізованого колеса для фрез різних виконань

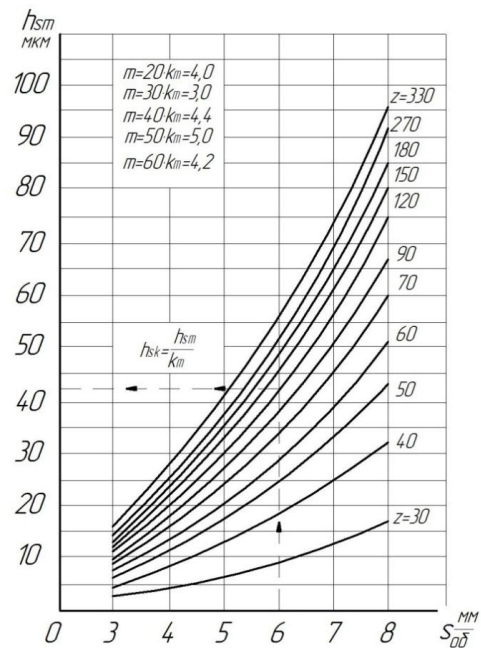


Рисунок 3.3 – Графік для визначення максимальної розрахункової висоти хвилі при обробленні коліс за допомогою фрез із роздільною схемою формоутворення

Серед факторів, що впливають на формування хвилястості поверхонь при обробці зубчастих коліс: початковий стан поверхневого шару заготовки, що оброблюється; точність розташування та фіксації заготовки та ріжучого інструменту; геометрія ріжучого інструменту та кінематика руху інструменту та заготовки. Залежно від способів та умов обробки зубчастих коліс ступінь впливу перерахованих факторів на формування хвилястості буде різним[14].

Аналіз результатів дослідження показує, що основний вплив на хвилястість при високошвидкісному фрезеруванні мають жорсткість технологічної системи, швидкість та подача інструменту. Результати розрахунків, підкріплені експериментальними даними, демонструють, що при збільшенні жорсткості j в 2 рази, з 10 до 20 кН/мм, загальна хвилястість зменшується на 40% під час фрезерування черв'ячною фрезою при швидкості різання $v = 2,5$ м/с. При збільшенні швидкості різання до $v = 5,8$ м/с буде спостерігатися подальше зменшення значення висоти хвилястості W_z на 30% ($j = 20$ кН/мм) [14].

3.2. Аналіз систематичних помилок профілювання та точності оброблення шевронних зубів архімедовими черв'ячними фрезами

У цьому розділі роботи проведено порівняльний теоретичний аналіз систематичних похибок профілювання великомодульних черв'ячних фрез зі стандартним профільним кутом оригінального контуру інструментальної рейки та спеціальних черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення зі зменшеним профільним кутом оригінального контуру $\alpha_z = 5^\circ - 19^\circ$ [13, 39, 67].

У практиці важкого машинобудування інженерії, де основна кількість великомодульних черв'ячних фрез виготовляється заводами самостійно, набув поширення метод профілювання фрез на основі архімедова черв'яка. Профільний кут вісного перерізу архімедова черв'яка α_4 визначається за кутом нахилу дотичної до профілю вісного перерізу теоретичного

евольвентного черв'яка на початковому циліндрі:

$$\operatorname{ctg} \alpha_4 = \operatorname{ctg} \alpha_0 \cdot \cos \tau_1, \quad (3.2)$$

де α_0 - профільний кут початкового контуру інструментальної рейки.

У затилованих черв'ячних фрез, у зв'язку з наявністю гвинтових стружкових канавок, лівий і правий профільні кути зубів α_u є неоднаковими та відрізняються від профільного кута основного архімедова черв'яка α_4 .

$$\operatorname{ctg} \alpha_{un} = \operatorname{ctg} \alpha_4 \pm \frac{K \cdot z_{\delta}}{T}, \quad (3.3)$$

$$\operatorname{ctg} \alpha_{un} = \operatorname{ctg} \alpha_4 \mp \frac{K \cdot z_{\delta}}{T}, \quad (3.4)$$

де K – розмір затиловування фрези;

T - крок спіралі гвинтової стружкової канавки.

Верхній знак стосується правозахідних фрез, нижній - лівозахідних. У загострених черв'ячних фрезах із роздільною схемою формоутворення профільні кути зубів лівого і правого корпусів однакові та дорівнюють α_4 .

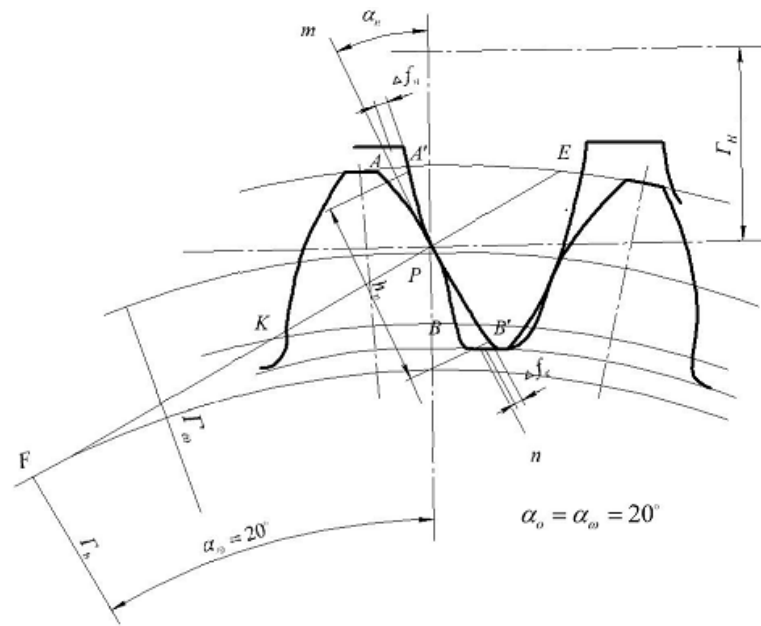
На рис. 3.4 показано сполучення теоретичного евольвентного черв'яка фрези з зубчастим колесом при стандартному профільному куті початкового контуру інструментальної рейки $\alpha_0 = 20^\circ$. А'В'- активна ділянка профілю витків евольвентного черв'яка у вісному перерізі, яка бере участь в зачепленні. Відповідно, черв'ячна фреза, що проектується на основі цього черв'яка, буде мати таке ж розташування робочих ділянок на різальних зубах [66, 76, 78]. Для визначення профільного кута α_4 архімедова черв'яка, еквівалентного евольвентному, до профілю останнього на початковому циліндрі радіуса r_n було проведено дотичну пряму mn . Точка дотику, на рис. 3.4, а вона збігається з полюсом зачеплення P , лежить приблизно посередині активної ділянки профілю А'В'. У цьому випадку найбільші систематичні похибки профілювання черв'ячного різача біля вершини Δf_r і біля основи зубів Δf_n практично однакові, при деякому перевищенні Δf_n над Δf_r через більшу кривизну профілю в точці А. Профіль оброблених зубів колеса (показаний пунктиром) буде відрізнятися від теоретичного

евольвентного біля голівки і біля ніжки голови і біля підніжжя, відповідно. Відзначене подвійне фланкування зубів колес сприятливе з точки зору можливої подальшої опоряджувальної обробки або подальшої експлуатації.

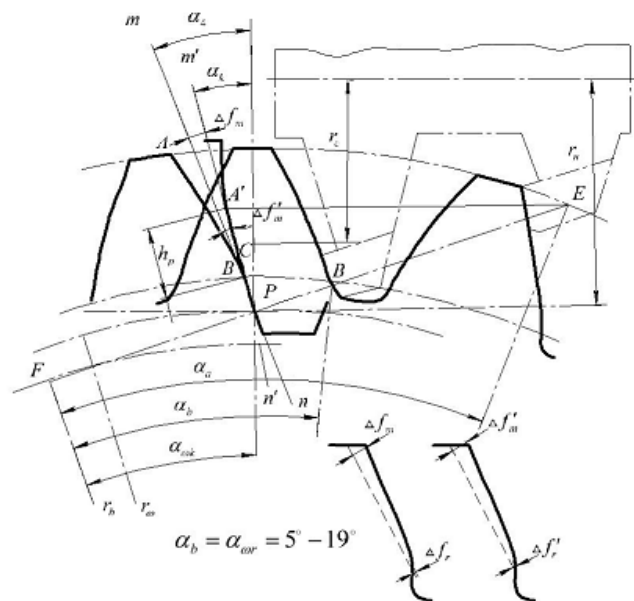
На рис. 3.4,б показане сполучення теоретичного евольвентного черв'яка фрези з зубчастим колесом для випадку профілювання черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення зі зменшеним профільним кутом початкового контуру інструментальної рейки $\alpha_z = 5^\circ - 19^\circ$. Лінія зачеплення проходить через нижню граничну точку евольвенти зуба В. Точку Р у цьому випадку можна назвати умовним полюсом зачеплення, оскільки фактичного контакту сполучених профілів витка черв'яка і зуба колеса у цій точці не відбувається. Обробка евольвентної поверхні зуба за допомогою фрези із роздільною схемою формоутворення починається в точці Е лінії зачеплення FE і закінчується в точці В, не торкаючись полюсу Р. Якщо при визначенні кута α_4 архімедова черв'яка провести дотичну пряму mn через точку Р профілю, що лежить на початковому циліндрі евольвентного черв'яка та розташована за межами активної ділянки профілю А'В', то отримаємо інший, в порівнянні з рис. 3,4,а розподіл помилок систематичних похибок фрези [39, 62, 118].

Похибки будуть найбільшими біля основи зубів і незначними біля верхівок. Профіль оброблених зубів колеса (показаний пунктирною лінією на рис. 3.4,в) у цьому випадку буде мати несприятливі відхилення від теоретичної форми.

Поліпшити характер розподілу систематичних похибок фрези, зробити його таким же, як у і фрез зі стандартним початковим контуром інструментальної рейки (рис. 3.4, а,г) можна, якщо дотичну до профілю черв'яка ($m'n'$ на рис.3.4,б) провести не в точці Р, яка лежить на початковому циліндрі, а в точці С, розташованій в середині активної ділянки профілю А'В'.



а)



б)

в)

г)

Рисунок 3.4 - Визначення профільного кута архімедова черв'яка, еквівалентного евольвентному: а – профілювання стандартних фрез; б - профілювання фрез із роздільною схемою формоутворення; в,г – розподіл відхилень профілю зубів колеса від теоретичного евольвентного

Зі зростанням кількості зубів колеса z збільшується висота робочої ділянки профілю зубів обох типів фрез, що призводить до росту похибок їх

профілювання і, відповідно, відхилень профілю оброблених зубів колеса від теоретичного евольвентного [76, 80, 101]. Більш інтенсивний ріст похибок для фрез із роздільною схемою формоутворення в порівнянні зі стандартними фрезами, пояснюється істотними змінами кута зачеплення α_{wk} і профільного кута зубів α_k . Якщо перший з них має значний вплив на висоту h_p робочої ділянки профілю зубів фрези, то другий - визначає кривину профілю витка теоретичного евольвентного черв'яка. У міру зменшення кутів α_{wk} і α_k , зменшуються h_p і кривина витка, що дає зниження $\Delta f_{\max}$ і, відповідно, точність обробки профілю зубів коліс збільшується.

Прикладом можуть слугувати дані таблиці 3.2., отримані для черв'ячних фрез $m = 28$ мм.

У всьому розглянутому діапазоні кількостей зубів $z = 30 - 350$ точність оброблення коліс фрезами з роздільною схемою формоутворення вище, ніж стандартними фрезами [81, 112].

Таблиця 3.2 – Залежність похибки профілю від кількості оброблюваних зубів

Кількість зубів колеса Z	Фреза із роздільною схемою формоутворення			Стандартн а фреза Δ $f_{\max}$, мм	Допуск на пропуск зуба ГОСТ 1643- 81, мм
	α_{wk}	α_k	$\Delta f_{\max}$, мм		
30	5°0'7"	4°36'34"	0.020	0.170	0.080
41	9°6'44"	8°52'35"	0.044	0.177	0.090
56	12°0'40"	11°45'31"	0.065	0.181	0.105
74	13°57'31"	13°31'1"	0.082	0.189	0.105
112	16°0'46"	15°33'39"	0.105	0.194	0.130
230	18°0'0"	17°26'51"	0.164	0.202	0.170
350	19°0'6"	18°21'16"	0.155	0.211	-

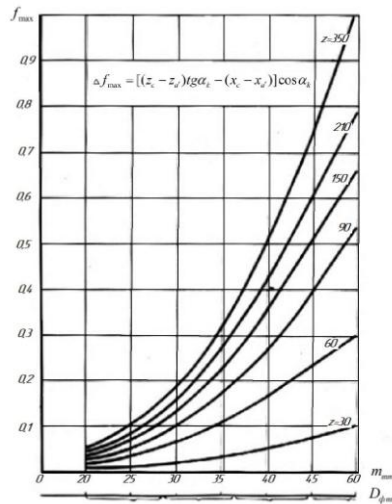


Рисунок 3.5 – Визначення залежності максимальних систематичних похибок профілювання фрез із роздільною схемою формоутворення від модуля інструменту та кількості зубів оброблюваного колеса

На графіку рис. 3.5. надана узагальнена залежність максимальних систематичних похибок профілювання фрез із роздільною схемою формоутворення від модуля інструменту та кількості зубів оброблюваного колеса.

При зростанні модуля та кількості зубів похибки $\Delta f_{\max}$ збільшуються, найбільш інтенсивно при $m = 30 - 50$ мм і $z = 90 - 350$, у багатьох випадках перевершуючи допуски до профілю зубів колеса відповідно до норм плавності згідно з ГОСТ 1643-72. На точність оброблення профілю зубів колеса, крім систематичних похибок фрези впливають і інші відхилення її параметрів, наприклад: похибка кроку та профільного кута зубів і т.д.

З урахуванням цього та виходячи з обмеження, що органічні похибки фрези не повинні перевищувати 50% величини допуску на профіль зубу колеса згідно з нормами плавності по ГОСТ 1643-81, у таблиці 3.3. визначені діапазони кількостей зубів колеса, які можна обробляти фрезами із роздільною схемою формоутворення, забезпечуючи точність профілю зубів відповідно до заданого ступеня точності колеса [39, 71].

Таблиця 3.3 – Діапазони кількості зубів коліс, що обробляються з необхідною точністю

Модуль фрези m , мм	При ступені точності		
	7	8	9
20	18 - 100	100 - 350	більше 350
25	18 - 40	40 - 60	більше 60
30	-	18 - 45	більше 45
35	-	18 - 35	більше 35
40	-	18 - 28	більше 28
50	-	18 - 20	більше 20

Прийнявши аналогічні обмеження на величину $\Delta f_{\max}$ для стандартних фрез, ми отримаємо значно гірші результати. У всьому діапазоні модулів $m = 20 - 42$ мм та при $z = 30 - 350$ похибки обробки профілю зубів стандартними фрезами перевершують допуски на профіль згідно з нормами плавності 8-го ступеня точності відповідно до ГОСТ 1643-72. Тому точність оброблення зубів черв'ячними фрезами із роздільною схемою формоутворення, за умови визначення кута профілю архімедова черв'яка по середній точці активної ділянки профілю теоретичного евольвентного черв'яка, вище точності оброблення стандартними фрезами [12, 14, 76].

З даних таблиці 3.3. можна побачити, що архімедові черв'ячні фрези із роздільною схемою формоутворення тільки при модулі 20 мм можуть забезпечити отримання точного профілю зубів у достатньо широкому діапазоні кількості зубів $z = 18 - 350$. Це положення неможливо визнати задовільним на тлі постійно зростаючих вимог до точності виробництва зубчастих коліс. Вже зараз виникла необхідність виготовлення великомодульних $m = 20 - 28$ мм і великогабаритних $\varnothing 5000-10000$ мм зубчастих коліс 7-го і 8-го ступеня точності.

Подальше поліпшення точності оброблення зубів великомодульних

коліс можливе при зміні методу профілювання черв'ячних фрез з приблизного - на основі архімедова черв'яка, до точного - на основі теоретичного евольвентного черв'яка. При цьому із загального балансу похибок фрези буде повністю виключена систематична похибка профілювання компонента $\Delta f_{\max}$, яка складає, згідно з вищевикладеними результатами значну величину. Втім, питання щодо виготовлення великомодульних затилованих евольвентних фрез стандартної конструкції, як було зазначено раніше, наразі з технологічних міркувань не може бути вирішеним. Загострені черв'ячні фрези, завдяки принципово новій схемі різання, можуть бути зпрофільованими та виготовленими на основі евольвентного черв'яка.

3.3 Аналіз конструкцій і точності оброблення профілю зубів шевронних коліс евольвентними черв'ячними фрезами з роздільною схемою формоутворення.

Кожний із корпусів фрези з роздільною схемою формоутворення повністю обробляє одну, відповідну йому, бічну поверхню зубів колеса за одною зі сторін міжвісного перпендикуляру [76,101].

При конструюванні евольвентної фрези (рис. 3.6) необхідно, щоб різальні кромки зубів кожного з корпусів лежали на відповідній їм гвинтовій поверхні теоретичного евольвентного черв'яка: лівого корпусу – на правій гвинтовій поверхні, правого - на лівій гвинтовій поверхні.

Виходячи з цього, можливі два варіанти виконання евольвентної фрези з роздільною схемою формоутворення.

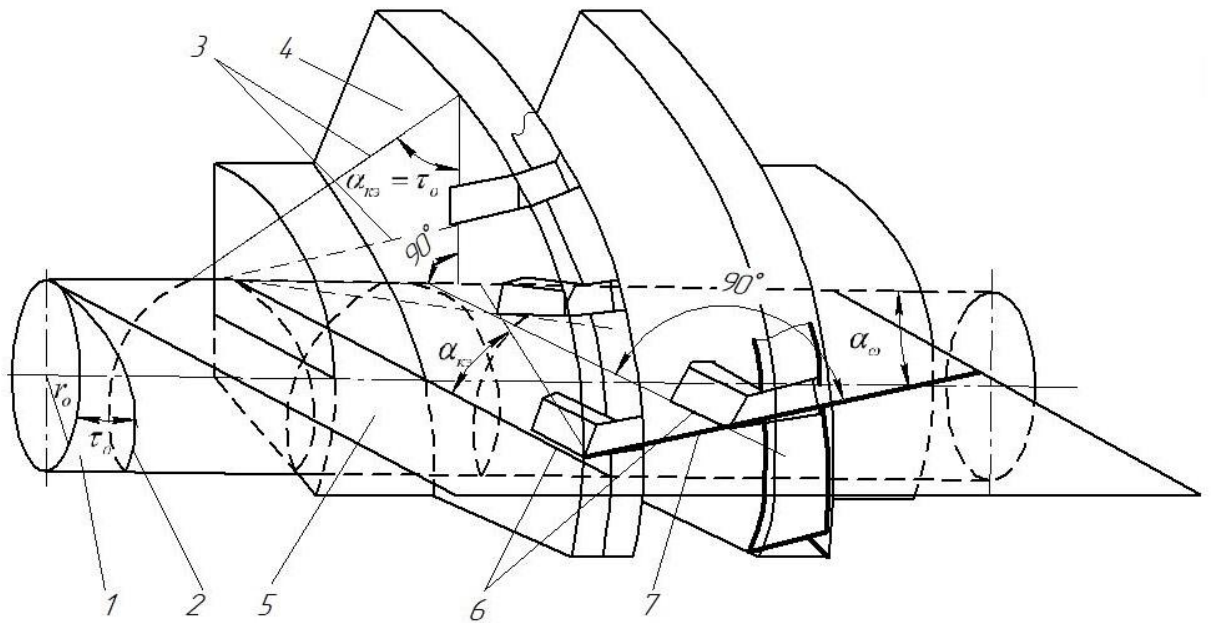


Рисунок 3.6 – Геометрія правого корпусу правозахідної евольвентної фрези з роздільною схемою формоутворення: 1 - основний циліндр; 2 - напрямна гвинтова лінія; 3 – утворюючі прямі (УП); 4 – ліва гвинтова поверхня; 5 – площина верстатного зачеплення; 6 – різальні кромки зубів, розташовані на гвинтовій евольвентній поверхні; 7 - лінія верстатного зачеплення

Перший варіант - рис.3.7,б,в. У кожному з корпусів фрез зуби розташовані з забезпеченням раціональних кутів різання: переднього кута $\gamma = 6^\circ\text{-}12^\circ$; кута нахилу головного різальної кромки $\lambda = 10^\circ\text{-}15^\circ$; заднього кута $\alpha_6 = 10^\circ\text{-}15^\circ$, але при цьому необхідна наявність гвинтової стрічки $f_{\text{л}} = 0,05\text{-}0,15$ мм, яка забезпечує розташування криволінійних різальних кромки зубів на гвинтовій поверхні теоретичного евольвентного черв'яка зубів. Непрямий контроль профільного кута $\alpha_{\text{кз}}$ та кроку $P_{\text{в}}$ ножів здійснюється уздовж утворювальних прямих (позначені як УП) евольвентної поверхні черв'яка в перерізі, що знаходиться на віддаленні від осі на відстані, що дорівнює радіусу основного циліндра черв'яка r_0 . Для цього передбачені фальшпланки (ФП), довжина яких дорівнює висоті h_p активної ділянки профілю черв'яка і які шліфуються разом із зубами фрези на токарно-затилувальному або

черв'ячно-шліфувальному верстаті.

До переваг першого варіанту виконання фрези належать можливості забезпечення раціональної геометрії різальної частини і високоточної гвинтової лінії зубів [107, 114]. Недоліки цього варіанту наступні. Ускладнене фрезерування пазів під зуби, тому що в кожному з корпусів вони нахилені до осьової площини фрези під різними кутами. Наявність гвинтової стрічки f_d рівнозначна зносу зубів і збільшує зусилля різання і шорсткість обробленої поверхні зубів колеса. Заточування та переточування зібраної фрези складається з двох операцій: черв'ячно-шліфувальної – для отримання гвинтової стрічки на зубах, та заточувальної – для зменшення ширини стрічки та отримання заднього кута α_v . Однак, слід зазначити, що фрези з роздільною схемою формоутворення з гвинтової стрічкою на зубах в межах 0,1 - 0,2 мм, при роботі з подачею 4 мм/об і швидкістю різання 25 м/хв, мають високу розмірну стійкість, близько 60 годин, чого достатньо для обробки зубчастого вінця $m = 28$ мм; $z = 284$; $\varnothing 8058$ мм; $b = 1000$ м зі сталі 35 ХМЛ, твердістю HB 220 - 260.

Другий варіант – рис. 3.7 а,г,д. Різальні кромки зубів обох корпусів фрези розташовані на утворювальних прямих (позначені як ОП) бічних поверхнях теоретичного евольвентного черв'яка [39, 62, 117].

З метою забезпечення постійності цього розташування після переточування зубів по заднім граням, передні грані зубів R лежать в площинах, дотичних до основного циліндра радіусу евольвентного черв'яка радіусу.

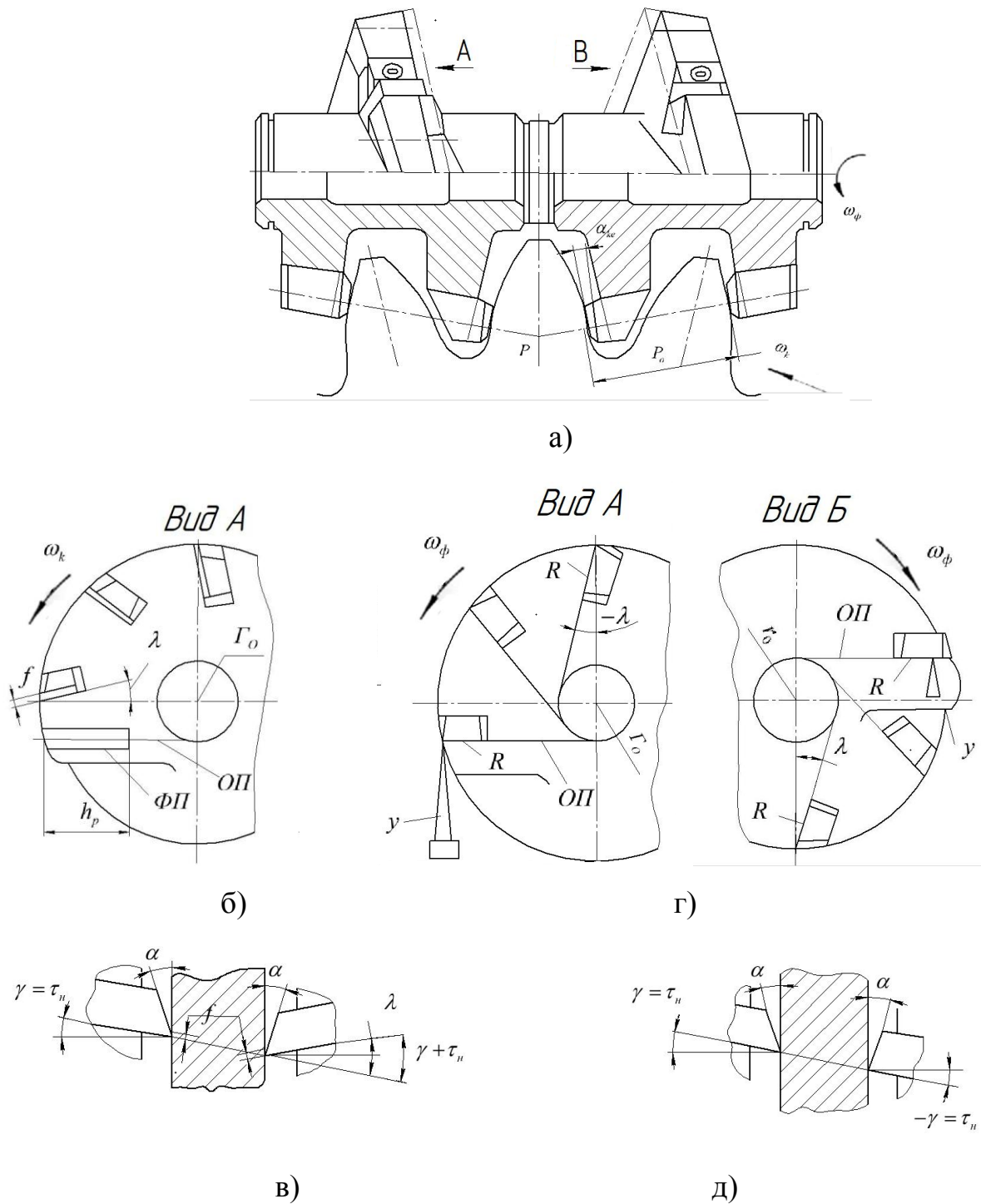


Рисунок 3.7 – Профілювання черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення на основі евольвентного черв'яка: а - схема оброблення зубів колеса корпусами фрези; б - розташування зубів фрези з гвинтовою стрічкою; в - геометрія різальної частини фрези за наявності гвинтової стрічки; г - розташування зубів фрези в площинах, дотичних до основного циліндра; д - геометрія різальної частини фрези без гвинтової стрічки

Переваги другого варіанту наступні. Спрощується фрезерування пазів під зуби, адже в обох корпусах пази розташовані в площинах, паралельних осі фрези та зміщених від неї на відстані r_0 . Різальні кромки зубів прямолінійні та гострі, без гвинтової стрічки, що підвищує стійкість інструменту та знижує шорсткість обробки. Заточування фрези здійснюється на заднім гранях зубів на спеціальному заточувальному верстаті-напівавтоматі моделі ВЗ-142. Для заточування та переточування фрези потрібна лише одна операція [12, 14, 107].

До недоліків другого варіанту слід віднести наявність від'ємного переднього кута (рис.3.7, д) зубів правого корпусу фрези в межах $\gamma = -4^\circ + -7^\circ$ і від'ємного кута нахилу головної різальної кромки зубів лівого корпусу.

На практиці відомі конструкції чорнових черв'ячних фрез із прямими стружковими канавками (загострені фрези ВНИИ), у яких праві бічні кромки зубів також працюють з від'ємними негативними передніми кутами, і це не має істотного впливу на стійкість фрези і шорсткість обробленої поверхні. Тому для чистого зубофрезерування фреза з такою геометрією різальної частини цілком підходить.

Таким чином, обидва варіанти виконання евольвентної фрези з роздільною схемою формоутворення здійсненні, з них слід віддати перевагу другому, адже він є більш технологічним і підвищує якісні показники, як фрези, так і оброблюваної поверхні зубів колеса.

3.4 Способи зубофрезерування великомодульних шевронних зубчастих колес

Для попереднього шліфування зубів або остаточного лезового оброблення великомодульних шевронних зубчастих коліс модулем $m = 12-30$ мм, загартованих HRC 45... 65 розроблені, виготовлені та впроваджені перспективні конструкції черв'ячних твердосплавних фрез. Для експлуатації кожного з конструктивних рішень черв'ячних твердосплавних фрез

розроблено регламент їх експлуатації [12, 116, 107].

Особливість проектування спеціальних черв'ячних фрези полягає в тому, що в якості палюди верстатного зачеплення інструмента та деталі використовується окружність (рис. 3.8.), що проходить через нижні граничні точки евольвенти B і $B1$. При цьому активні ділянки ліній зачеплення BE і $B1E1$ розташовуються симетрично відносно до міжосьового перпендикуляру та на певній відстані від нього. [39, 62].

Кут профілю зубів спеціальної фрези α_k залежить від кількості зубів оброблюваного колеса Z_k та визначається за залежністю:

$$\alpha_k = \alpha_e - \sigma_e, \quad (3.5)$$

де α_e – кут тиску у крайній нижній точці B евольвенти; σ_e – половина кутової товщини зуба по нижніх граничних точках B і $B1$ евольвенти.

У діапазоні нарізованих зубів колеса $Z_k = 20 \dots 400$ кут профілю зубів спеціальних фрез змінюється в межах $\alpha_k = 5^\circ - 19^\circ$.

Кожною з фрез можна нарізати зуби у визначеному діапазоні кількості зубів: $Z_k = 33-49$, $Z_k = 46 \dots 66$, $Z_k = 60 \dots 88$, $Z_k = 88 \dots 134$, $Z_k = 134 \dots 204$. Технологічне устанавлення фрез досягається шляхом розгорнення одного корпусу фрези відносно іншого на визначений розрахунковий кут і зміною товщини дистанційного кільця, що закладається між корпусів. У кожному з корпусів фрези виконується декілька плішкових пазів [39, 141].

На рис. 3.9. приведені залежності кута профілю зубів спеціальної фрези α_k від кількості зубів оброблюваних колес Z_k та коефіцієнту зміщення вихідного контуру зубчастої рейки X , а також діапазон нарізованих зубів [12, 97, 105].

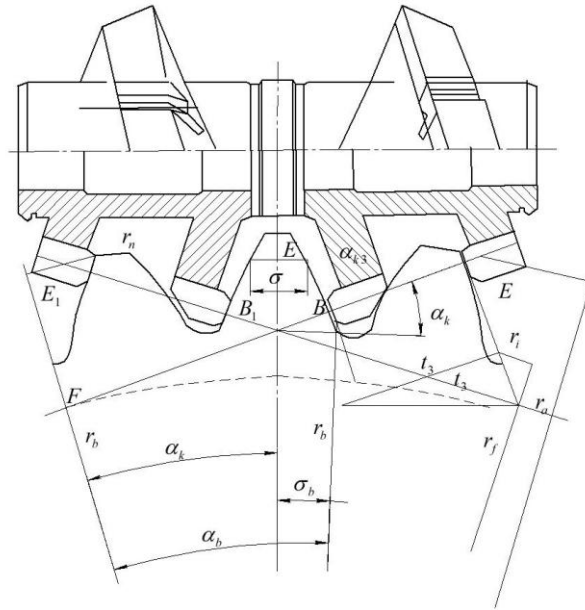


Рисунок 3.8. – Схема верстатного зачеплення спеціальної твердосплавної фрези з оброблюваним колесом

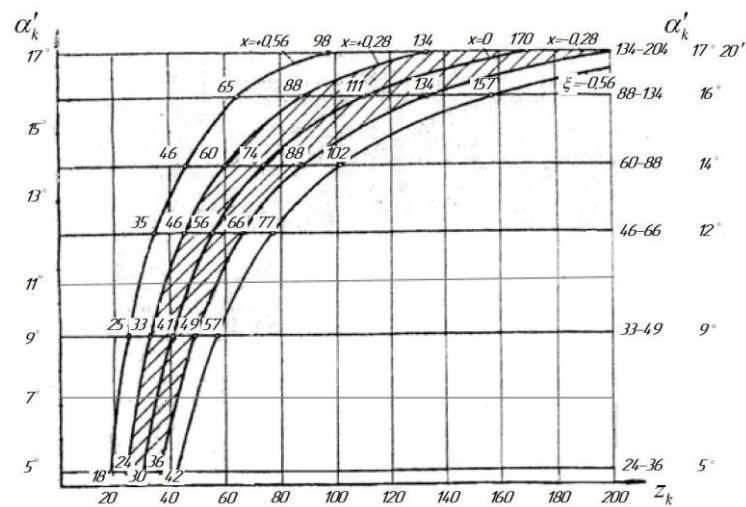


Рисунок 3.9 – Графік для визначення застосування спеціальних твердосплавних фрез

Сферу застосування фрез пояснює рис. 3.10. Зубчасті некориговані колеса з кількістю зубів 33...49 можуть бути нарізаними фрезою з кутом профілю $\alpha_k = 9^\circ$ і установленням корпусів фрези з повертанням на кут θ .

$$\theta = 2Z_K\beta_K, \quad (3.6)$$

де Z_K – кількість зубів нарізованого колеса;

$$\beta_K = \alpha_K - \alpha'_K, \quad (3.7)$$

де α'_K – визначається з графіка (рис. 3.9).

Для коригованих коліс діапазон кількостей нарізованих зубів збільшується: при $X = +0,56$, застосовуючи фрезу с $\alpha_K = 9^\circ$, нарізають зубчасті колеса з кількістю зубів 25, а при $X = -0,56$ нарізають зубчасті колеса з кількістю зубів 57.

Фрези з заданим кутом α_K можна використовувати для нарізування коліс з іншою кількістю зубів, якщо вісь зуба колеса відхиляється від осі верстата (рис. 3.10, а, б) на кут β_K , а S_ϕ – відстань між корпусами перераховується. При позитивному β_K правий корпус фрези обертається відносно лівого за годинниковою стрілкою під кутом θ , якщо дивитися з боку правого корпусу фрези (рис. 3.10, с). При від'ємному β_K правий корпус різача обертається проти годинникової стрілки і в такому положенні обидва корпуси фіксуються на оправці.

Розгорнення корпусів фрез на кут θ здійснюється шляхом суміщення відповідних плішкових пазів у корпусах.

При установленні на верстаті корпуси фрез, які знаходяться на оправці, суміщують першими зубами в одній площині і установлюють на відстані S_ϕ , яка визначається конусовим шаблоном (рис. 3.10, а). Виміряють внутрішню відстань між тірцями обох корпусів фрези і підбирають по ньому дистанційне кільце. Потім установлюють корпуси фрези на відповідні шпонкові пази та закріплюють їх на оправці. Фрезу з оправкою установлюють до супорту верстата з подальшим налаштуванням відносно осі зуба колеса.

Перевага розглянутих конструкцій спеціальних черв'ячних фрез полягає в тому, що вони одночасно обома корпусами обробляють обидві

сторони зубів колеса. Зусилля різання від обох корпусів спрямовані один на одного, тобто всередині інструменту має місце силове замикання. Це сприяє зменшенню вібрацій та коливань столу верстата разом з колесом, що оброблюється.

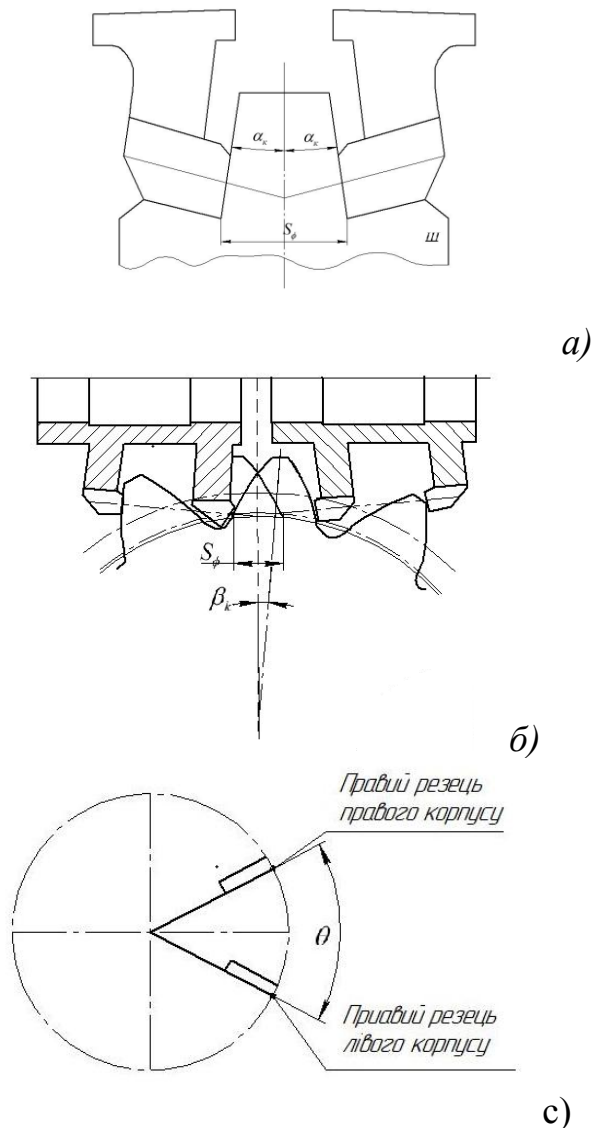


Рисунок 3.10 – Установлення та налагодження фрези

a – шаблон для установлення корпусів; $б$ – поворот колеса на кут β_k ;
 $с$ – розгорнення корпусів фрези на кут θ .

Найбільш раціональною сферою використання розглянутих спеціальних фрез є серійне і та великосерійне виробництво зубчастих коліс, які, наприклад, використовуються у вугільнорозмельних і рудорозмельних

млинах, екскаваторах, прокатних станах, підйомних механізмах [13, 15, 108].

На рис. 3.11 представлена спеціальна черв'ячна фреза $m = 20$ мм. Фреза складається з двох корпусів, розділених дистанційним кільцем з конічними витками нарізки одного напрямку.



Рисунок 3.11 – Спеціальна черв'ячна твердосплавна двохкорпусна фреза
 $m=20$ мм, ($\alpha_u=9^\circ$; $Z_k=25\dots57$)

Розробці технології попередньої обробки загартованих зубчастих коліс із припуском під зубошліфування черв'ячними фрезами, оснащеними непереточуваними поворотними пластинками, передувала розробка та моделювання процесу формоутворення за допомогою універсальних фрез $m = 12\dots36$ мм одностороннього та двостороннього різання (рис. 3.11), оснащених пластинками зі сплавів ВК10-ОМ; ВК10-ХОМ [62, 76]. Фрези одностороннього різання складаються з двох корпусів: лівого та правого з конічною гвинтовим нарізуванням одного напрямку. На бічних поверхнях витків у тангенціальних пазах встановлені твердосплавні непереточувані поворотні пластинки зі сплавів установлюють з розмірами $20 \times 16 \times 6$ мм, які закріплюються в гніздах ексцентриковими гвинтами.

Твердосплавні різальні елементи розміщуються тільки по лініях верстатного зачеплення інструменту та заготовки, що робить таку фрезу більш економічною порівняно з відомим, ніж відомі конструкціями аналогічних інструментів.

Принципова відмінність фрез у порівнянні з відомими зарубіжних конструкціями (великомодульні фрези фірми «Азумі», Японія, фірми «Fette»,

ФРН [118, 126]) полягає в тому, що при збільшеній в 1,5-2 рази кількості зубів по довжині одного витка нарізання вищевказані розміри твердосплавних пластинок є однаковими для усього діапазону модулів $m = 10 \dots 65$. Таке, вперше запропоноване, конструктивне рішення скорочує витрату твердого сплаву при виготовленні інструменту в 2-5 разів, але, головне, значно покращується процес різання з підвищенням стійкості різальних пластин.

Технологічним недоліком спеціальних твердосплавних фрез є неможливість оброблення одним і тим же інструментом зубчастих коліс, які істотно відрізняються один від одного кількістю зубів. Між тим, в практиці важкого машинобудування достатньо широко використовуються передачі, що використовують малозубу шестерню, наприклад, $z_k = 12 \div 40$ і багатозубе колесо, наприклад, $z_k = 180 \div 316$. Це зубчасті передачі вугільнорозмельних і рудорозмельних млинів, екскаваторів тощо.

При обробці таких коліс різними черв'ячними фрезами не буде забезпечена ідентичність основного кроку і профілю зубів, що, безсумнівно, вплине на якість зачеплення і довговічність зубчастої передачі. Особливо важливою для якості зачеплення стає оброблення одним і тим же інструментом пари, що сполучується, загартованих ($HRC_3 > 45$) зубчастих коліс, експлуатаційне припрацювання яких практично є неможливим.

З метою підвищення точності зачеплення, переважно загартованих, зубчастих коліс, що сполучуються, з різною кількістю зубів, а також для скорочення номенклатури використовуваного інструменту розроблено конструкцію універсальних великомодульних твердосплавних черв'ячних фрез $m = 10-65$ мм. В якості палюїди верстатного зачеплення таких фрез з оброблюваним колесом використовується ділильне коло колеса, а кут профілю зубів інструментів дорівнює $\alpha_u = 20^\circ$.

Двокорпусна конструкція фрез одностороннього різання призначена для оброблення зубів коліс за два проходи [66, 114]. Фреза (рис. 3.12) складається з лівого і правого корпусів з конічною гвинтовою нарізкою

одного напрямку в пазах якої монтуються твердосплавні непереточувані поворотні пластинки. Згідно з технологією зубооброблювання, розробленою для цієї конструкції [12, 15], кожний із корпусів фрези встановлюється окремо на зубофрезерній оправці зі зміщенням відносно міжосьового перпендикуляру $00'$ пари «інструмент-деталь» на відстань l_y (рис.3.12, а, б), визначену точкою В (В') перетинання окружності нижньої граничної точки евольвенти зубів і лінії верстатного зачеплення ВЕ (В' Е'). Установлювальна відстань не залежить від кількості зубів оброблюваного колеса. Величина l_y (рис. 3.11) визначається профільним кутом вихідного контуру зубчастої рейки α_0 , висотою ніжки зуба h_f та радіусом закруглення головки зуба інструмента для попереднього нарізування r_{δ} . Ці параметри залежать тільки від модуля і коефіцієнта зміщення вихідного контуру зубчастої рейки.

Установлювальна відстань визначається за формулою:

$$l_{\delta} = \frac{h_f - xm - r_{\delta} \cdot 1 - \sin \alpha_0}{\operatorname{tg} \alpha_0}, \quad (3.8)$$

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

Для коліс з вихідним контуром зубчастої рейки згідно з ГОСТ 13755-81, де $\alpha_u=20^\circ$, $h=1,25 \cdot m$ та при $r_{\delta}=0,3 \cdot m$, формула (3.8.) спрощується та є наступною:

$$l_{\delta} = \frac{m \cdot 1,052 - x}{0,36397}, \quad (3.9)$$

Таким чином, по черзі встановлюючи зі зміщенням на зуборізальній оправці кожний із корпусів, однією фрезою можна обробляти за два проходи зубчасті колеса з будь-якою кількістю зубів. Зміщення корпусу фрези з міжосьового перпендикуляру на розрахункову відстань l_y здійснюється за

допомогою спеціального шаблону, що встановлюється в центрошукач верстату, який розміщується на фрезерній голівці у вісі обертання столу верстата.

Для зручності практичного визначення на рис. 3.13 представлено графік залежності установлюваної відстані l_y від модуля нарізаних зубів колеса і коефіцієнту зміщення первинного контуру зубчастої рейки x . При значеннях коефіцієнта зміщення первинного контуру $x > 1,0$ величина установлюваної відстані l_y , розрахованої по (3.8) і (3.9), може набути від'ємного значення. Це означає, що при установленні інструмент необхідно переміщувати на верстаті так, щоб його перший зуб із найбільшим радіусом обертання не перетинав міжосьовий перпендикуляр [39, 67].

Практично установлення інструменту на розрахункову відстань l_y не вимагає високої точності і може бути здійснене або за допомогою спеціального шаблону, або з використанням лінійки, що встановлена на верстаті.

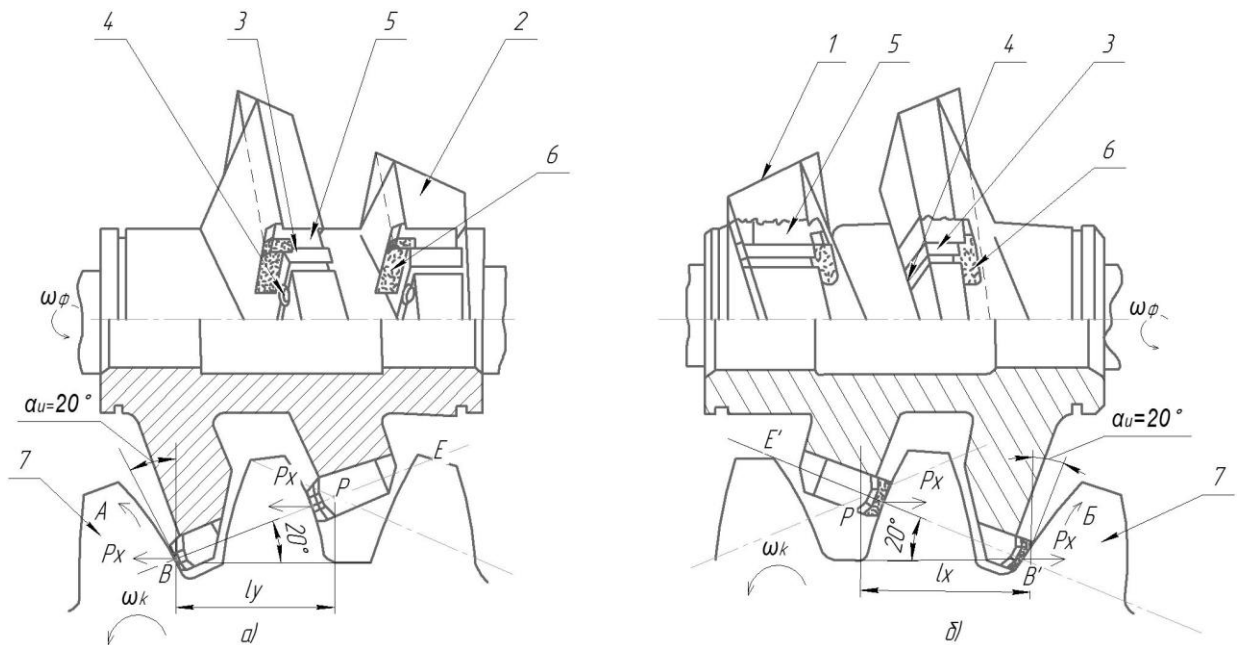


Рисунок 3.12 – Двокорпусна універсальна фреза одностороннього різання:

a – правий корпус; b – лівий корпус

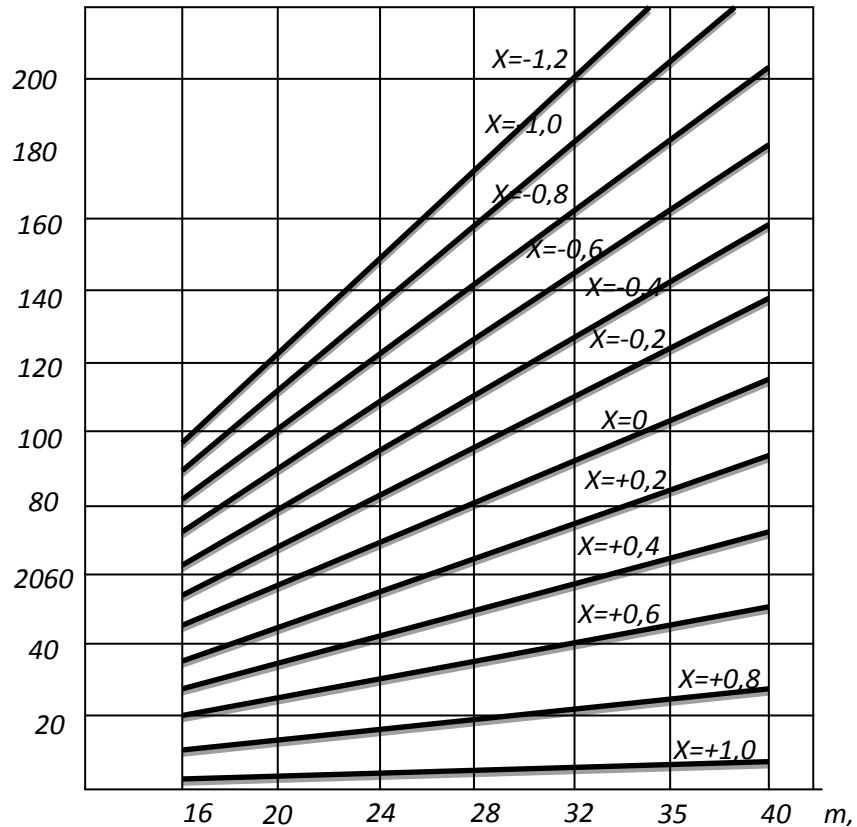


Рисунок 3.13 – Графік для визначення установлюваної відстані l_y

Аналіз схем різання та кінематики зубооброблення універсальними двокорпусними фрезами [101,107] показує, що коли працює правий корпус (рис. 3.11, а), осьові сили різання P_x збігаються з напрямком обертання оброблюваного колеса ω_k (з напрямком обертання ділильного черв'ячного колеса верстата), а знімання припуску відбувається послідовно від основи зуба до його вершини (стрілка Б).

У разі збігу напрямків дії P_x і ω_k осьова сила прагне «відокремити» зуби розділового черв'ячного колеса від витків розділового черв'яка, і це може призвести до порушення гладкості роботи розділової черв'ячної пари верстату, коливанням оброблюваного колеса і зниженню якості його обробки.

У разі збігу напрямків дії P_x и ω_k осьова сила прагне «відокремити» зуби ділильного черв'ячного колеса від витків ділильного черв'яка, а це може призвести до порушення плавності роботи ділильної черв'ячної пари

верстату, коливань оброблюваного колеса та зниженню якості його обробки.

При зніманні припуску в напрямку стрілки Б (рис. 5, б) ширина шарів, що зрізані зубами лівого корпусу, хоч і не перевищує номінальну довжину ріжучої кромки 20 мм, але все ж в 2 - 2,5 рази більше, ніж у зубів правого корпусу [62,67].

Для забезпечення однакових умов оброблення як за динамікою різання, так і за схемою зрізання припуску, корпуси фрези можна виконати з гвинтовою нарізкою різних напрямків. Наприклад: лівий корпус фрези має праву гвинтову нарізь, а правий корпус - ліву. У цьому випадку в процесі оброблювання осьові складові сили різання спрямовані назустріч обертанню колеса ω_k , а знімання припуску обома корпусами йде в одному й тому ж напрямку за стрілкою А - від основи зуба до його вершини.

Для підвищення економічності використанні інструменту, обробку обох бічних поверхонь зубів колеса можна здійснювати тільки одним, наприклад, правим корпусом фрези, по черзі зміщуючи його вліво та вправо на зуборізальній оправці. У цьому випадку (рис. 3.14) при обробці лівих бічних поверхонь є необхідним реверс напрямку обертання інструменту ω_f та колеса ω_k , а обробка здійснюється при попутному фрезеруванні [39, 101].

На рис. 3.15 показане попереднє перед зубошліфуванням лезове оброблення леза загартованого зубчастого колеса $m=28$ мм; $z_k=49$; $b=390$ мм; $\beta_d=27^\circ 26'$, сталь 20ХН3А; $HRC \geq 55$. Зубофрезерування здійснюється черв'ячними твердосплавними фрезами без використання змащувально-охолоджувальних рідин. Напрямок фрезерування є зустрічним. Режими різання при обробленні загартованих зубів наступні: глибина різання $t=0,5 - 0,8$ мм за один прохід; подача фрези $S=1.5 - 3$ мм/об; частота обертання фрези $n=10-20$ хв⁻¹; швидкість різання $V=10-20$ м/хв.

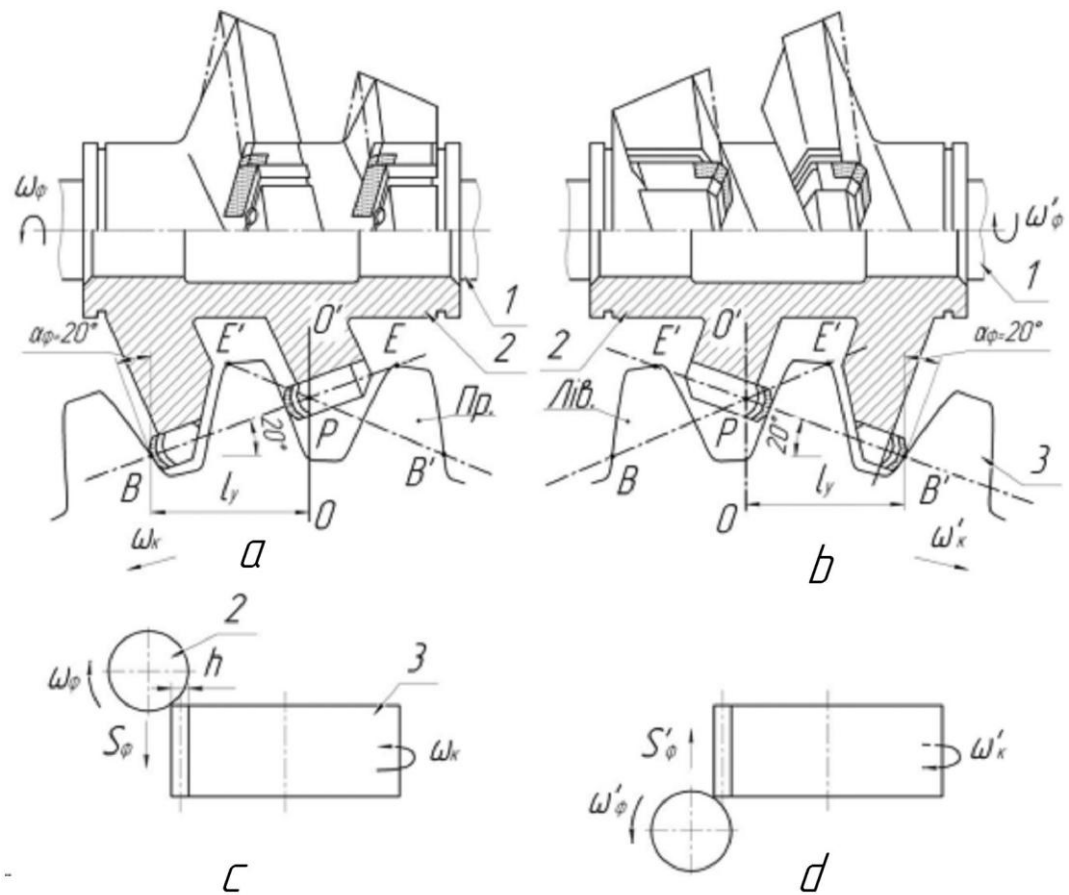


Рисунок 3.14 – Схема оброблення зубів колеса одним правим корпусом фрези: *a, c* – правий корпус при зустрічному фрезеруванні; *b, d* - правий корпус при попутному фрезеруванні з реверсивним напрямком обертання фрези та нарізованого зубчастого колеса

Застосування розроблених схем попереднього лезового оброблення зубів загартованих коліс твердосплавними фрезами дозволяє зменшити трудомісткість малопродуктивних зубошліфувальних операцій, в залежності від модуля колеса, в 3 - 4 рази за рахунок зменшення припуску з 1,5 - 2,5 мм на бік зуба до 0,3 - 0,5 мм, а також, за рахунок зниження витрат твердосплавних пластин, дозволяє забезпечити економічність процесу зубооброблення.

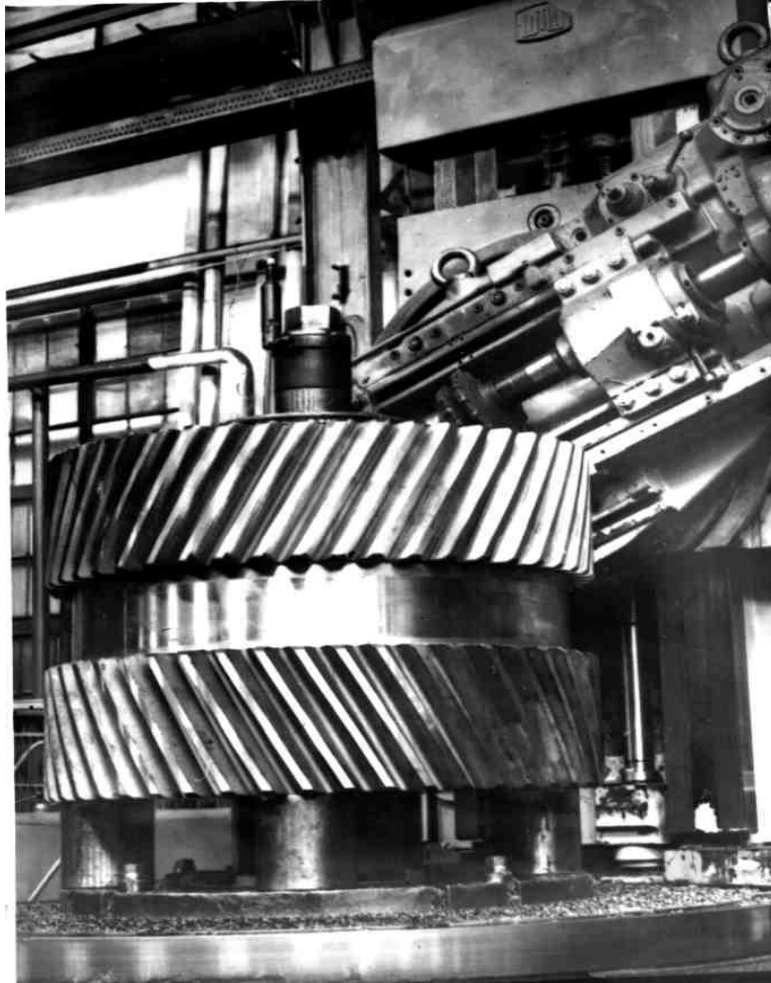


Рисунок 3.15 – Попереднє лезове оброблення перед зубошліфуванням загартованого шевронного зубчастого колеса $m=28\text{мм}$; $z_k=49$; $\beta_d=27^\circ 26'$; $b=390\text{ мм}$; сталь 20ХН3А, $\text{HRC}\geq 55$

3.5. Моделювання процесу зубонарізання великомодульних коліс з загартованої сталі методом скінчених елементів

Метою моделювання було дослідження напружено-деформованого стану леза фрези, силових параметрів процесу обробки, зміни крутного моменту фрези в процесі зубонарізання великомодульних коліс з загартованої сталі твердістю HRC 53 (закордонний аналог– сталь AISI52100) інструментами з твердого сплаву ВК8. При моделюванні застосовувався багатоцільовий кінцево-елементний розрахунковий пакет DEFORM-3D.

Табл. 3.4 - Вихідні дані для моделювання

$t, \text{мм}$	$Z_{\text{фрези}}$	Матеріал колеса	Ріжуча пластина	β^0	HRC	$\Psi_{ск}$
10	8	20ХН3А	ВК8ОМ	15^0	50...52	15^0-65^0
Режими різання Товщина зрізуваного шару: a_i змінюється від 0 до 0,15 мм Подача фрези $S_o = 0,8 \text{ мм/об}$ $S_o = 1,9 \text{ мм/об}$ Швидкість різання: $V = 150 \text{ м/хв}$						

Серед вихідних даних для процесу моделювання одними з найбільш важливих є дані про механічні властивості оброблюваного матеріалу, тобто показники зв'язку між деформаціями і напруженнями при деформації тіла. Ці властивості описуються визначальним рівнянням і рівнянням стану.

При моделюванні процесів деформації матеріалу необхідно враховувати вплив умов в зоні різання на його механічні характеристики. В даний час, при моделюванні методом кінцевих елементів набула поширення загальновідома модель Джонсона-Кука [10], що описує поведінку матеріалу, що деформується:

$$\sigma_s = \left(A + B \cdot (\varepsilon^p)^n \right) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varepsilon}^p) \cdot \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (3.10)$$

де σ_s – поточна величина межі плинності; ε^p – величина інтенсивності пластичних деформацій; $\dot{\varepsilon}^p$ – інтенсивність швидкості пластичних деформацій; T , T_m , T_r – поточна температура, температура плавлення і температур навколишнього середовища відповідно; A , B , C , n , m – емпіричні коефіцієнти. Емпіричні коефіцієнти моделі $A = 972$, $B = -219$, $C = 0,133$, $n =$

0,186, $m = 1,1$. Графічне відображення залежності межі міцності від ступеня деформації зображено на графіку (рис. 3.16).

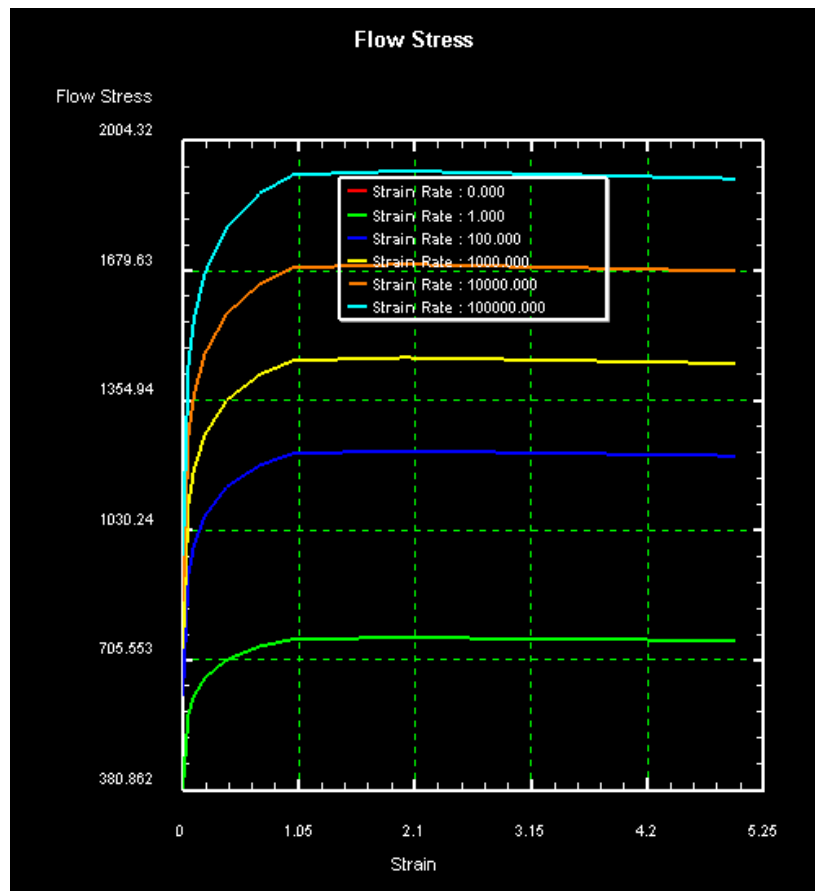


Рисунок 3.16 – Вплив величини ефективної деформації на межу міцності оброблюваного матеріалу

Граничні умови. При вирішенні пов'язаної термомеханічної завдання граничні умови склалися в жорсткому закріпленні опорної поверхні заготовки і переміщенні пружної моделі інструменту уздовж осі Y заготовки з постійною швидкістю v_s вертикальної подачі, модель фрези при цьому обертається навколо осі X , забезпечуючи швидкість різання v м/с, товщина зрізу змінюється при врізанні зуба фрези від 0 до 15 мкм. Моделі черв'ячної фрези та нарізуваного колеса представлено на рис. 3.17

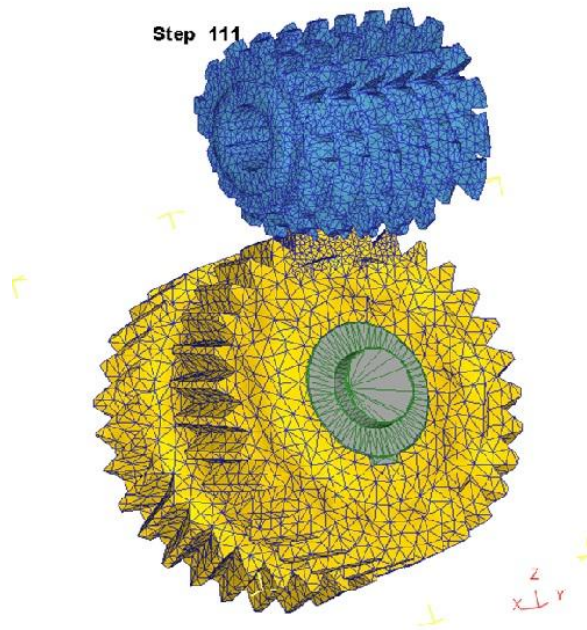


Рисунок 3.17 – Зовнішній вигляд та розбивка 3D на елементи моделей різального інструменту та заготовки

Механічні і теплофізичні характеристики матеріалів інструменту і заготовки представлені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5. – Теплофізичні властивості матеріалів

Матеріал	$T_{пл},$ °C	$C_m,$ Дж/кг·К	$\lambda,$ Вт/м·К	$E,$ ГПа	ν	$\rho, \text{кг/м}^3$
ВК8	—	480	50	600	0,2	14800
AISI52100	1480	642	40	204	0,3	7800

Контактні параметри моделі. Deform 3D має декілька опцій для опису тертя на контактних поверхнях.

- 1) Питома сила тертя (тангенційні напруження) є постійною і дорівнює $f_s = k \cdot m$, де k – межа плинності матеріалу на зсув, m –

довільний коефіцієнт, для врахування інтенсивності фікційної взаємодії. Даний вираз використовується, коли на контактуючих поверхнях має місце пластичний режим тертя (внутрішнє тертя).

2) Зовнішнє тертя за Кулоном: $f_s = \mu \cdot p$ (p – тиск)

3) Комбінована модель: $f_s = \min(\mu \cdot p, k \cdot m)$.

В загальному випадку при опису процесу різання остання модель найбільш наближена до реальності, але в пропонованій серії чисельних експериментів використовувалась залежність: $f_s = \mu \cdot p$, що пов'язано з необхідністю порівняння результатів розрахунку та експериментальних даних, а також оцінкою впливу на контактні характеристики моделі (температура різання, ступінь деформації оброблюваного матеріалу, напружень в зоні зсуву) коефіцієнту тертя, як окремого фактора, трактуючи його в якості усередненої величини коефіцієнтів внутрішнього та зовнішнього тертя на ділянках пластичного та пружного контакту. Величину середнього коефіцієнту тертя при цьому приймемо рівною 0,4.

Стійкість черв'ячної фрези і величини похибок при зубофрезерування, великою мірою залежать від жорсткості верстата, на якому проводиться обробка. Тому при прогнозуванні стійкості фрези, необхідно враховувати крутний момент, створюваний силами різання в торцевій площині колеса. Значна зміна крутного моменту позитивно позначиться на вібраційних характеристиках системи верстат-приспособлення-інструмент-деталь, і як наслідок, - на точності обробки зубчатого колеса. Діаграма залежності крутного моменту на фрезі (рис. 3.18) демонструє поступове зростання навантаження у початковий період процесу різання що супроводжується врізанням зубів фрези та збільшенням кількості одночасно працюючих зубців інструменту. При типовій схемі використання інструменту за перші 2 секунди $M_{кр}$ зростає до величини близько 250 - 260 Н·м з подальшою стабілізацією цього значення у період, на протязі якого активною є один зуб фрези, а

товщина зрізу, що визначає навантаження на інструмент, залишається постійною. Зі збільшенням периметру активних ділянок відбувається дискретне зростання крутного моменту до величини $M_{кр} = 780 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Ефективні (еквівалентні за Мізесом) напруження, що виникають в оброблюваному матеріалі, згідно результатів моделювання складають 0,80-0,975 ГПа. Відносно низькі величини даного показника пояснюються оптимальними величинами геометричних параметрів леза фрези: нульовим переднім кутом та кутом нахилу різальної кромки 7° що збільшує кут зсуву в зоні в зоні первинних деформацій, зменшуючи величину деформацій та напруження в оброблюваному матеріалі.

Характерні величини ефективної деформації оброблюваного матеріалу в зоні різання при обробці заготовки колеса з загартованої сталі, отримані при моделюванні процесу врізання леза фрези в заготовку, демонструють досить низькі значення ефективної деформації – до 1. При цьому за рахунок великої довжини активної різальної кромки (периметру контакту) загальна величина окружної сили досягає високих значень до 4,3 – 9,3 кН, які визначають величину крутного моменту на фрезі.

З метою більш детального аналізу напружено-деформованого стану оброблюваного матеріалу та інструменту при обробці зубчатих колес з загартованої сталі проведено 2-D моделювання процесу контактної взаємодії на рівні лезо-поверхневий шар заготовки.

Початок різання при фрезеруванні починається при $a > 0,31\rho$. Ковзання відбувається на певному куті ковзання $\psi_{ск}$ до тих пір, поки пластичні деформації не перейдуть від мікрорізання безпосередньо до різання, тобто коли товщина зрізу не досягне певного значення глибини, відносно проникнення ріжучого інструменту з радіусом округлення різальної кромки.

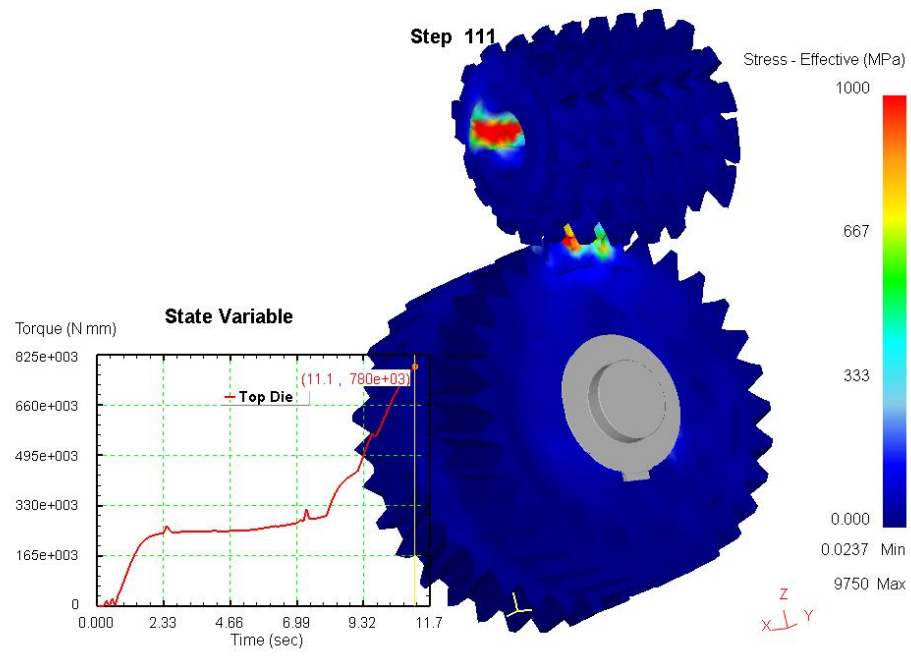


Рисунок 3.18 - Тривимірна модель процесу зубофрезерування: зміна крутного моменту на фрезі та напружень в оброблюваному матеріалі

Особливості контактування інструмента з оброблюваним матеріалом обумовлюють локальне зростання контактних навантажень. Вказана особливість реалізована в розробленій моделі за рахунок поступового наростання глибини різання при русі леза по дуговій траєкторії (рис.3.19). Максимальна глибина різання при русі леза по дузі відповідає величині ρ (на рисунку у збільшеному масштабі).

Геометричні параметри моделі леза: розміри $0,1 \times 0,1$ мм, радіус округлення $\rho = 0,1$ мм, передній кут $\gamma = 0^\circ$, задній кут $\alpha = 10^\circ$. Характерний розмір елементів в зоні контакту $0,0016$ мм, крок $DT_{\max}$ при розрахунках, що визначає умову перебудови скінченної сітки моделі становить від $1,5e-6$ до $2e-7$ с. Умови моделювання приведені в таблиці 3.6.

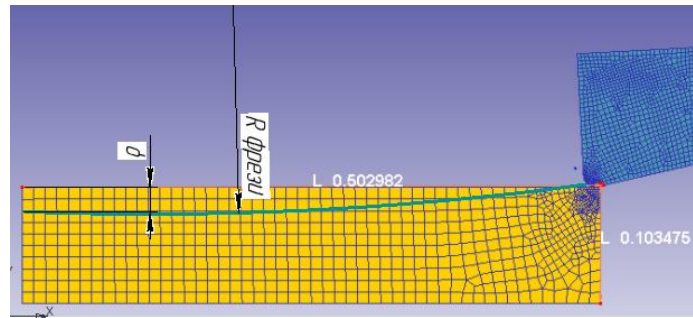


Рисунок 3.19 - Схема руху леза при моделюванні врізання фрези

На рис. 3.20 та 3.21 зображені етапи занурення різця в оброблюваний матеріал: пружна взаємодія (ковзання) та пластична деформація зі зминанням оброблюваного матеріалу та переміщенням його під задню поверхню леза і мікрорізання з утворенням стружки для випадках коли різець має значний (50 мкм) та малий (10 мкм) радіус округлення різальної кромки (коефіцієнт тертя дорівнює 0,4 при швидкості різання 30 м/хв). Аналіз розподілу напружень демонструє, що максимальні їх значення на початковому етапі різання знаходяться на задній поверхні різця на привершинній її ділянці.

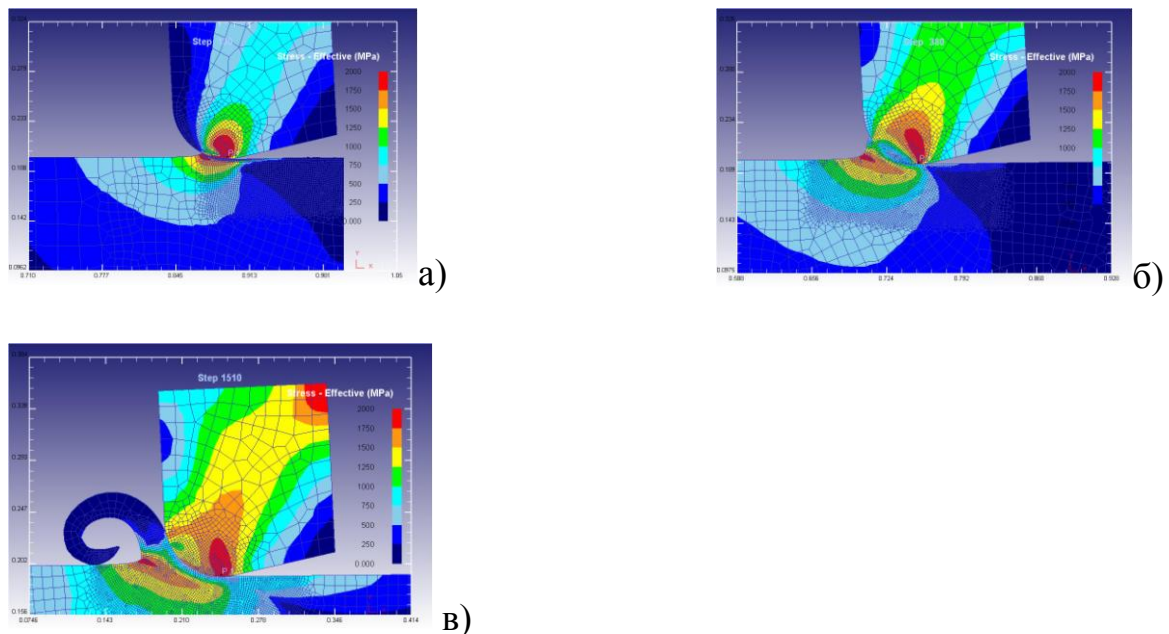
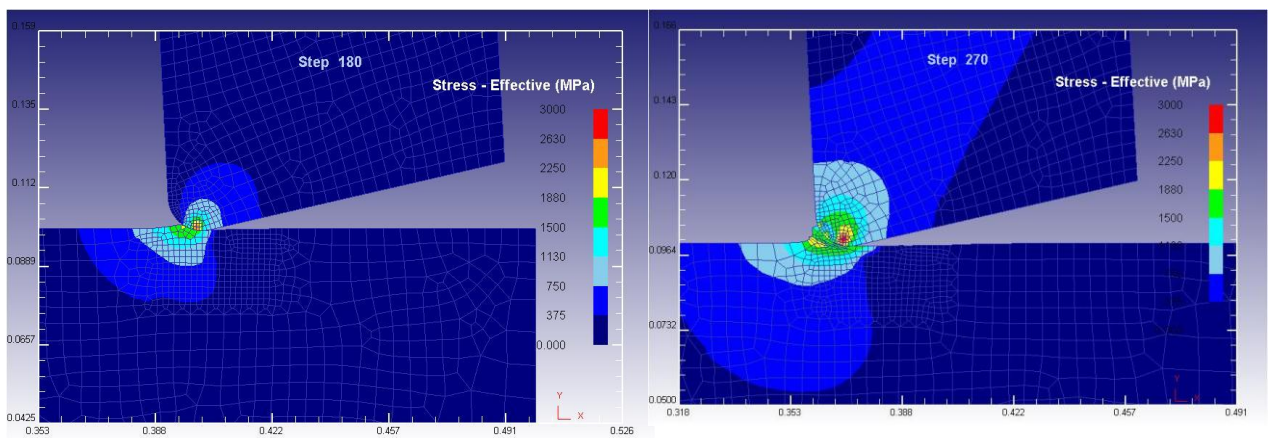


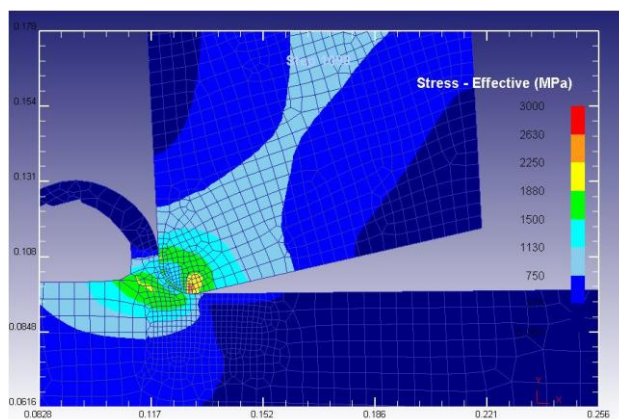
Рисунок 3.20 – Етапи врізання інструменту з великим радіусом округлення різальної кромки: а) – ковзання та пластичне підминання оброблюваного матеріалу; б) – початок утворення стружки; в) – мікрорізання; ($\rho = 50$ мкм, $v = 75$ м/хв, $f = 0,45$)

Серед особливостей обробки інструментом з $\rho = 50$ мкм є довжина l_p відрізка пластичного підминання оброблюваного матеріалу до початку мікрорізання: для такого інструменту в умовах модельного експерименту ця характеристика складає 0,22 мм, для порівняння при $\rho = 10$ мкм $l_p = 0,13$ мм. Ступінь деформації після початку мікрорізання в поверхневих шарах обробленої поверхні становить 6,7-7 та 2,9-3,2 для інструментів з $\rho = 50$ та 10 мкм відповідно, а напруження в зоні зсуву суттєво більші для меншого радіусу 1850-1970 МПа та 1600-1800 МПа відповідно.



а)

б)



в)

Рисунок 3.21 – Етапи врізання інструменту: а) – ковзання та пластичне підминання оброблюваного матеріалу; б) – початок утворення стружки; в) – мікрорізання; ($\rho = 10$ мкм, $v = 75$ м/хв, $f = 0,45$)

Аналіз діаграми сил різання на рис. 3.22 демонструє наявність пікових навантажень у початковий період врізання інструменту в оброблюваний матеріал. Для меншого радіусу пікові навантаження будуть мати більші відносно середнього значення сили різання величини, що при малій площині контакту на початку врізання буде призводити до наростання контактних напружень.

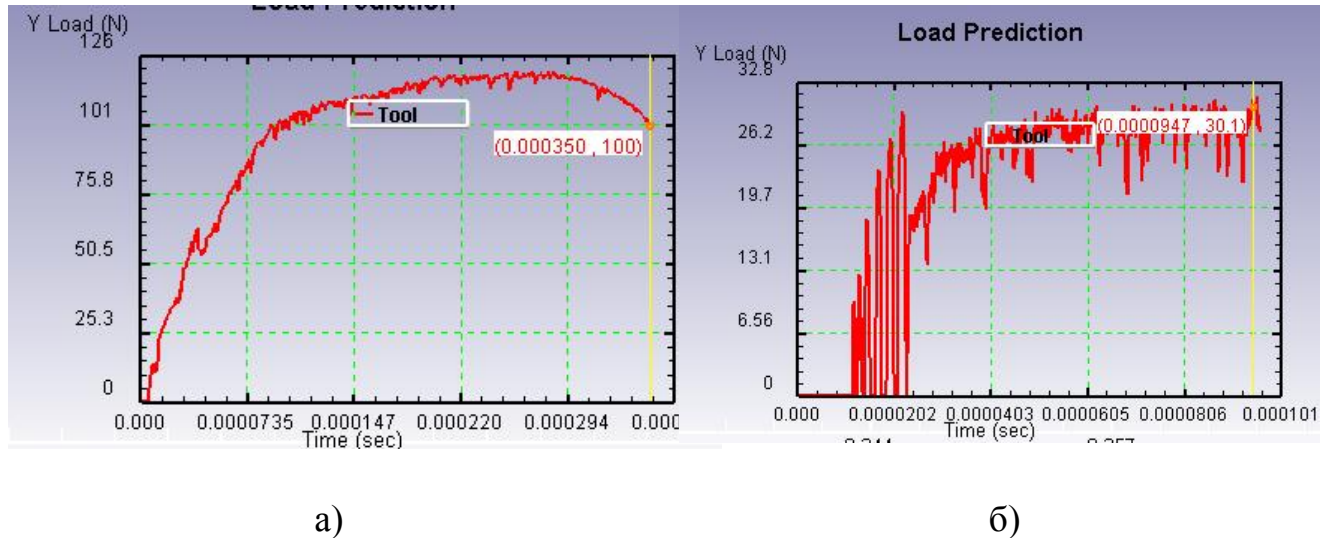


Рисунок 3.22 – Розраховані величини складової сили різання P_y :

а) $\rho = 50$ мкм ; б) $\rho = 10$ мкм

Оцінимо вплив даного фактору а також коефіцієнту тертя та швидкості різання на еквівалентні напруження в різальному клині з метою оцінки міцності різального інструменту в умовах даного експерименту. Чисельний експеримент виконувався у відповідності з планом типу 3^{k-p} – реплікою плану, що дозволяє отримати нелінійну залежність другого порядку для поверхні відгуку оптимізованого параметру. Умови різання представлені в таблиці 3.6. Методика реалізації чисельного експерименту, статистичної обробки даних та таблиця плану експерименту наведені в додатку Б.

Таблиця 3.6 – Умови 2-D моделювання

Коеф. тертя f	Радіус фрези, г, мм	Швидкість різання, м/хв	Радіус округлення, мкм
0,1 0,45 0,8	120	30 75 120	10 30 50

Тверді сплави відносяться до крихких матеріалів, тому для оцінки рівня напружень з метою порівняння їх з критерієм руйнування інструментального матеріалу (межою міцності на розтяг) необхідно використати еквівалентні напруження. При розрахунках еквівалентних напружень скористаємося виразом, запропонованим Писаренком та Лебедєвим:

$$\sigma_{eq} = \chi \cdot \sigma_{ef} + (1 - \chi) \cdot \sigma_1 \leq R_m \quad (3.11)$$

параметр χ , що характеризує властивість матеріалу по-різному чинити опір навантаженням, що стискають та розтягують, визначається як

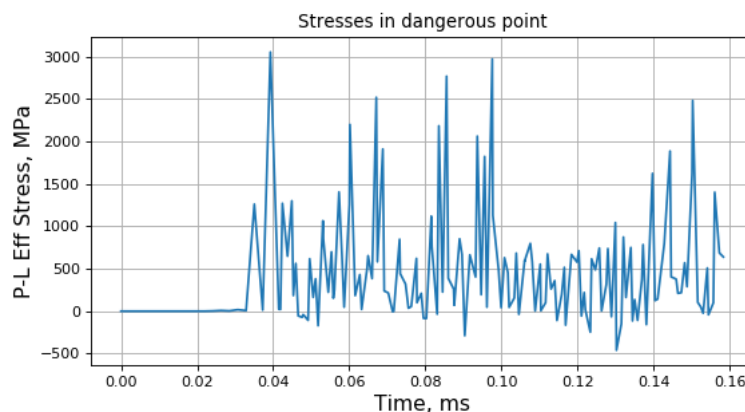
$$\chi = \frac{R_m}{R_{cm}} \quad (3.12)$$

Для твердого сплаву марки ВК8 $\chi = 0,38$, границі міцності при розтягуванні та стиску дорівнюють 1480-1600 та 3900-4200 МПа, відповідно.

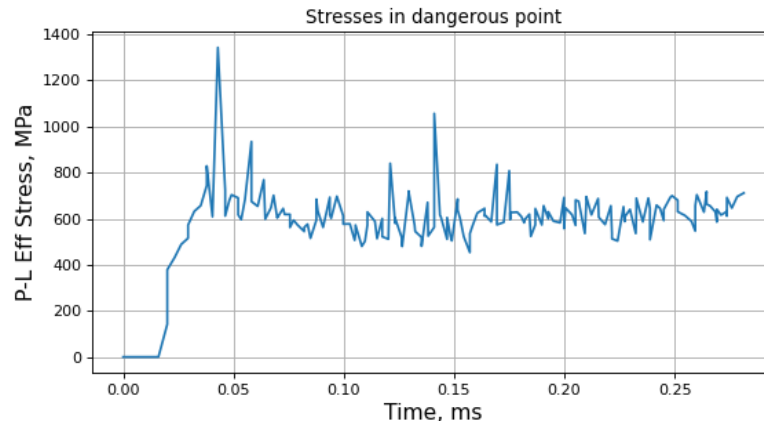
Розглянемо діаграми залежності розрахованих еквівалентних напружень від часу при врізанні до моменту утворення мікростружки (до 0,2 мс) для різних величин радіуса округлення різальної кромки при швидкості різання 125 м/хв та коефіцієнті тертя 0,45. Небезпечна точка, де вимірювались напруження розташована на задній поверхні інструменту в його привершинній зоні. У випадку гострого леза з малим параметром радіуса округлення $\rho = 10$ мкм концентратори напружень обумовлюють виникнення σ_{eq} , що перевищують величину границі міцності на розтяг: 3000 МПа (рис. 3.23 а) – при таких навантаженнях різальний інструмент буде пошкоджено. Пікові напруження в інструменті з $\rho = 50$ мкм сягають 1100 МПа, що менше

границі міцності на розтяг для твердого сплаву ВК8. У той же час у випадку, коли радіус округлення різальної кромки складає 30 мкм, у період врізання зберігається спостерігається поява напружень величиною до 1350 МПа. Співвідношення довжини радіальної складової сили різання до довжини активної ділянки різальної кромки в цей момент дорівнює $73 \text{ Н}/0,045 \text{ мм}^2$, для порівняння – в момент часу $T = 0,02 \text{ мс}$ ці величини становлять 34 Н та $0,015 \text{ мм}^2$. Таким чином у період врізання фрези в оброблюваний матеріал високої твердості величину радіусу округлення різальної кромки інструмента необхідно оптимізувати виходячи з критерію міцності інструментального матеріалу.

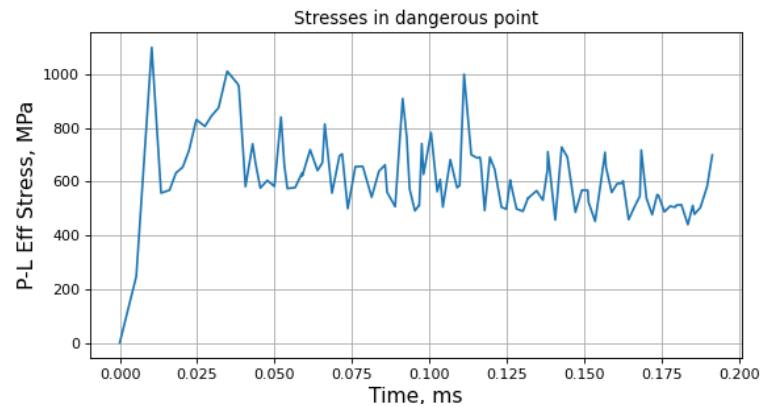
Результати розрахунків напружень в усьому діапазоні умов моделювання приведені у додатку Б. За результатами реалізації факторного експерименту отримано вирази що дозволяють встановити величину еквівалентних напружень в інструменті в залежності від коефіцієнту тертя, радіусу заокруглення різальної кромки та швидкості різання, яка впливає на контактні навантаження опосередковано через зміну механічних властивостей оброблюваного матеріалу. Поверхні відгуку, побудовані за математичною моделлю, отриманою по результатам обробки даних чисельного експерименту зображено на рисунках 3.24 та 3.25.



a)



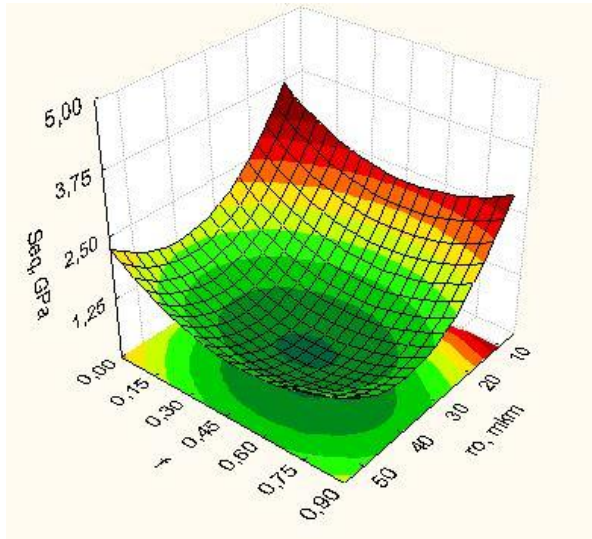
б)



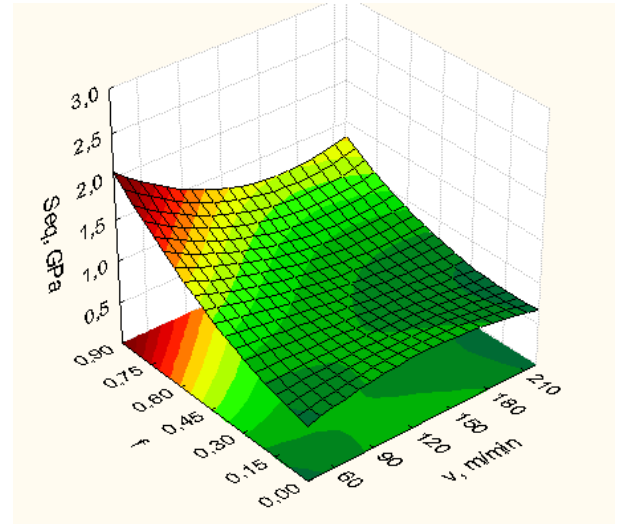
в)

Рисунок 3.23 – Залежність величини еквівалентних напружень в небезпечній точці леза від часу. а) $\rho = 10$ мкм; б) $\rho = 30$ мкм; в) $\rho = 50$ мкм ($v = 75$ м/мин $f = 0.45$)

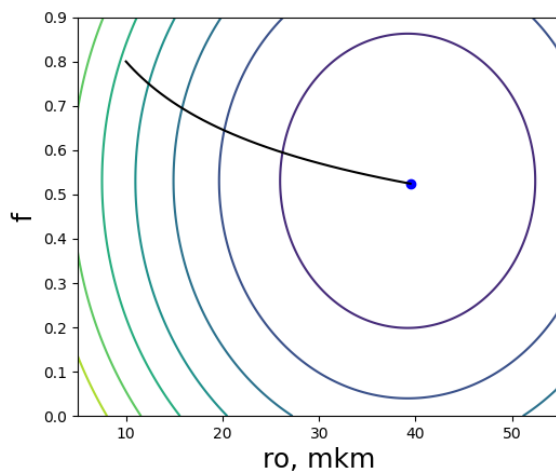
Швидкість різання оцінювалася як окремий від коефіцієнту тертя фактор, що впливає на швидкість деформації та інтенсивність тепловиділення в зоні контакту. Цей параметр в умовах моделювання має найменший вплив на σ_{eq} , адже на етапі врізання (шлях різання 0,25 мм) суттєвого зниження механічних властивостей ще не відбувається. Характеристика впливу ρ та f на температуру в приконтактних шарах оброблюваного матеріалу та радіальну складову сили різання приведена на рис. 3.25.



а)

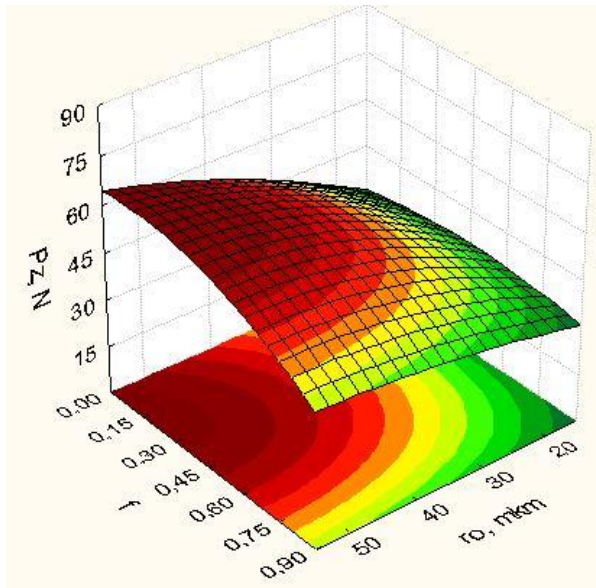


б)

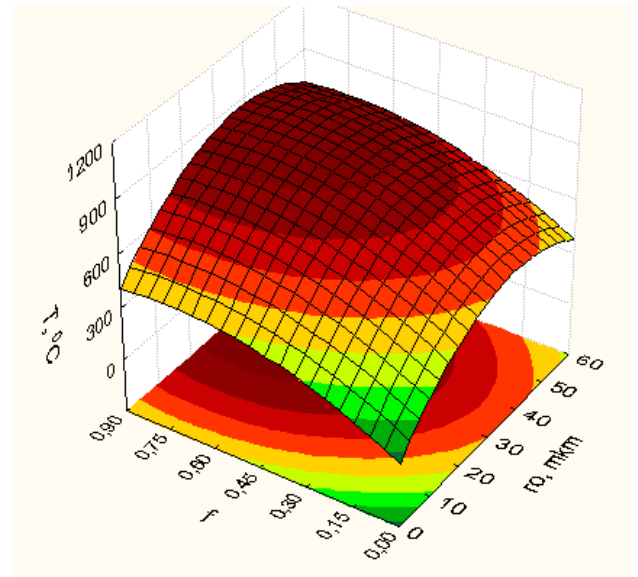


в)

Рисунок 3.24 – Залежності еквівалентних максимальних напружень в небезпечній точці інструменту та оптимальні параметри ρ та f : а) – від радіусу округлення та коефіцієнту тертя ($v = 75$ м/хв); б) – від швидкості різання та коефіцієнту тертя ($\rho = 40$ мкм); в) – результати оптимізації умов обробки за параметрами ρ та f



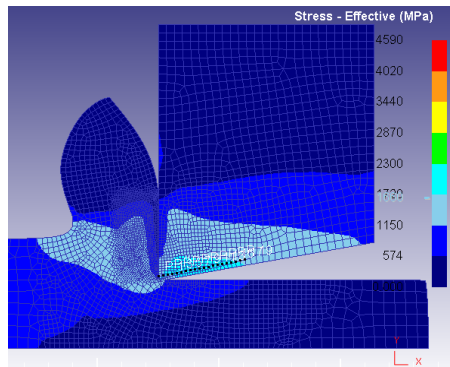
а)



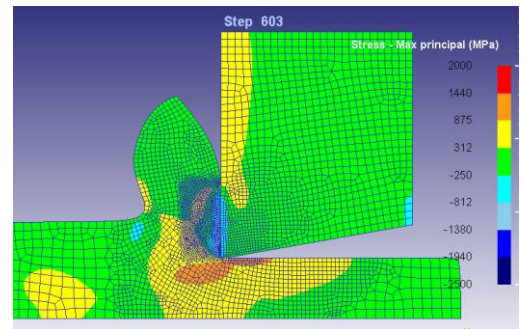
б)

Рисунок 3.25 – Залежності контактних параметрів процесу різання – сили різання та максимальної контактної температури від коефіцієнту тертя та радіусу округлення різальної кромки

Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану леза інструменту показав також, що в умовах, коли товщина зрізу досягає максимального значення – 0,15 мм, що відповідає величині подачі 1,9 мм/об (рис. 3.26 а, б) еквівалентні (за Писаренко-Лебедєвим) напруження в небезпечних зонах, які на відміну від попереднього випадку розташовані зі сторони передньої поверхні інструменту (рис. 3.27 а-г), складають 725 МПа. Дані величини менші за критерій руйнування – межу міцності на розтяг $R_m = 1600$ МПа, що свідчить про можливість реалізації обробки загартованих сталей інструментом, оснащеним напайними пластинами з твердого сплаву марки ВК8.

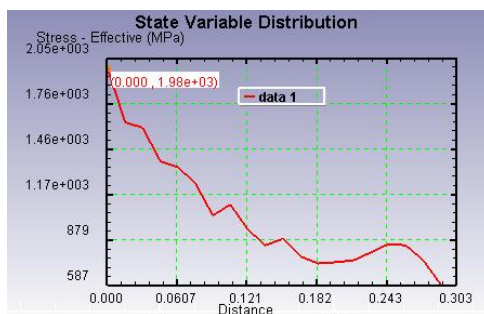


а)

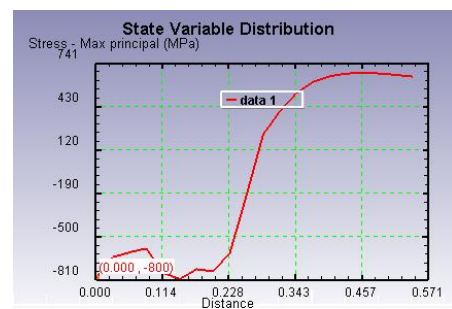


б)

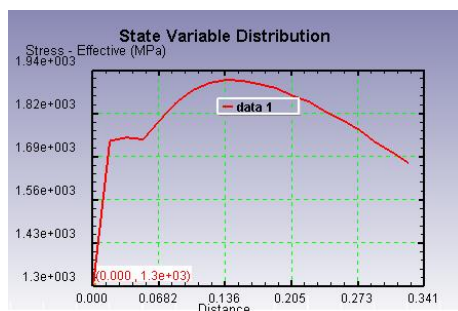
Рисунок 3.26 – Моделювання процесу різання загартованих коліс на рівні лезо-поверхневий шар оброблюваного матеріалу: напружено-деформованого стану леза при максиальній товщині зрізу а) - еквівалентні та (б) - макс.головні напруження



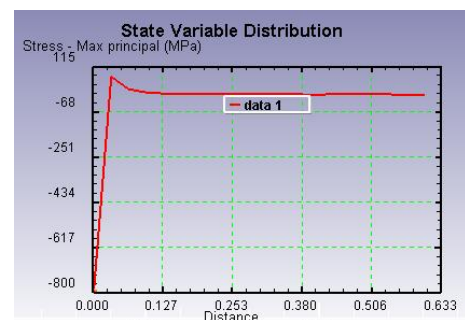
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.27 – Еквівалентні за Мізесом (а,в) та перші (б, г) головні

напруження вздовж передньої (а,б) та задньої (в, г) поверхонь інструменту

3.6 Висновки за розділом 3

Досліджено вплив конструктивних параметрів та подачі інструменту на значення розрахункової хвилястості при обробленні зубчастих коліс стандартними двадцятиградусними фрезами та фрезами з роздільною схемою формоутворення зі зменшеним профільним кутом зубів.

Показано, що при однакових зовнішньому діаметрі і подачі висота розрахункової хвилі при обробці коліс за допомогою фрез із роздільною схемою формоутворення в 1,5 рази менше, ніж для черв'ячних фрез відповідно до нормалі ПрАТ «НКМЗ» і майже в 2 рази менше, ніж для фрез згідно з ГОСТ 9324-80. У всьому розглянутому діапазоні кількостей зубів оброблюваних коліс ($z = 30 - 330$) розрахункова хвилястість для фрез із роздільною схемою формоутворення менша, ніж для фрез ПрАТ «НКМЗ». Різниця в висоті хвиль зменшується зі збільшенням кількості зубів колес, що пояснюється поступовим зближенням величин профільних кутів зубів фрез. Черв'ячні фрези, виконані згідно з ГОСТ 9324-60, поступаються обом вищезгаданим типам фрез. Ефективність фрез із роздільною схемою формоутворення особливо відчутна в діапазоні кількостей зубів $z = 30 - 90$, де при набагато меншому, ніж для стандартних фрез профільному куті зубів, розрахункова висота хвилі є меншою в 2 - 5 разів. Це свідчить про можливість суттєвого збільшення подачі інструменту.

Запропоновано узагальнений графік залежності розміру розрахункової хвилястості від подачі черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення при обробці коліс у широкому діапазоні модулів та кількостей зубів. Щоб визначити співвідношення розрахункової та реальної хвилястостей, потрібні експериментальні дослідження. Реальна хвилястість буде більшою за розраховану, оскільки значною мірою залежить від жорсткості та пов'язаних із нею вібрацій системи ВНІД. Останні, в свою

чергу, залежать від технологічних факторів обробки, схеми різання та геометрії різальної частини інструменту.

Проведено теоретичний аналіз систематичних похибок профілювання на основі архімедових черв'яків великомодульних черв'ячних фрез стандартної конструкції та спеціальних фрез із роздільною схемою формоутворення. З'ясовано, що похибки черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення, в разі профілювання по базовій точці, що лежить на початковому циліндрі теоретичного евольвентного черв'яка, в 3 - 5 разів більші, ніж при профілюванні по середній точці активної ділянки профілю, та перевищують похибки стандартних фрез. Точність профілювання архімедових фрез із роздільною схемою формоутворення по середній точці активної ділянки профілю вище за точність профілювання стандартних фрез, що пояснюється раціональністю вибору початкової точки профілювання, а також зменшенням висоти та кривизни активної ділянки профілю зі зменшенням верстатного кута. В усьому розглянутому асортименті модулів 20 - 42 мм і кількостей зубів 30 - 350 похибки обробки профілю зубів коліс фрезами перевищують допуск на профіль згідно з нормами плавностей 8-го ступеню ГОСТ 1643-72.

Проведено розрахунки і надано узагальнений графік залежності систематичних похибок профілювання архімедових фрез із роздільною схемою формоутворення від модуля та кількості зубів оброблюваних колес. Установлено, що вони можуть забезпечити точність оброблення профілю зубів є згідно з нормами плавностей 8-го ступеню ГОСТ 1643-72 у достатньо широкому діапазоні кількостей зубів тільки при модулі зубів 20 мм. Подальше поліпшення точності обробки зубів можливе при зміні методу профілювання черв'ячних фрез з приблизного, на основі архімедова черв'яка, на точний, на основі теоретичного евольвентного черв'яка, оскільки при цьому повністю виключаються органічні похибки профілювання інструменту

Запропоновано та проаналізовано дві конструкції евольвентних черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення. Обидві вони є

практично здійсненими. Серед них слід віддати перевагу другій конструкції, де передні грані зубів інструменту лежать у площинах, дотичних до основного циліндру евольвентного черв'яка. Така конструкція більш технологічна та підвищує якісні показники як самої фрези, так і оброблюваних поверхонь зубів коліс. Проведено порівняльний аналіз точності оброблення зубів архімедовими стандартними фрезами та евольвентними фрезами із роздільною схемою формоутворення. Показано, що точність оброблення профілю зубів коліс евольвентними фрезами в 2 - 3,5 рази вище, а зона оброблення коліс за 8-м ступенем точності у діапазоні $z = 18 - 350$ розширюється до модулю зубів 40 мм. Профілювання фрез із роздільною схемою формоутворення на основі евольвентного черв'яка і усунення систематичних похибок дозволяє значно зменшити діаметральні розміри інструменту. Це покращує динаміку оброблення, підвищує його продуктивність, робить інструмент більш зручним у експлуатації.

Шляхом моделювання методом скінчених елементів (МСЕ) встановлено, що максимальні еквівалентні напруження, що виникають під час врізання інструменту при обробці загартованих коліс твердістю HRC 53 залежать від радіусу заокруглення різальної кромки, зменшуючись від 3700 МПа до 1350-1100 МПа зі зростанням даного параметру від 10 мкм до 30-50 мкм. Зона мінімальних значень σ_{eq} спостерігається в діапазоні $f = 0,45-0,55$ та $\rho = 40-45$ мкм. Аналогічний характер впливу має і середній коефіцієнт тертя – суттєве зниження σ_{eq} спостерігається при зростанні f до 0,40-0,45.

Аналіз результатів моделювання напружено-деформованого стану леза інструменту показав що в умовах обробки коліс з загартованих сталей, коли товщина зрізу досягає максимального значення – 0,15 максимальні еквівалентні напруження мають місце зі сторони передньої поверхні інструменту та складають 725 МПа, що менше за критерій руйнування – межу міцності на розтяг $R_m = 1600$ МПа, що свідчить про можливість реалізації обробки загартованих сталей інструментом, оснащеним напайними пластинами з твердого сплаву марки ВК

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ ІЗ РОЗДІЛЬНОЮ СХЕМОЮ ФОРМОУТВОРЕННЯ ШЕВРОННИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

4.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Лабораторні дослідження проводилися на вертикально-фрезерувальному верстаті мод. 5А340Ф3 при обробці зубчастих коліс $m=20$ mm; $z=96$; $b=350$ mm та $m = 28$ mm; $z=53$; $b=370$ mm з сталі 35 ХМЛ твердістю НВ 220 - 260. Заготовки закріплювалися на планшайбі до шістьох стійок за допомогою гідрошайб із зусиллям притиску 10 т кожна [12, 115]. Напрямок фрезерування брався як зустрічний. Окремі досліди були проведені при попутному зубофрезеруванні. У якості змащуючи - охолоджуючої рідини використовувалася суміш сульфозфрезолу з оливою. На рис. 4.1 показані експериментальні черв'ячні фрези, а в таблиці 4.1 наведені їх основні конструктивні параметри.

При порівняльних дослідженнях обробки коліс черв'ячними фрезами $m = 20$ mm для стандартної фрези була застосована загальноприйнятна схема чистового зубофрезерування, коли в роботі беруть участь бічні і вершинні кромки зубів. Припуск, що зрізався, при цьому становив 0,45 mm на бічній поверхні зубів і 0,6 mm на дні западин зубів. Частина дослідів зі стандартною фрезою була проведена за схемою різання, коли вершини зубів не беруть участі в різанні, фрезою з роздільною схемою формоутворення, як інструментом із новою схемою різання, обробляли тільки бічні поверхні зубів з припуском 0,2 - 0,8 mm на сторону зуба [13, 107].

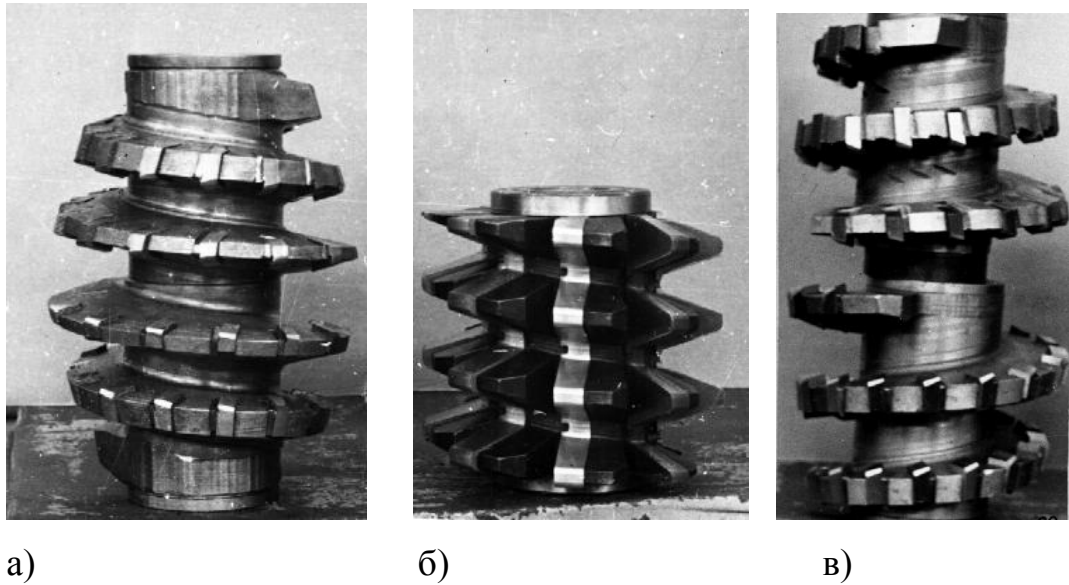


Рисунок 4.1 – Експериментальний зубофрезерний інструмент :
а – черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення $m = 20\text{мм}$; б – стандартна черв'ячна фреза $m = 20\text{ мм}$ (ГОСТ 9324 -60); в) - черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення $m = 28\text{ мм}$

Таблиця 4.1 - Конструктивні параметри фрез

Найменування параметру	Стандартна фреза $m=20\text{мм}$	Фрези з роздільною схемою формоутворення	
		$m=20\text{мм}$	$m=28\text{мм}$
Зовнішній діаметр	250 мм	250 мм	250 мм
Число зубів на довжини одного витка	8	14	14
Профільний кут зубів	20°	$14^\circ 30'$	$12^\circ 45'$
		$\gamma = 6^\circ$	$\gamma = 6^\circ 30'$
Геометрія різальної частини	$\gamma = 0^\circ, \alpha_b = 10^\circ, \alpha_\delta = 3^\circ - 4^\circ$	$\alpha_\delta = 10^\circ$	$\alpha_\delta = 10^\circ$
		$\lambda = 10^\circ$	$\lambda = 10^\circ$
Довжина фрези	250 мм	350 мм	350 мм
Матеріал різальної частини	P18	P18	P18

Вимірювання крутних моментів проводилося за допомогою динамометрів, що являють собою порожнисті зубофрезерні оправлення з захищеними кільцевими виточками, в яких наклеювалися дротові перетворювачі - тензодатчики. До вимірної схеми входили: ртутний струмознімач, тензометричний підсилювач ТА-5, осцилографи, міліамперметри. Зібрана схема являла собою міст опору, рівновага якого порушувалася при навантаженні динамометрів. Тарування динамометрів здійснювалося на зубофрезерному верстаті в статичному положенні за допомогою тарувального важеля, який встановлювався і закріплювався аналогічно досліджуванним черв'ячним фрезам. Одночасно із записом осцилограм крутних моментів вимірювалася споживана верстатом потужність [82, 118].

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

Дослідження і обробка результатів проводилися із застосуванням математичного методу планування екстремальних експериментів. Планування за цим методом дозволило при порівняно невеликому числі дослідів встановити математичні моделі досліджуваних процесів, виявити ступінь впливу на вихідні параметри, як окремих факторів, так і їх взаємодій, підвищити точність отриманих результатів.

Всі досліді повторювалися тричі. Послідовність їх проведення була обрана відповідно до таблиці випадкових чисел. При обробці результатів експериментів за прийнятою методикою всі обчислення прості, коефіцієнти регресії можна визначити незалежно один від одного з однаковою та мінімальною дисперсією.

4.2 Динаміка процесу при зубофрезеруванні шевронних коліс із урахуванням зміни сил різання

Процес різання черв'ячної фрези є нерівномірним. Кожна хвиля осцилограм вказує на зміну крутного моменту від нуля до максимуму і знову до нуля [15, 84, 117]. Непостійність крутного моменту обумовлена неоднаковістю та постійною зміною товщин різаних стружок, зміною кількості зубів, що одночасно беруть участь у різанні. Це призводить до безперервної зміни загального навантаження на фрезу та до коливань M_k .

Однак у характері осцилограм стандартної фрези та фрези з роздільною схемою формоутворення існують істотні відмінності. За один оберт стандартної фрези крутний моменту змінюється від максимуму до мінімуму стільки разів, скільки рейок або рядів зубів має фреза. Горизонтальні ділянки осцилограм, що збігаються з нульовою лінією M_k , свідчать про відсутність різання на даний момент - $M_k = 0$. Вертикальні лінії відмітника часу, відстань між якими відповідає 0,02 сек., дозволяють визначити період різання та період відсутності різання в роботі фрези. Період різання кожної рейки стандартної фрези зі швидкістю різання 16 м/хв і подачею 4 мм/об становить 0,1 - 0,12 сек, а період відсутності різання - 0,2 - 0,22 сек. Це свідчить про те, що довжина шляху різання кожної рейки є удвічі меншою за довжину дуги колового кроку зубів [12, 101, 117].

Різкі зміни величини M_k при вході рейок фрези в метал та при виході породжують вібрації заготовки та фрези. Суттєве зниження крутних моментів, в 1,4 - 1,6 рази, спостерігається при звільненні вершин зубів стандартної фрези від різання. Це підтверджує раціональність схеми чистового зубофрезерування, коли інструмент не обробляє дно западин зубів.

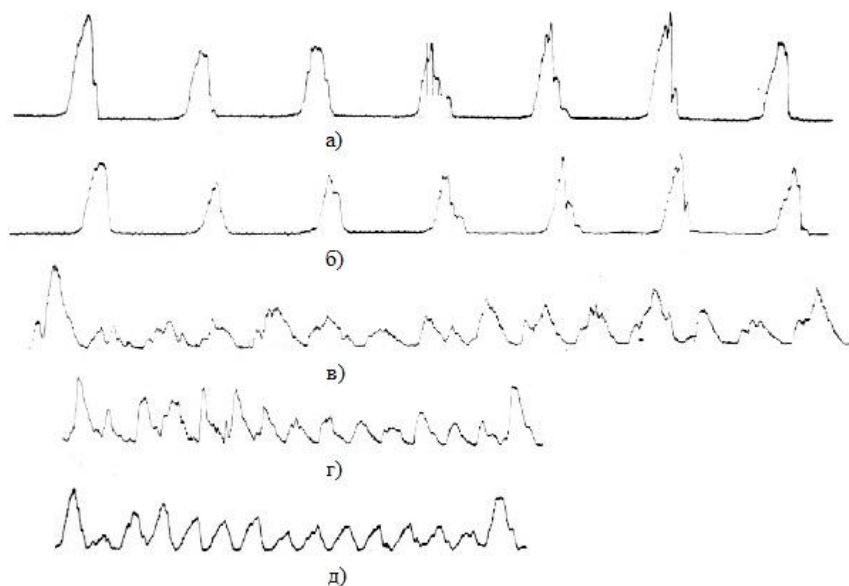


Рисунок 4.2 – Характерні осцилограми крутних моментів при чистовому нарізуванні колеса $m = 20\text{мм}$; $z = 96$; а- стандартна фреза $S = 4\text{мм/об}$, $V = 16\text{м/хв}$ (зустрічне фрезерування з обробкою дна западин зубів); б- без обробки дна западин зубів; в - черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення $S = 4\text{мм/об}$; 16м/хв , зустрічне фрезерування; г - фреза з роздільною схемою формоутворення $S = 4\text{мм/об}$, $V = 30\text{м/хв}$, зустрічне фрезерування; д - попутне фрезерування

Характер осцилограм M_k фрези з роздільною схемою формоутворення (рис.4.2,в, г,д) свідчить про більшу плавність процесу різання та менші зусилля різання. Фрези з роздільною схемою формоутворення мають в 1,75 разів більше зубів, на довжині одного витка нарізування, ніж стандартна фреза. Тому за один оберт фрези M_k змінюється частіше і періоди відсутності різання є набагато меншими.

Період різання зубів фрези з роздільною схемою формоутворення [76, 118] при швидкості різання 16 м/хв і подачі 4 мм/об становить $0,16\text{--}0,18$ секунди, а період відсутності різання - $0,02\text{--}0,36$ сек. Більш тривала участь у різанні зубів фрези з роздільною схемою формоутворення пояснюється характером траєкторій різальних кромок. При інших рівних

умовах залежність є наступною: чим меншим є профільний кут зубів фрези різака, тим меншою є кривизна траєкторій руху точок різальних кромки і тим довше обробляється контакт краю з поверхнею. Це підтверджує попередні висновки про залежність форми траєкторії різаних зубів від конструктивних параметрів приладу.

Більш плавна зміна M_k при вході зуба в метал заготовки і при виході з нього пояснюється наявністю кута нахилу головної різальної кромки 10° . Вид осцилограм, отриманих при попутному фрезеруванні (рис 4.2, д) вказує на більш рівномірний процес різання, хвилі приблизно однакові і за розміром трохи менші, ніж при зустрічному фрезеруванні.

Тому, що сумарні периметри одночасно різальних кромки зубів у черв'ячних фрез з роздільною схемою формоутворення $m = 20 - 60$ мм в 2,5 - 6 разів менше, а кількість зубів на довжині одного витка в 1,6 - 2 рази більше, ніж у стандартних фрез, то і навантаження, що сприймаються першими, буде меншими за ті, що сприймаються другими. Це чітко підтверджується видом осцилограм, де крутні моменти для фрез із роздільною схемою формоутворення є меншими, ніж для стандартної фрези.

Зменшення M_k пояснюється також вивільненням зубів фрези з роздільною схемою формоутворення від обробки дна западин зубів. Зуби знаходяться у вільному різанні, багато в чому схожому на оброблення торчовою фрезою.

На рис. 4.3. показана залежність середніх крутних моментів $M_{k,ср.}$ і середньої потужності машини, що споживається верстатом $N_{ст,ср.}$ від подачі при нарізуванні зубів $m = 20$ мм черв'ячною фрезою з роздільною схемою формоутворення і фрезою стандартної конструкції. Зі збільшенням подачі середні крутні моменти збільшуються, більш інтенсивно для стандартної фрези, що, вочевидь, пов'язане з більшим зростанням товщин стружок, різаних вершинними кромками її зубів [39, 76]. При збільшенні подачі з 3 мм/об до 6 мм/об, тобто в 2 рази, крутний момент збільшується

для фрези з роздільною схемою формоутворення в 1,4 рази, а для стандартної фрези - в 1,6 рази. У діапазоні досліджуваних подач 3 - 6 мм/об, при зустрічному фрезеруванні, середній крутний момент при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення в 2 - 2,5 рази менше, ніж при роботі стандартною фрезою, що обробляє бічну поверхню та дно западин зубів, і в 1,5 - 1,7 рази менше у випадку, коли стандартна фреза не обробляє дно западин зубів. При подачі 6 мм / об і швидкості різання 16 м/хв середній крутний момент для першої становить 430 Н·м, а для другої - 1100 Н·м, що, відповідно в 7,3 і 2,8 рази менше, ніж при чорновому нарізанні коліс такого ж модулю стандартними фрезами.

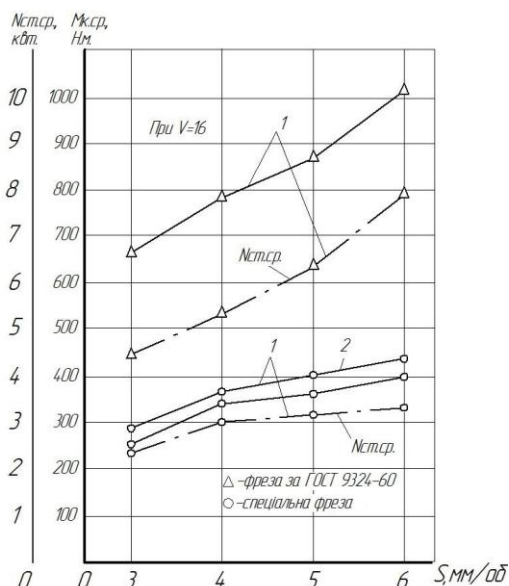


Рисунок 4.3 – Залежність середнього крутного моменту $M_{к.сер}$ та середньої споживаної верстатом потужності $N_{ст.сер}$ від подачі черв'ячних фрез S при оброблюванні колеса $m = 20$ м $q 20$ мм; $z = 95$; 1-зустрічне фрезерування; 2 - попутне фрезерування

При попутному зубофрезеруванні фрезою з роздільною схемою формоутворення крутний момент на 10-14% менше, ніж при зустрічному фрезеруванні. Інтенсивність зниження $M_{к.сер}$ при переході на попутне чистове зубофрезерування приблизно в 2 рази менша, ніж при чорновому

попутному нарізуванні зубів стандартними фрезами, що, вочевидь, пояснюється меншими перерізами різаної стружки та більш раціональною геометрією різальної частини фрези з роздільною схемою формоутворення. В діапазоні подач 3-6 мм/об, при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення середня споживана верстатом потужність у 1,8-2,4 рази менша, ніж при роботі стандартною фрезою.

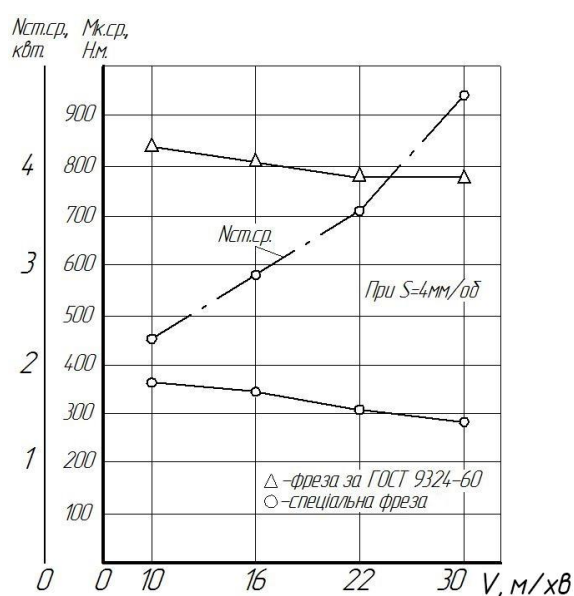


Рисунок 4.4 – Залежність середнього крутного моменту $M_{к.ср.}$ від швидкості різання при зустрічному зубофрезеруванні колеса $m = 20$ мм;
 $z = 96$

Яке видно з осцилограм (рис.4.2., в, г), зі зростанням швидкості різання крутний момент знижується. При збільшенні швидкості різання з 10 м/хв до 30 м/хв, тобто в 3 рази, середній крутний момент (рис. 4.4.) при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення зменшується в середньому на 1%, а при роботі стандартною фрезою - на 4%. При цьому зі збільшенням швидкості різання значно збільшується споживана потужність верстата. Так, при 3-кратному збільшенні швидкості різання середня споживана потужність збільшилася майже в 2 рази [12,84].

Вивчення осцилограм показало, що коефіцієнт нерівномірності фрезерування K_n , при нарізуванні коліс як стандартними фрезами, так і фрезами з роздільною схемою формоутворення, знаходиться в межах $K_n = 2,4-2,8$, дорівнюючи в середньому 2,6. Це, приблизно, відповідає аналогічному співвідношенню, отриманому при чорновому і чистовому нарізуваннях великомодульних коліс. При попутному зубофрезеруванні процес різання протікає більш плавно, а коефіцієнт нерівномірності фрезерування знаходиться в межах $K_n = 2,2 - 2,4$.

У разі, коли галтельні зуби фрези з роздільною схемою формоутворення започатковують перехідну криву біля основи зубів коліс, спостерігається деяке збільшення коефіцієнта - $K_n = 3,2$. Тому для більшої плавності процесу чистового зубофрезерування чорнове нарізування зубів колеса необхідно здійснювати на повну глибину різання черв'ячними або дисковими модульними фрезами з «протуберанцем».

4.3 Продуктивність обробки, зношування та стійкість фрез

Виробничі дослідження роботи черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення показали, що цей інструмент має більш високу розмірну стійкість у порівнянні з відомими конструкціями великомодульного зуборізального інструменту [14, 71, 84]. Шевронне зубчасте колесо (рис. 4.5.) зі сталі 35ХН2ВЛ, що має $m = 12$ мм; $z = 110$; $b = 350$ мм; HRC 38...42, нарізувалося черв'ячною фрезою з роздільною схемою формоутворення (рис.4.6) у два проходи: напівчистовий - при подачі фрези 6 мм/об і швидкості різання 12 м/хв та чистовий – при подачі фрези 4 мм/об і швидкості різання 20 м/хв. Це обумовлене порівняно великим припуском, залишеним на бічних поверхнях зубів коліс, попередньо оброблених спеціальними дисковими прорізними фрезами. Припуск є нееквідистантним щодо евольвенти та складає біля вершини зубів 5 мм, біля основи зубів 3 мм, біля дільного діаметру 1,5 мм.

Параметри різальної частини фрези з роздільною схемою формоутворення: передній кут зубів 7° , задній кут 10° , кількість торчових зубів 24, матеріал зубів - сталь P18. Загальний машинний час роботи фрези склав 25 годин. Як видно з графіка на рис. 4.10, переважна більшість зубів фрези з роздільною схемою формоутворення, які спочатку були заточені гвинтовою стрічкою в межах 0,1-0,15 мм, мали знос, що не перевищував величини 0,8 мм.



Рисунок 4.5 – Шевронне зубчасте колесо $m = 12$ мм; $z = 110$ після чорнового зубофрезерування та об'ємного загартування

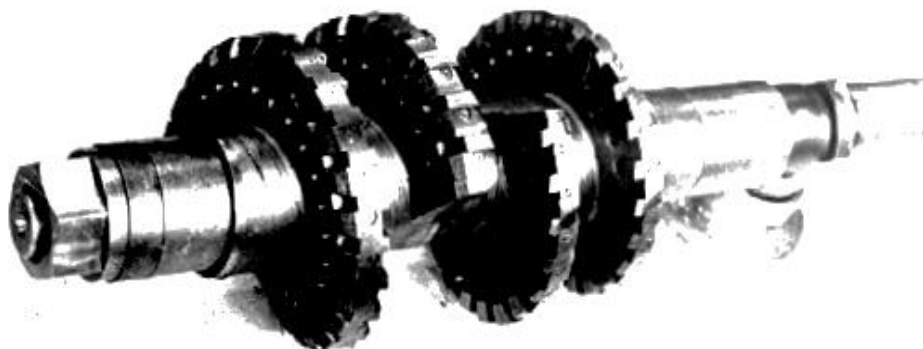
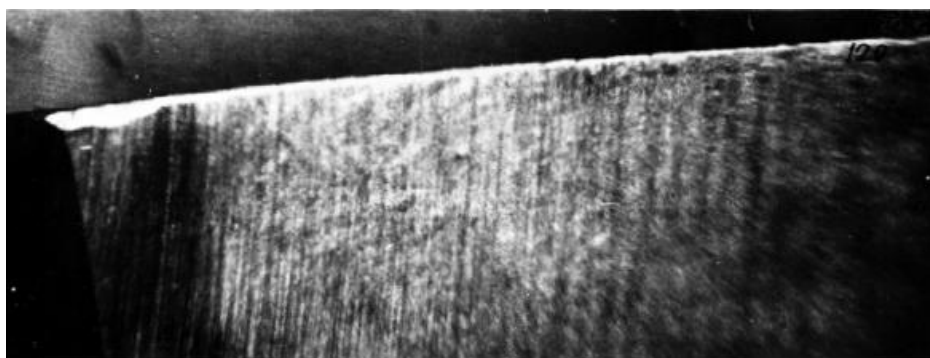


Рисунок 4.6 - Чистова черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення $m = 12$ мм у зборі з оправкою

Чистове зубофрезерування цих же коліс дисковою модульною фрезою здійснювалося також у два проходи при подачі $S_0 = 2-2,5$ мм/об і швидкості різання $V = 0,4 - 0,5$ 12 м/с. Геометрія різальної частини фрези: $\gamma = 0^\circ$; $\alpha_\phi = 3^\circ - 4^\circ$; $Z_\phi = 10$; γ - передній кут, α_ϕ – задній кут, Z_ϕ - кількість зубців фрези) матеріал зубів - сталь Р18. Стійкість різця до затуплення зубів $\delta = 0,8$ мм склала 8 годин, що дозволяє обробити лише одне колесо[12, 57, 100] .



а)



б)

Рисунок 4.7 – Типовий знос зубів фрези з роздільною схемою формоутворення по заднім граням після оброблення зубчастого вінця $m = 20$ мм; $z = 316$; $b = 800$ мм ; а - зуб правого корпусу ; б - зуб лівого корпусу

Зона найбільшого зносу різальної кромки для зубів правого корпусу (рис. 4.7, а) розташована ближче до забірної фаски, кромка бере участь у різанні не всією довжиною. Знос кромки зубів лівого корпусу (рис. 4.7, б) є

більш рівномірним, кромка бере участь у різанні практично всією довжиною. У міру зростання номеру зуба збільшується довжина зношеної ділянки кромки для обох корпусів. Ширина стружки, що зрізується, збільшується внаслідок того, що, поступово, до вершини зуба колеса, зменшується кривизна оброблюваної евольвентної поверхні.

На рис. 4.8 показано стружку, що зрізана фрезою з роздільною схемою формоутворення. Ширина стружки не перевищує довжину різальної кромки зубів фрези і дорівнює 14-18 мм. Стружка є завитою, що свідчить про достатньо сприятливі умови різання інструменту. Цьому сприяє наявність переднього кута різання зубів, а також кута різальної кромки – $\lambda_\delta = 10^\circ$. Незважаючи на те, що оброблення фрезою з роздільною схемою формоутворення виконується на подачі в 1,5 рази вищій; ніж фрезою ПрАТ «НКМЗ», хвилястість на обробленій поверхні залишається на попередньому рівні.



Рисунок 4.8 – Стружка, що зрізується фрезою з роздільною схемою формоутворення, при оброблюванні зубчастих вінців $m = 20$ мм; $z = 316$.

Режими різання - $\Delta = 0,65$ мм; $S = 6$ мм/об; $V = 20$ м/хв

Це пояснюється меншим профільним кутом нахилу зубів ($\alpha_k = 18^\circ 30'$), більш стабільним процесом різання, який не викликає вібрацій та коливань столу верстата з деталлю. Таким чином, при продуктивності оброблювання великогабаритних вінців в 1,9 рази вищій, ніж при використанні черв'ячних фрези ПрАТ «НКМЗ», стійкість фрез із роздільною схемою формоутворення є в 1,4 рази вищою, а знос зубів не перевищує дозволений для чистових зубофрезерних інструментів.

На зубофрезерному верстаті мод. 5А340Ф3 підвищеної жорсткості і швидкохідності, використання черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення дозволило вирішити проблему чистого зубофрезерування найбільших з оброблюваних методом обкатування вінців $m = 28$ мм; $z = 284$; $D_a = 8058,4$ мм; $\beta = 6^\circ$; $b = 1000$ мм; сталь 35МХЛ; HRC 46...52. Застосування стандартних черв'ячних фрез при чистовому нарізуванні таких вінців при досить ефективних режимах різання неможливе внаслідок недостатньої їх розмірної стійкості.

Обробка вінців фрезою з роздільною схемою формоутворення здійснюється в наступних режимах різання: $\Delta = 0,5-0,8$ мм; $S = 3,5-4$ мм/об; $V = 25$ м/хв, машинний час обробки складає 57 годин. Параметри фрези (рис. 4.9.): $\gamma = 7^\circ$; $\alpha_\delta = 10^\circ$; $\lambda_\delta = 10^\circ$; $Z_\phi = 16$; $D_\phi = 310$ мм; матеріал зубів - сталь Р18. На рис. 4.10 наданий графік зносу зубів фрези після обробки одного вінця [14, 39, 67]. Основна кількість зубів має знос, як правило, в межах 0,15-0,8 мм. Підвищений знос зубів №№ 4-8 правого корпусу частини тіла в цьому випадку обумовлений наявністю піщаних раковин поблизу основ окремих зубів коліс. Знос зубів №№ 1-8, що оброблюють основи зубів коліс, вище ніж зубів №№ 22-28, що оброблюють вершини.

Це пояснюється, по-перше, різницею в швидкості різання, адже корпуси фрези є конусними і при зростанні номера зуба радіус його обертання зменшується (), а по-друге, зуби, які обробляють вершини, мають кращі умови для врізування в метал заготовки. Це узгоджується з

висновками, зробленими при аналізі кінематики руху різальних кромок зубів фрези. Менший знос зубів лівого корпусу, як вже зазначалося, пояснюється кращою схемою різання і більш сприятливою формою стружки, що зрізається.

Вивчення зовнішнього вигляду стружки, а також характеру зносу зубів фрези з роздільною схемою формоутворення на передніх і задніх гранях свідчить про те, що процес різання фрезою відбувається в умовах інтенсивного наростоутворення. На контактній поверхні стружки добре помітні різні за глибиною поздовжні борозни, що часто закінчуються частинкою наросту, яка зірвалася. Це свідчить про незбіг фаз розвитку наросту вздовж різальної кромки інструменту, а також про його нестабільність. Про захисну дію наросту та його нестабільність свідчить характерний «пилкоподібний» вид зносу (рис. 4.7, а,б) різальної кромки. У місцях, де нарост утримувався протягом більш довгого часу, знос зуба на задній грані був меншим, і навпаки, де нарост зривався частіше знос був більшим [12, 14, 76].

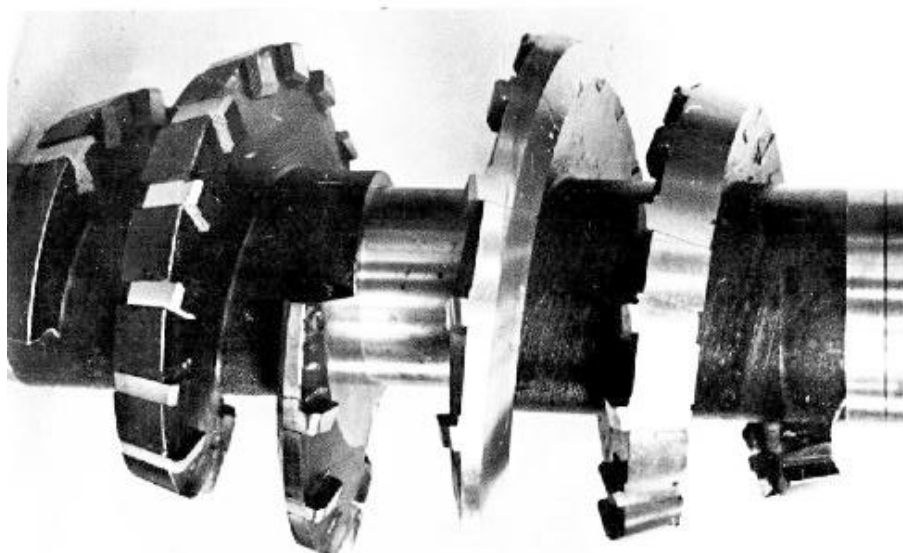


Рисунок 4.9 - Черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення
 $m = 28\text{мм}$

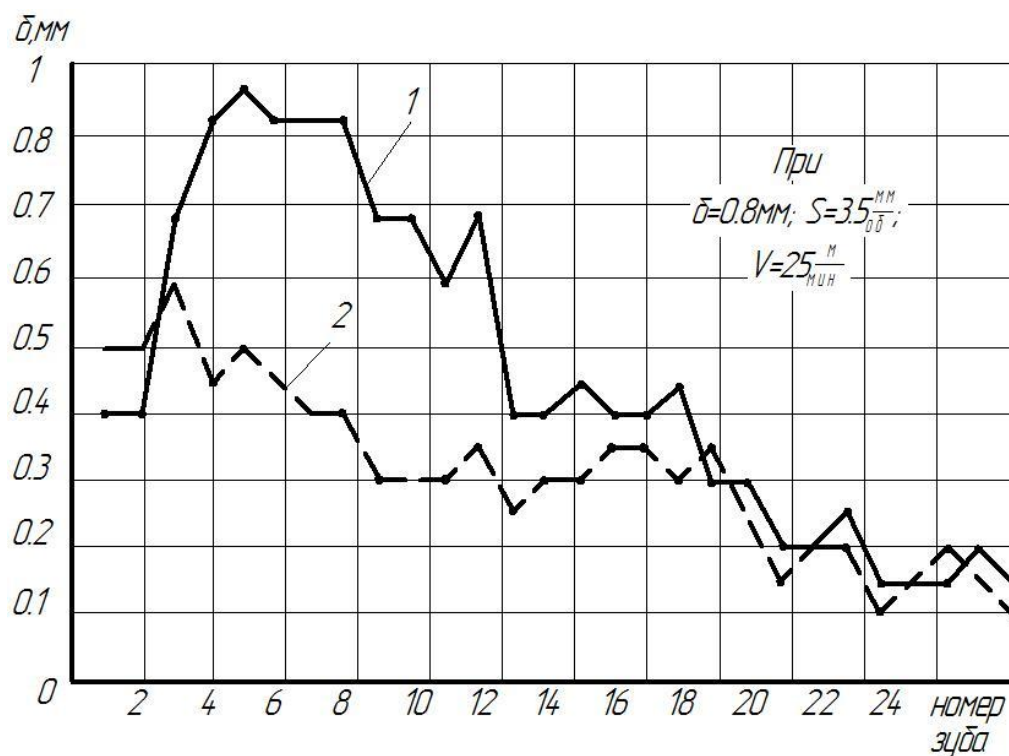


Рисунок 4.10 – Графік зносу зубів фрези з роздільною схемою формоутворення по заднім граням після обробки зубчастого вінця $m = 28 \text{ мм}$; $z = 284$; $b = 1000 \text{ мм}$. 1 - правий корпус фрези; 2 - лівий корпус фрези

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

Наявність інтенсивного наростоутворення та нестабільність наросту, а також адгезійні процеси на передній та задній поверхнях зубів фрез свідчать про те, що знос зубів черв'ячних фрез має подвійний характер - адгезійний та абразивний. Останній вид зносу переважає. Один з варіантів заточування фрези з роздільною схемою формоутворення передбачає шліфування гвинтової стрічечки на задніх поверхнях зубів. При цьому задній кут різання по стрічечці дорівнює 0° . Наявність наросту забезпечує

можливість досить ефективного процесу різання фрезою з такою геометрією заточування.

Як відомо, через нависання наросту над різальною кромкою, між задньою поверхнею зуба інструменту та обробленою поверхнею деталі утворюється зазор. Це, певною мірою, захищає задню поверхню зубів, яка має гвинтову стрічку, від інтенсивного зносу. Практика використання фрез із роздільною схемою формоутворення, що мають на зубах гвинтову стрічку близько 0,05-0,15 мм на зубах, свідчить, що їх стійкість є достатньо високою.

Забезпечення геометричних параметрів та якості контактних поверхонь черв'ячних фрез з твердосплавними лезами забезпечується якісною заточкою.

Для шліфування та заточки інструмента з твердого сплаву використовують алмазні шліфовальні з алмазу на органічній, металічній або керамічній зв'язці. Для забезпечення геометричних параметрів черв'ячних фрез використовуваних в роботі було застосовано алмазні круги марки АС6 та АС6М з зернистістю 160/125 та 80/63 (напівчистова та чистова обробки відповідно), зв'язка марки В1-11П та В2-01-1 при відносній концентрації алмазу 100%. Швидкість різання складала 15 м/с, поперечна та прокольна подачі 0,05 мм/подв.хід та 2,0 м/хв. При алмазному шліфуванні твердосплавних пластин за вказаними режимами шорсткість оброблених поверхонь становить Ra 0,04...0,17 при продуктивності шліфування до 5000 мм³/хв.

Реалізація процесу заточки проводиться із використанням мастильно-охолоджувальних технологічних засобів (МОТЗ), що підвищує ефективність процесу обробки. Як правило, експериментально визначені оптимальні варіанти МОТЗ, у тому числі змащувально-охолоджувальні рідини (ЗОР), тверди та пластичні змащувальні матеріали (ТЗМ і ПМЗ), співпадають для лезової та абразивної обробки конкретних матеріалів, бо саме хімічний склад оброблюваного матеріалу, його фізико-хімічні,

теплофізичні та фізико-механічні властивості відіграють значну роль в реалізації корисної дії МОТЗ. При оптимізації умов заточування різальних лез інструментів, що досліджувалися в даній дисертації, використовувалися результати, які були отримані в науково-дослідній роботі М2247, щодо вибору різноманітних МОТЗ, зокрема ТЗМ для шліфування важкооброблюваних матеріалів до яких відносяться тверді сплави.

4.4 Висновки за розділом 4

Процес чистового зубофрезерування великомодульних коліс є нерівномірним. Непостійність крутного моменту при оброблюванні черв'ячною фрезою пояснюється безперервною зміною товщин стружок, що зрізаються, та зміною кількості одночасно різальних зубів інструменту.

Характер осцилограм крутного моменту, отриманих для випадку обробки зубів фрезою з роздільною схемою формоутворення, свідчить про більшу плавність процесу різання, менші зусилля різання. Це досягається завдяки значному зменшенню розмірів зубів інструменту та збільшенню їх кількості, вивільненню зубів фрези від обробки дна впадин зубів колеса, раціональним геометричним параметрам різальної частини фрези. У діапазоні досліджуваних подач 3-6 мм/об середній крутний момент при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення в 2-2,5 рази менше, ніж при роботі з стандартною фрезою, що обробляє бічні поверхні та дно впадин зубів, і в 1,5 рази менше, коли стандартна фреза не обробляє дно впадин зубів. При попутному зубофрезеруванні фрезою з роздільною схемою формоутворення крутний момент на 10-14% менше, ніж при зустрічному. Інтенсивність зниження $M_{к.ср.}$ при цьому приблизно в 2 рази менше, ніж при чорновому попутному нарізуванні зубів стандартними фрезами. Зі збільшенням швидкості різання спостерігається незначне зниження крутного моменту. При збільшенні швидкості різання з 10 м/хв

до 30 м/хв, тобто в 3 рази, середній крутний момент при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення зменшується в середньому на 10%, а при роботі стандартною фрезою - на 4%.

Коефіцієнт нерівномірності фрезерування при зустрічному нарізуванні коліс як стандартними фрезами, так і фрезами з роздільною схемою формоутворення знаходиться в межах $K_H = 2,4-2,8$, що приблизно відповідає аналогічному коефіцієнту для чорнового нарізування коліс стандартними фрезами. При попутному зубофрезеруванні процес різання протікає більш плавно, а коефіцієнт $K_H = 2,2-2,4$.

Менш значущий, в порівнянні зі стандартними фрезами, вплив модуля різаних зубів на величину крутного моменту і споживаної потужності обумовлений раціональністю схеми різання фрезою з роздільною схемою формоутворення та сталістю розмірів її різальних елементів. Суттєво на величину $M_{к.ср.}$ впливає знос зубів фрези. При зносі зубів фрези з роздільною схемою формоутворення в межах 0,6-0,8 мм середній крутний момент збільшується в 1,5-1,8 рази. У діапазоні подач 3-6 мм/об при роботі фрези з роздільною схемою формоутворення середня споживана верстатом потужність в 1,8-2,4 рази менше, ніж при роботі стандартної фрези. Споживана потужність різко зростає зі збільшенням швидкості різання в основному за рахунок приросту потужності холостого ходу. На основі експериментальних і виробничих досліджень були отримані узагальнені математичні моделі, що характеризують вплив технологічних факторів на динаміку зубофрезерування фрезами з роздільною схемою формоутворення, що дозволяє обрати раціональні режими чистового оброблювання зубів.

Черв'ячні фрези з роздільною схемою формоутворення мають більш високу стійкість, порівняно з відомими конструкціями великомодульного зуборізального інструменту. Цьому сприяє раціональна геометрія різальної частини, збільшена кількість зубів, більш сприятлива схема різання. При продуктивності обробки в 2 рази більшій стійкість фрез із роздільною

схемою формоутворення є в 3 рази вищою за стійкість затилованих дискових фрез і в 1,4-1,6 рази вищою за стійкість черв'ячних фрез, виготовлених відповідно до нормалі ПрАТ «НКМЗ».

На величину зносу зубів фрези впливає форма та розміри зрізуваної стружки, форма траєкторії руху різальної кромки, а також різниця в швидкості різання між окремими зубами внаслідок різних розмірів радіусів обертання. Наявність інтенсивного наростоутворення та нестабільність наросту, а також адгезійні процеси на передній та задній гранях зубів фрези свідчать про те, що знос зубів черв'ячних фрез має подвійний характер - клейовий та абразивний.

При нарізуванні великогабаритних зубчастих вінців Ø5033-3000мм, сумарний шлях різання зубів фрези досягає 3000 м, а час обробки - 60-70 годин. Для зменшення трудомісткості зубонарізування та збереження стійкості інструменту за рахунок зменшення сумарного шляху різання бажано збільшувати подачу фрези.

Стійкість фрез із роздільною схемою формоутворення, що мають на зубах гвинтові стрічечки близько 0,05-0,15 мм, до зносу в межах 0,5-0,6 мм становить 55-60 годин. Стійкість фрез із загостреними зубами є на 30-40% вищою та становить 70-80 годин. При такій стійкості забезпечується можливість оброблювання зубчастих вінців діаметром до Ø12000 мм і шириною $b = 1000$ мм. Для забезпечення розмірної стійкості інструменту на весь період обробки доцільно призначати задній кут зубів фрези з роздільною схемою формоутворення в межах 5° - 7° . При таких кутах за критерій притуплення зубів по заднім граням, виходячи з забезпечення необхідної точності обробки, можна прийняти знос до 0,8 мм.

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ЗУБІВ ЗАГАРТОВАНИХ ШЕВРОННИХ КОЛІС ЧЕРВ'ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ

5.1 Методика проведення досліджень

В якості заготовок при дослідженні хвилястості та шорсткості обробленої поверхні зубів використовувалися зубчасті колеса $m = 20$ мм и $m = 28$ мм, параметри яких вказані в розділі [15, 101, 117]. При дослідженні точності оброблювання додатково було використано зубчасте колесо $m = 20$ мм; $z = 49$; $b = 300$ мм; сталь 35ХМЛ; HRC 46...52.

При дослідженні шорсткості оброблених поверхонь колісних зубів колеса, в якості інструментів були використані: чистова черв'ячна фрезам $m = 28$ мм конструкції ПрАТ «НКМЗ», черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення $m = 28$ мм, а також тризуба фреза-летючка $m = 28$ мм. Вимірювання шорсткості було зроблено за допомогою електронно-щупового пристрою, а також за зліпками з гуттаперчової маси, що вивчалися під мікроскопом. Для визначення мікротвердості окремих ділянок обробленої поверхні із зубів експериментальних коліс були вирізані зразки. Мікротвердість вимірювалася на приладі 1МГ-3. Мікроструктуру поверхневого шару металу зубів фотографували зі збільшенням під мікроскопом МИМ-8М.

При дослідженні точності оброблювання зубів використовувалася черв'ячна фреза $m = 20$ мм стандартної конструкції (ГОСТ 9324-80) і фреза з роздільною схемою формоутворення $m = 20$ мм, спрофільовані на основі архімедова черв'яка, а також евольвентна фреза з роздільною схемою формоутворення (рис. 5.1) $m = 20$ мм. Для контролю різниці окружних кроків зубів і відхилень кроку зачеплення використовувався накладний крокомір мод. ТМС $m = 2-32$ ММ фірми "MAAG" (Швейцарія). Контроль

профілю зубів здійснювався шляхом співставлення розрахункових координат евольвенти із координатами, отриманими при вимірюванні товщини зубів на різних висотах оптичним зубоміром (рис. 5.2.). Довжина загальної нормалі зубів вимірювалася нормалеміром. Контроль кінематичної точності зубофрезерного верстата мод. 5А340Ф3 здійснювався кінематоміром мод. КН-6. Аналіз повної кінематичної помилки ланцюга обкату верстата довів, що верстат відповідає класу Н, тобто забезпечує нарізування зубчастих коліс 7-8 ступеня точності [66, 101, 118].

Підвищенню стійкості інструменту також сприяють тангенціальні розташування твердосплавних різальних пластинок з зносостійкими покриттями.

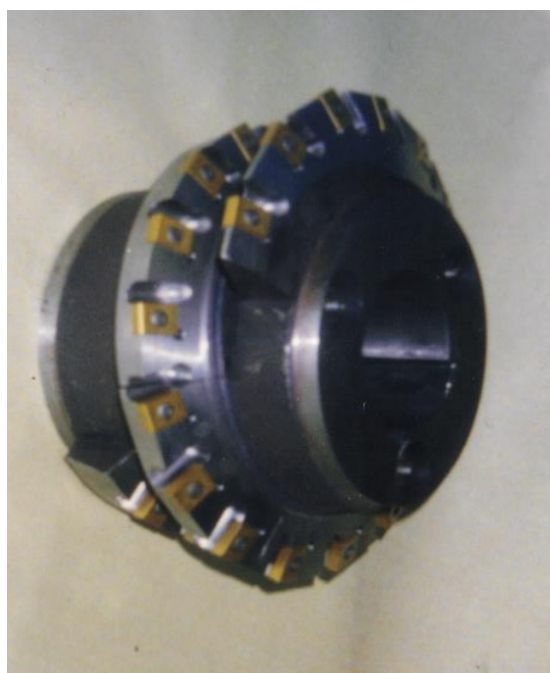


Рис 5.1 – Евольвентна черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення $m=20$ мм - передні грані зубів лежать у площинах, які є дотичними до основного циліндру фрези, а різальні кромки співпадають із утворюючими прямими теоретичного евольвентного черв'яка

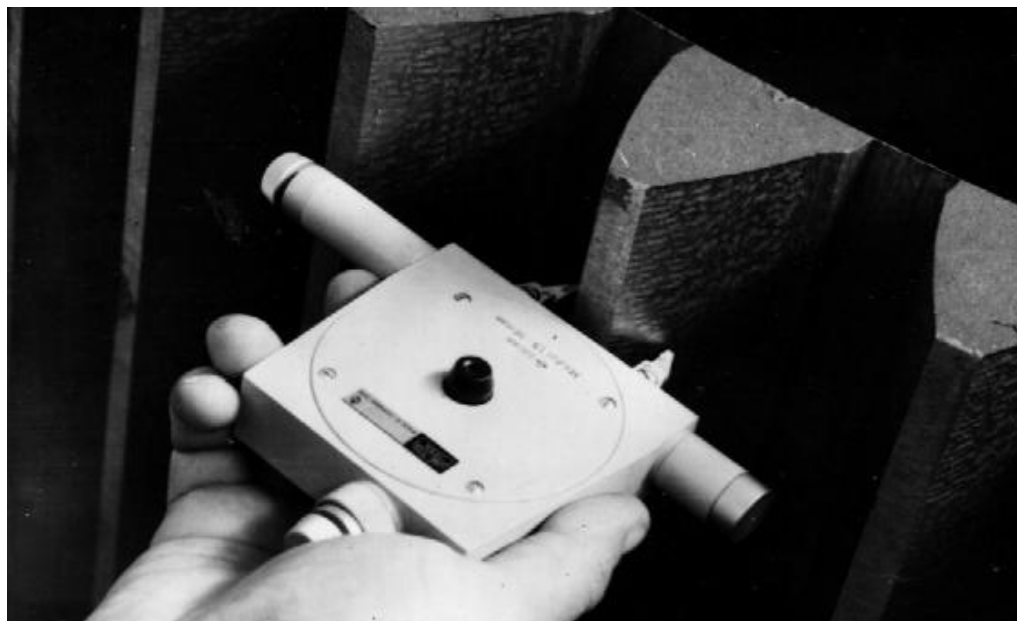


Рисунок 5.2 – Контроль профілю зубів за допомогою оптичного зубоміра

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

5.2 Загальний стан обробленої поверхні. Вплив геометрії заточування зубів черв'ячної фрези та технологічних факторів на шорсткість обробленої поверхні

Поверхня зуба (рис. 5.3), яка оброблена черв'ячною фрезою, має ямкоподібний рельєф. Краї ямок мають більш блискучий вигляд, що свідчить про певний наклеп обробленої поверхні у місцях входу зубів фрези в метал заготовки. На фотографіях (рис.5.3) блискучі ділянки поверхні виглядають як темні смужки, а матові – як світлі [12, 39, 118].

В таблиці 5.1 представлені дані щодо вимірювань мікротвердості блискучих і матових поверхонь ямок, отриманих при однакових режимах обробки: $\Delta = 0,5$ мм; $S = 3,86$ мм/об; $V = 16$ м/хв.

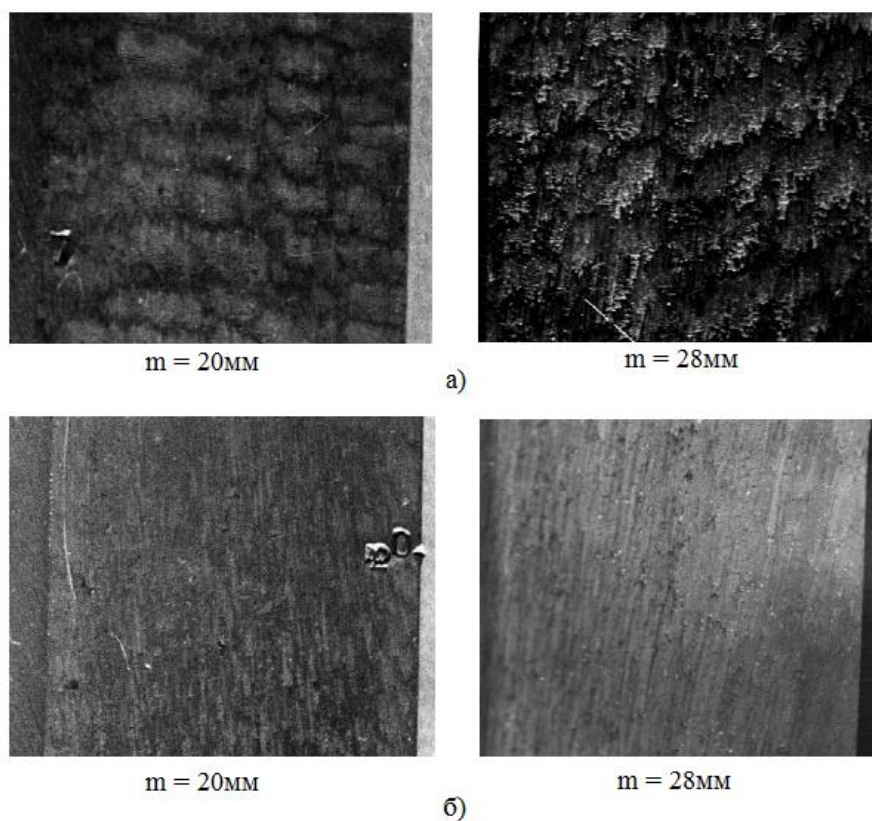


Рисунок 5.3 - Вид бічної поверхні зубів коліс $m = 20\text{мм}$ и $m = 28\text{мм}$
 $(\Delta = 0,5\text{м}; S = 4 \text{ мм/об}; V = 16 \text{ м/хв})$: а - оброблення стандартною фрезою;
 б оброблення фрезою з роздільною схемою формоутворення

Таблиця 5.1 – Мікротвердість ділянок поверхні зубів

Мікротвердість ділянок поверхні зубів, МПа				
Глибина зміру, мм	Оброблення стандартною фрезою		Оброблення фрезою з роздільною схемою формоутворення	
	Блискучі ділянки	Матові ділянки	Блискучі ділянки	Матові ділянки
0,02	2860	1440	2570	1430
0,05	2040	1400	1680	1420
0,10	1670	1390	1420	1370

Як видно з наведених даних, мікротвердість блискучих ділянок, отриманих у випадку оброблювання стандартною фрезою, вище, ніж при обробці фрезою з роздільною схемою формоутворення. Це свідчить про більш сприятливий характер врізування зубів останньої в метал заготовки та більш стабільний перебіг процесу різання. Глибина поширення наклепу для стандартної фрези становить 0,15 - 0,13 мм, а для фрези з роздільною схемою формоутворення - 0,1 - 0,12 мм..

Наклеп зменшує хвилястість і шорсткість обробленої поверхні. Вимірювання шорсткості показали, що на блискучих ділянках вона на 8-10 мкм менше, ніж на матових [12, 66, 101].

Загальний стан обробленої поверхні (рис. 5.3) свідчить про визначальний вплив наросту на шорсткість. Поверхня зуба покрита поздовжніми борознами різної глибини і довжини. Частинки наросту, що зірвався, можна візуально спостерігати як окремі в кінці канавок, так і зібрані в групи. Останнє вказує на можливість одночасного зривання наросту упродовж всієї різальної кромки.

Процес зубофрезерування вирізняється значною нестабільністю наростоутворення не тільки за рахунок переривчастості різання зубів інструменту і змінними товщинами різаних шарів. Однією з найважливіших причин частих зривів наросту, вочевидь слід вважати складність кінематики обкатних рухів обробних поверхонь деталі та різучих поверхонь інструменту. Обидві взаємодіючі поверхні спочатку наближаються, а потім відходять одна від іншої. Це призводить до зміни напрямку дії сил на передній поверхні зубів фрези і сприяє зриву наросту. Практика зубофрезерування показує, що в разі оброблення зубів методом одиничного поділу, коли деталь нерухома, а обертається тільки інструмент, оброблені поверхні мають меншу шорсткість, ніж при нарізанні методом обкатування.

У процесі взаємних рухів зубів фрези та колеса внаслідок нерівномірності обертання ділильної черв'ячної пари верстата виникають

вібрації заготовки. Вібрації також сприяють зриву наросту, проковзуванню його часток на задню поверхню зубів фрези, де їх дія має двоякий характер. З одного боку, частки наросту, що мають у 2 - 2,5 рази більш високу твердість, ніж оброблюваний матеріал, сприяють абразивному зношуванню зубів інструмента, а з іншого боку – внаслідок адгезійного скріплення з інструментальним матеріалом вони приварюються до задніх граней зубів фрези, погіршуючи у подальшому стан оброблюваної поверхні.

З метою вивчення впливу значення заднього кута зубів інструменту на інтенсивність прослизання наросту і, таким чином, на величину шорсткості обробленої поверхні були проведені експерименти з фрезою з роздільною схемою формоутворення $m = 28$ мм, задній кут зубів якої змінювався в межах 3° - 14° . Заточування зубів здійснювалося на спецверстаті - напівавтоматі мод. ВЗ-142 [67, 84]. В таблиці 5.4. представлені результати експериментів (режими оброблення $\Delta = 0,5$ мм; $S = 3,86$ мм/об; $V = 16$ м/хв).

Таблиця 5.2 – Шорсткість оброблення при різних задніх кутах зубів фрези з роздільною схемою формоутворення

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

Як видно з наведених вище даних, зменшення величини заднього кута з 14° до 7° сприяє зниженню шорсткості. Кількість окремих, більш глибоких, рисок на обробленій поверхні зубів колеса помітно зменшується. Очевидно, зі зменшенням заднього кута ускладнюється проковзування частинок наросту та підсилюється загладжувальна дія

задньої поверхні зубів інструменту. Подальше зменшення заднього кута практично не впливає на величину шорсткості. Таким чином, з метою зменшення шорсткості обробленої поверхні, доцільно дотримуватися розміру задніх кутів заточування зубів фрези з роздільною схемою формоутворення в межах 5° - 7° .

Як впливає з результатів експериментів, зі зменшенням ширини гвинтової стрічки зменшується шорсткість обробленої поверхні. Однак, це зниження незначне, і, навіть при відносно невеликій подачі фрези $S = 2$ мм/об, шорсткість не знижується менше, ніж $R_z = 22 - 24$ мкм. При гострому заточуванні зубів фрези отримана найменша величина шорсткості

5.3 Черв'ячний накатник для обробно- зміцнювальної обробки зубів

На рис. 5.4 показано загальний вигляд черв'ячного накатника та схема взаємодії накатного елемента інструменту з бічною поверхнею зуба обробного колеса [12, 84]. Черв'ячний накатник (рис. 5.4, а) складається з лівого 1 і правого 2 корпусів, що мають з гвинтові конічні виступи А і В одного напрямку. Корпуси 1 і 2 встановлені на оправці 3 з можливістю зворотно-поступального переміщення упродовж плішок 4 і 5. Накатні елементи 6, наприклад, шарикопідшипники), вісі обертання яких перпендикулярні конічній твірній гвинтових виступів А та Б, закріплені на периферійній частині виступів гвинтами 7 і захищені від можливого засмічення перекладками 8 і 9. На правці 3 установлені силові пружини 10 та 11 і натискний диск 12. Необхідна відстань між корпусами 1 і 2 забезпечується перекладкою 13. Оброблення зубчастого колеса 14 виконується на зубофрезерному верстаті зразу після операції чистового зубонарізування наступним чином. Перед обкаткою підтискують пружини 10 і 11, забезпечуючи необхідне зусилля накатування. При цьому корпуси 1 і 2 щільно притиснуті до перекладки 13. Інструмент радіально уводять у

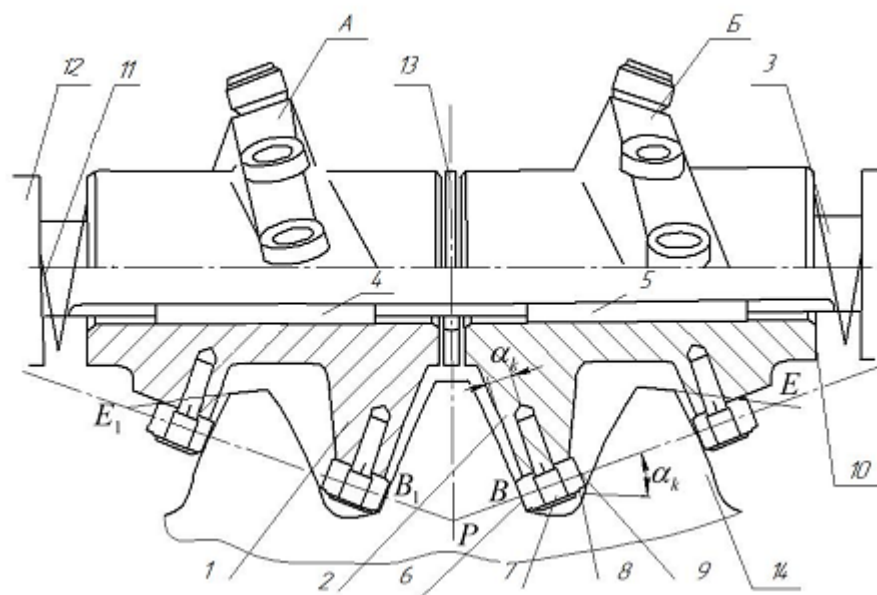
зачеплення з колесом 14 до появи контакту накатних елементів 6 із зубами колеса 14. Пружини 10 і 11 стискаються, і між перекладкою 13 і корпусами 1 і 2 з'являється проміжок, необхідний для зворотно-поступальних рухів корпусів 1 і 2 на плішках 4 та 5.

У процесі накатки (рис. 5.4, б) накатні елементи 6 послідовно, один за одним, контактують із бічними поверхнями зубів колеса 14 за лініями зачеплення BE и B_1E_1 , забезпечуючи повноцінну роботу евольвентного профілю з кожного боку зуба.

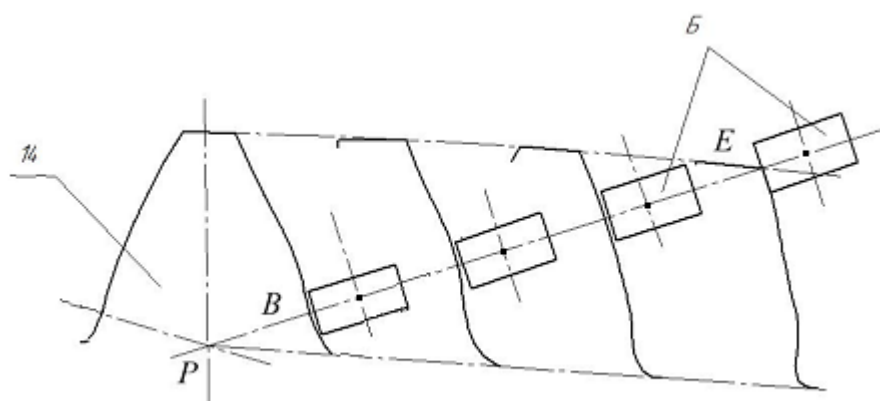
Розглянута конструкція накатника, також, як і черв'ячні фрези з роздільною схемою формоутворення, має обмежене застосування за кількістю обробних зубів. Однак, конструктивно, черв'ячний накатник також може бути виконаним і для оброблення зубчастих коліс за схемою рис. 5.5. У даному випадку це буде універсальним інструментом, придатним для оброблення коліс із будь-якою кількістю зубів. До того ж, на відміну від зубофрезерування, для послідовної обробки правої та лівої бічних поверхонь зубів колеса достатньо одного корпусу черв'ячного накатника.

Застосування черв'ячних накатників дозволяє за рахунок поверхнево-пластичного деформування металу знизити шорсткість бічних поверхонь зубів до $R_a = 1,25 - 2,5$ мкм, а також підвищити поверхневу твердість зубів на 20 - 30%. Це, як відомо, позитивно впливає на експлуатаційні показники зубчастих передач [12, 82].

Для підвищення працездатності зубчастих коліс накатний валець виготовлявся з інструментальних сталей різного призначення, таких як 3ХЗМЗФ, 5ХНМ, 9ХС та Р6М5, що дозволило детально вивчити будову дифузійних шарів, вплив легувальних елементів на мікротвердість, зміну габаритних розмірів, зносостійкість зміцнених деталей після азотування у порошковій суміші [16].



а)



б)

Рисунок 5.4 - Черв'ячний накатник для обробно-зміцнювального оброблення зубчастих коліс ППД: а - загальний вид інструменту; б - схема взаємодії накатного елемента з бічною поверхнею зуба колеса

Зразки досліджуваних сталей мали вигляд циліндрів діаметром 12 мм та висотою 20 мм. Поверхню зразків механічно очищали від слідів окалини, іржі, мастила та інших забруднень. Незначні забруднення видаляли знежиреним бензином. Потім шліфували та полірували поверхню із подальшим знежиренням етиловим спиртом 96 % [16].

Перед азотуванням зразки з досліджуваних сталей, піддавали

попередній термічній обробці: гартуванню з наступним високим відпуском при температурах залежно від марки сталі.

Таблиця 5.3 – Режими термічної обробки та значення твердості сталей до та після об'ємного зміцнення

Марка сталі	Твердість у стані постачання, ГПа	Гартування, °С / середовище охолодження	Твердість після гартування, ГПа	Відпуск, °С / середовище охолодження, год	Твердість після відпуску, ГПа
3Х3МЗФ	2,29–2,45	Підігрів 750, гартування 1040/мастило	5,3–5,5	600 / повітря, 2 год	4,8–4,9
5ХНМ	2,41–2,90	850 / вода-мастило	5,5–5,7	560 / повітря, 2 год	3,7–3,9
9ХС	1,97–2,41	850 / мастило	6,2–6,3	560 / вода, 2 год	4,5–4,7
Р6М5	2,55–2,70	Підігрів 850, гартування 1220/мастило	6,3–6,4	560 (триразове по 1 год) / повітря	6,7–6,8

Азотування зразків проводили в герметичному контейнері із дисперсною порошковою сумішшю, яка містила 95–97 % мелаїну $C_3H_6N_6$ та 3–5 % фтористого натрію NaF [17]. Контейнер зі зразками розташовували у термічній печі. Зміст атомарного азоту у порошковій суміші, а саме у мелаїні 66,67 %, що в 1,7 разів більший, ніж у амоніаку

(до 40 %). Це дозволило прискорити процес насичення поверхні металу порівняно із традиційним газовим азотуванням [17]. Азотування сталей проводили при температурі 550°C упродовж 5 год.

Після хіміко-термічного зміцнення досліджували мікроструктуру дифузійних шарів інструментальних сталей на оптичному мікроскопі МИМ-7 при різних збільшеннях. Травлення поверхні здійснювали 4 % розчином азотної кислоти у етиловому спирті.

Твердість досліджуваних зразків вимірювали на приладі ТК-2 (типу Роквелла). Для вимірювання мікротвердості дифузійних шарів використовували твердомір ПМТ-3 при навантаженні 50 г, 100 г та витримці 15 с згідно з ДСТУ ISO 6507:2009.

Дослідження мікрокрихкості та зносостійкості поверхневих шарів здійснювали після азотування. Мікрокрихкість визначали за виглядом відбитка алмазного індентора, який має форму піраміди із квадратною основою та кутом при вершині 136°.

Зміну габаритних розмірів зразків після обробок визначали за допомогою мікрометра типу МК моделі 102 із точністю $\pm 0,004$ мкм, клас точності Кл. 2 (ДСТУ ГОСТ 6507:2009) за зовнішніми боками циліндричних зразків.

Дослідження матеріалів на зносостійкість здійснювали методом випробування металів на абразивне зношування згідно з ДСТУ 2823-94.

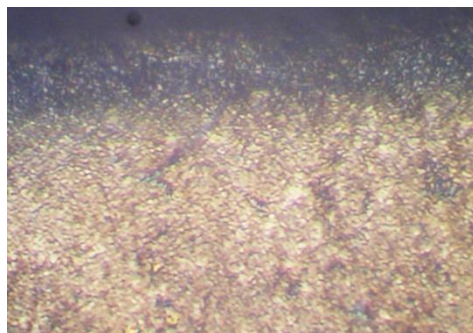
Якісний рентгеноструктурний фазовий аналіз зразків здійснювали на установці ДРОН-3.

Експериментальні дослідження показали, що при насиченні азотом при температурі 550°C на поверхні легованих інструментальних сталей утворюється дифузійний шар, який складається з нітридної зони та підшару α -твердого розчину.

Було встановлено, що нітридна зона складається з ϵ -фази (Fe_{2-3}N) та γ' -фази (Fe_4N). Дифузійний шар являє собою багатofазну зону, яка

складається з нітридів, карбідів, карбонітридів заліза та легувальних елементів [16].

Мікроструктури дифузійних шарів інструментальних сталей, отриманих після зміцнювання в азотовмісному середовищі, наведені на рис. 5.5 і рис. 5.6.



×200

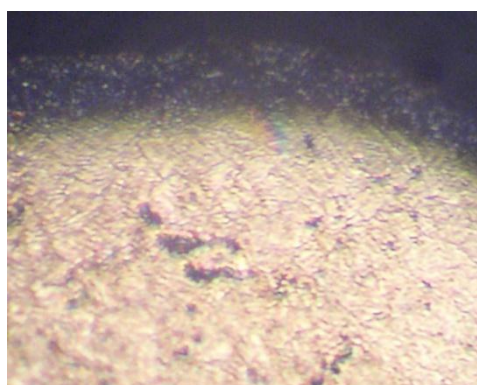
а)



×450

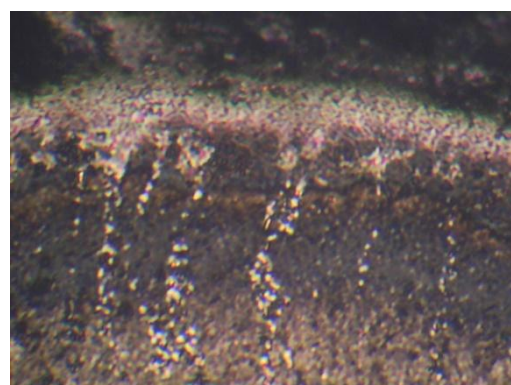
б)

Рисунок 5.5 – Мікроструктури дифузійних шарів інструментальних штампових сталей 5XNM (а) і 3X3M3Ф (б) після азотування [16]



×200

а)



×500

б)

Рисунок 5.6 – Мікроструктури дифузійних шарів інструментальних сталей 9XC (а) и P6M5 (б) після азотування свердел [16]

Якісний фазовий аналіз, якому досліджувані сталі піддавалися після

азотування, як і очікувалося, підтвердив у них наявність нітридів, карбідів та карбонітридів заліза та легувальних елементів.

Дослідження показали, що розроблена технологія азотування накатних інструментальних вальців *б* (Рис. 5.5, а) дозволило зміцнити поверхневі шари у 2 – 3,5 рази без зниження об'ємної міцності матеріалу, що сприяло збереженню високої конструкційної міцності інструментів та деталей машин.

Експериментальні дослідження показали, що азотування у дисперсній порошковій суміші забезпечило високу поверхневу твердість при низькій мікрокрихкості поверхневого шару накатних вальців, що дозволило значно підвищити їх надійність та довговічність. Було встановлено, що хіміко-термічне зміцнювання в азотовмісному середовищі накатних вальців дозволило підвищити їх зносостійкість у 1,3 – 2,5 рази, що, у свою чергу, сприяло значному збільшенню довговічності черв'ячних накатників [16].

5.4 Новий спосіб зубофрезерування фрезами з роздільною схемою формоутворення та перспективні конструкції інструменту

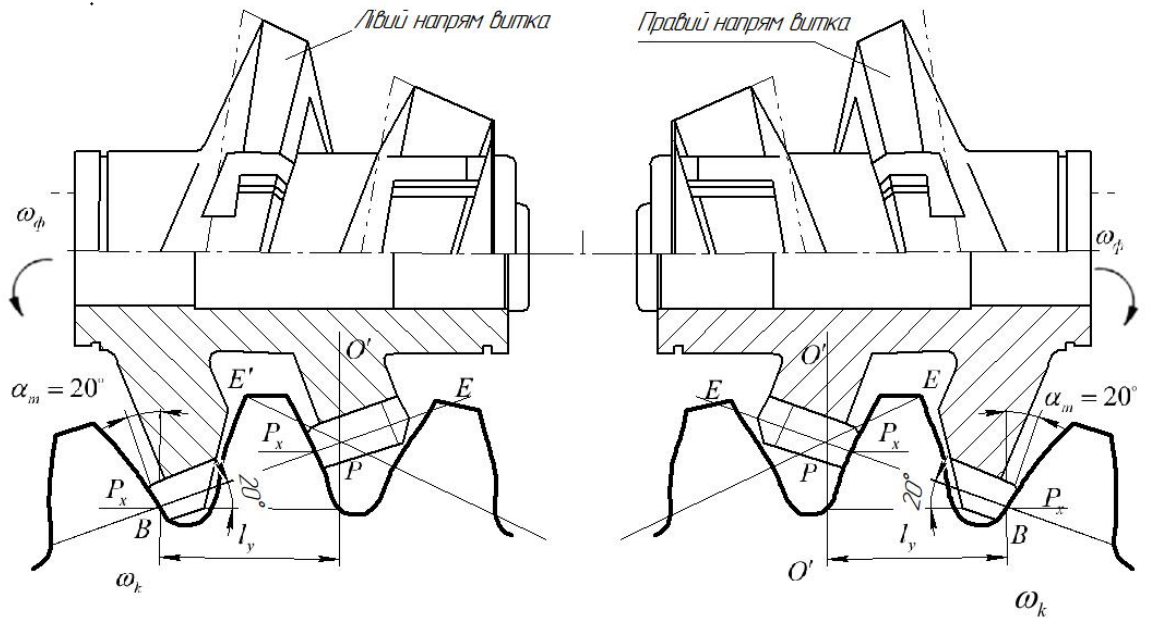
5.4.1 Новий спосіб оброблення зубів черв'ячними фрезами з роздільною схемою формоутворення

Одним з недоліків відомого способу розширення застосовності фрез із роздільною схемою формоутворення, який впливає на якість зачеплення сполучуваних коліс, є неможливість оброблювання одним і тим же інструментом зубчастих коліс, які істотно відрізняються одне від одного за кількістю зубів. Між тим часом, в практиці важкого машинобудування широко використовуються передачі, що містять малозубу шестерню, наприклад, $z = 12 - 40$ та багатозубе колесо, наприклад $z_2 = 60 - 316$. При обробленні таких коліс різними черв'ячними фрезами не буде забезпечуватися ідентичність основного кроку зубів, що, безсумнівно, вплине на якість зачеплення та довговічність зубчастої передачі. Особливо важливе значення для якості зачеплення набуває оброблення одним і тим же інструментом сполученої пари загартованих зубчастих коліс ($HRC > 45$), експлуатаційне припрацювання яких практично виключене [39, 76].

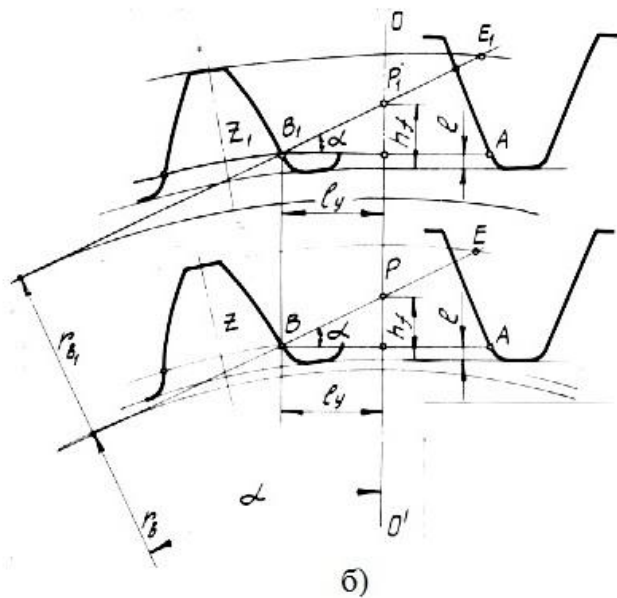
З метою підвищення точності зачеплення сполучених, переважно загартованих, зубчастих коліс і зменшення номенклатури використовуваного інструменту, в даній роботі розроблено новий спосіб оброблення зубів черв'ячними фрезами з роздільною схемою. Цей спосіб дозволяє однією й тією ж фрезою з роздільною схемою формоутворення нарізувати колеса практично з будь-якою кількістю зубів.

Сутність методу полягає в тому, що профільний кут нахилу зубів різання α_k (рис.5.7,а), незалежно від кількості зубів нарізуваного, колеса не змінюється. Обробка правих і лівих бічних поверхонь зубів колеса здійснюється окремо при зміні корпусів фрези на зубофрезерній оправці. Кожний з корпусів устанавлюється на оправці з перетином міжосьового

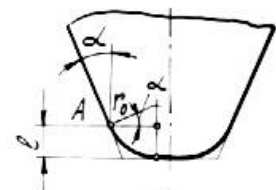
перпендикуляру OO' на відстань l_y , яка визначається точкою В (В') перетину кола r_B нижньої граничної точки евольвенти зубів і лінії верстатного зачеплення BE (B'E').



а)



б)



в)

Рисунок 5.7 – Новий спосіб обробки зубів черв'ячною фрезою з роздільною схемою формоутворення: а - схема установлювання фрези; б - зв'язок установлювальної відстані з кількістю зубів колеса; в - параметри вершини зуба чорнової фрези

На рис. 5.7, б дані графічні побудовання, які показують, що розміри установлювальної відстані l_y не залежать від кількості зубів оброблюваного колеса. величина l_y визначається профільним кутом початкового контуру зубчастої рейки, висотою ніжки зуба h_f і відстанню l від точки А до початку заокруглення головки зуба чорнового інструменту чернетки (див. рис. 5.5, в) до її вершини. Ці параметри залежать тільки від модуля і співвідношення корекції колісних зубів.

Виходячи з рис. 5.7,б установлювальну відстань l_y можна визначити за формулою:

$$l_y = \frac{h_f - l}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{h_f - r_\phi(1 - \sin \alpha)}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (5.1)$$

де r_ϕ - радіус заокруглення зуба чорнової фрези біля вершини.

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

$$l_{yx} = \frac{h_f - xm - l}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{h_f - xm - r_\phi(1 - \sin \alpha)}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (5.2)$$

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

Для коліс із початковим контуром зубчастої рейки згідно з ГОСТ 13755-68, де $\alpha = 20^\circ$; $h_f = 1.25m$, и при $r_\phi = 0,3m$, формули (5.1) і (5.2) спрощуються та мають вид:

$$l_y = 2,892m, \quad (5.3)$$

$$l_{yx} = \frac{m(1,052 - x)}{0,363910}, \quad (5.4)$$

У таблиці 5.4 дані значення установлювальної відстані l_y , які розраховані за формулами (5.3) и (5.4), для модулів, які найчастіше застосовуються у виробництві великомодульних коліс.

Таким чином, по черзі установлюючи зі зміщенням кожний з корпусів, однією фрезою з роздільною схемою можна оброблювати зубчасті колеса з якою завгодно кількістю зубів.

Таблиця 5.4 - Установлювальна відстань l_y , мм

m	При коефіцієнті зміщення X				
	0	+ 0,2	+ 0,4	- 0,2	- 0,4
20	57,84	46,80	35,80	68,60	79,60
24	69,41	56,16	42,96	82,32	95,52
25	72,30	58,50	44,75	85,75	99,50
28	80,98	65,52	50,12	96,04	111,44
30	86,76	70,20	53,70	102,90	119,40
36	104,11	84,24	64,44	123,48	143,28
42	121,46	98,28	75,18	144,06	167,16
50	144,60	117,00	89,5	171,5	199,00
65	187,98	152,10	116,35	222,95	258,7

Зміщення фрези з міжосьового перпендикуляру на розрахункову відстань l_y здійснюється за допомогою спеціального шаблона, встановленого в центрошукач верстату, або за рисою, що нанесена на виток фрези на відстані l_y від першого галтельного зуба.

При відомому способі оброблювання зубів фрези з роздільною схемою формоутворення осьова складова сила різання від лівого корпусу фрези спрямована назустріч напрямку обертання деталі, а від правого корпусу фрези, навпаки, збігається з напрямком обертання деталі. Осьові складові від

обох корпусів фрез спрямовані назустріч один до одного, що забезпечує певне силове замикання всередині інструменту.

За новим способом, коли оброблення зубів колеса проводиться по черзі кожним із корпусів окремо, осьова сила від правого корпусу буде негативно впливати на плавність роботи ділильної черв'ячної пари верстату. Крім того, при відомому способі оброблення знімання припуску лівим корпусом фрези йде в напрямку від ніжки зуба колеса до голівки, а правим корпусом – навпаки, від голівки до ножа. Відмінність у схемах різання є причиною неоднакового за величиною зносу зубів фрези та різної якості оброблення правих і лівих бічних поверхонь зубів колеса.

З метою забезпечення однакових умов обробки як за динамікою різання, так і за схемою зрізування припуску (рис. 5.7), новий спосіб передбачає використання корпусів фрези з протилежним один одному напрямком гвинтового нарізання. Лівий корпус фрези має праве гвинтове нарізання, а правий корпус - ліве гвинтове нарізання. У цьому випадку в процесі оброблення осьові складові сили різання завжди спрямовані назустріч обертанню колеса, а знімання припуску обома колесами йде в одному й тому ж напрямку – від ніжки зуба до його головки. Найбільш раціональною сферою застосування розглянутого способу є лезове оброблення загартованих зубчастих коліс, де діють більші за величиною осьові сили та мають місце значні труднощі, як з виготовленням твердосплавних черв'ячних фрез, так і з забезпеченням необхідної якості виготовлення зубчастих передач.

5.4.2 Двозаходова черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення

З метою забезпечення універсальності інструменту та одночасного оброблення обох бічних поверхонь зубів колеса, розроблена двозаходова черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення [76, 101], яка

відрізняється тим (рис. 5.8,а), що кожний з заходів, який оброблює відповідну бічну поверхню зубів колеса, виконаний як конічний, у протилежному один до одного напрямку, а початки заходів із великими діаметральними розмірами розташовані біля протилежних тірців фрез і зміщені один відносно другого на певний розрахунковий кут.

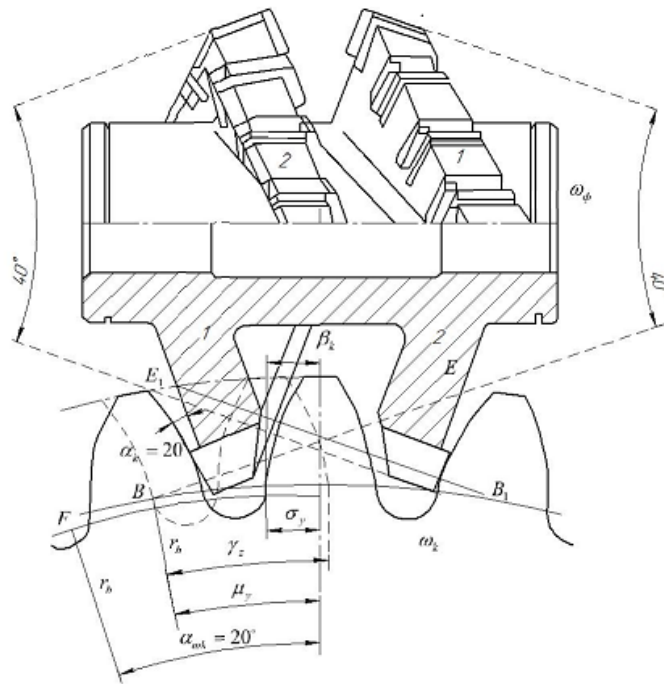
Фреза має однокорпусну конструкцію. Перший захід фрези 1 оброблює праву бічну поверхню зубів колеса уздовж активної ділянки ВЕ верстатної лінії зачеплення FE, другий захід 2 - оброблює ліву бічну поверхню зубів на ділянці В1 Е1. Кут конусу нарізки заходів дорівнює верстатному куту зачеплення α_{ω_k} , в даному випадку $\alpha_{\omega_k} = 20^\circ$. Для забезпечення повного оброблення всіх бічних поверхонь зубів за один прохід кількість зубів оброблюваного колеса не повинна бути кратною кількості заходів фрези. При кількості зубів колеса, що є кратним кількості заходів фрези, необхідно після першого заходу поділити колесо на один кутовий крок зубів і здійснити ще один прохід.

З рис. 5.8, а видно, що обробка нижніх граничних точок В і В₁ евольвентних поверхонь зубів відбувається в моменти, коли зуб колеса, розташований на міжосьовому перпендикулярі, відхилений вліво або вправо на кут β_k .

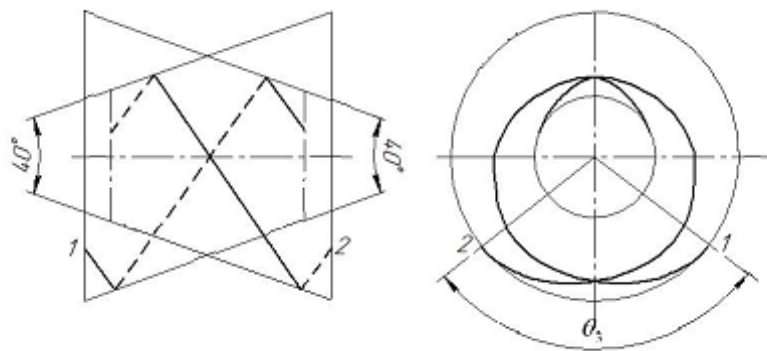
Схема різання фрези є такою, що оброблення протилежних бічних поверхонь зубів колеса відбувається одночасно і ніби «в розпір». Взаємне перекриття заходів вказує на те, що немає такого проміжку часу, під час якого працював би один із двох заходів. Це забезпечує силове замикання осьових складових сил різання всередині інструменту.

При обробці зубчастих коліс двозаходовими черв'ячними фрезами стандартної конструкції кількість різів зубів, що профілюють евольвентну поверхню зуба, зменшується в 2 рази, Двозаходові черв'ячні фрези з роздільною схемою формоутворення забезпечують отримання такої ж кількості профілюючих різів, як і стандартні однозаходові фрези, завдяки

тому, що в однозаходовому виконанні вони мають, у порівнянні зі стандартними фрезами, в 1,6 - рази більшу кількість зубів.



а)



б)

Рисунок 5.8 – Двозаходова черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення: а – загальний вигляд фрези; б – схема розташування заходів

Описані універсальні конструкції черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення можуть бути спрофільованими на основі евольвентного черв'яка. Необхідність такого профілювання виникає як при остаточному лезовому обробленні загартованих зубчастих коліс з метою

зниження шуму і підвищення плавності роботи передачі, так і при попередньому лезовому обробленні зубів під наступне зубошліфування. На зубошліфувальному верстаті абразивний інструмент у верстатному зачепленні із заготовкою відтворює теоретично точну евольвенту. Наближення профілю зубів колеса до теоретичного евольвентного вже на стадії попереднього лезового оброблювання дозволяє значно скоротити час низькопродуктивної зубошліфувальної операції.

5.4.3 Черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення з поворотними непереточуваними різальними елементами

З метою підвищення сумарної розмірної стійкості та економічності інструменту розроблено конструкцію черв'ячної фрези з роздільною схемою формоутворення з поворотними непереточуваними різальними елементами. На рис. 5.7, а показаний один із корпусів фрези. Для зручності виконання розточень під різальні елементи - вальці кожний із корпусів фрез складений із двох одновиткових блоків [39, 71, 76]. Вальці мають дві кругові кромки і встановлені в корпусі з забезпеченням необхідних передніх і задніх кутів різання. Проекція кругової різальної кромки на осьову площину співпадає з профілем бічної поверхні зуба інструментальної рейки, тобто вона розташована під кутом α_k . За мірою зносу різальної кромки, обертаючи ролик навколо осі, можна ввести в процес різання нову ділянку кругової кромки, а при повному затупленні однієї кромки ролик переналагоджують на іншу сторону і до роботи залучають іншу кромку. Це значно збільшує сумарну розмірну стійкість інструменту.

На рис. 5.9, б показано послідовне накладення двох проекцій кругової різальної кромки вальця на поверхню зуба, що обробляється, з утворенням гребінця висотою h_f .

Розглянута конструкція черв'ячної фрези є досить перспективною у випадку оснащення інструменту твердим сплавом. Як відомо,

напаювання (спаивание) твердосплавних пластин до держалець із конструкційної сталі призводить до структурних змін у твердому сплаві, знижує механічну міцність пластин, а також викликає внутрішні напруги в сплаві.

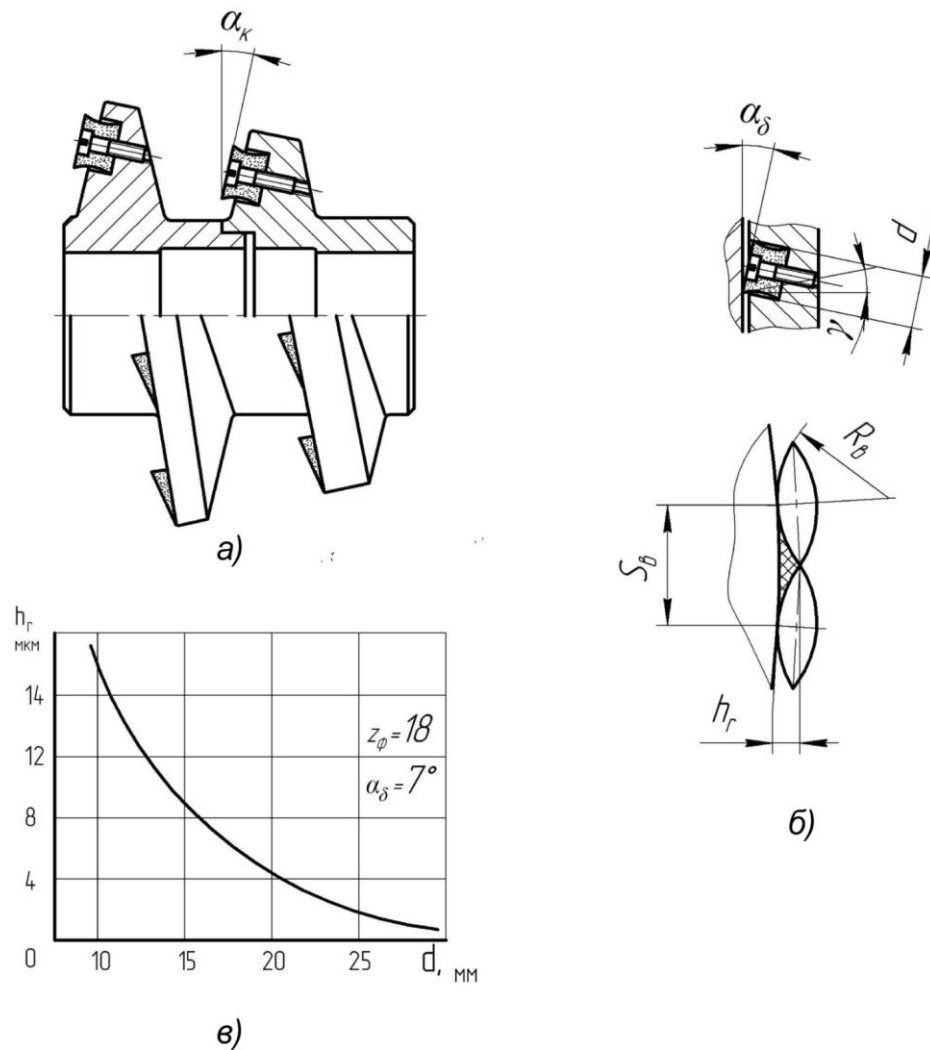


Рисунок 5.9 – Черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення з поворотними непереточуваними різальними елементами – вальцями; а - загальний вигляд правого корпусу фрези; б - утворення гребінця нерівності в процесі обкатування зуба колеса; в - залежність висоти нерівностей від діаметру різального елемента – вальця

Це призводить до появи мікротріщин при заточуванні зубів та їх викришуванню в процесі роботи фрези. Тому оснащення черв'ячних фрез твердосплавними непереточуваними пластинами слід розглядати як один із

шляхів підвищення стійкості інструменту. запропонованої конструкції надзвичайно економічні, оскільки не вимагають для своєї експлуатації спеціальних заточувальних верстатів.

5. Висновки за розділом 5

Встановлено, що величина хвилястості значною мірою залежить від вібрацій системи ВПД, які ростуть зі збільшенням режимів різання. Особливу увагу слід приділити регулюванню проміжку в ділильній черв'ячній парі верстату, оскільки його розмір визначає вібраційну стійкість машинного столу верстату з деталями.

Вібраційна стійкість знижується зі збільшенням швидкості оброблення. В діапазоні подач 3 - 6 мм/об і швидкостей різання 10 - 30 м/хв хвилястість при обробленні фрезою з роздільною схемою формоутворення в 1,5 - 2 рази менше, ніж при обробці стандартною фрезою. Це пояснюється кращою геометрією різальної частини і схемою різання нового інструменту, які зменшують сили різання. Реальна хвилястість у 2 - 4 рази перевищує розрахункову. Хвилястість збільшується зі зростанням швидкості оброблення.

Отримана залежність для визначення величини хвилі під час різних режимів різання. При продуктивності нарізання в 1,8 - 2 рази вищій точність оброблення евольвентної поверхні зубів фрезами з роздільною схемою формоутворення вище, ніж при застосуванні стандартних фрез.

Процес різання фрезами з роздільною схемою формоутворення у порівнянні зі стандартними фрезами відбувається в більш сприятливих умовах, про що свідчить менша глибина наклепу поверхневого шару оброблених зубів. Наклеп зменшує хвилястість і шорсткість обробленої поверхні. В умовах, що розглядаються, це зменшення склало 8 - 10 мкм.

Загальний стан поверхні, обробленої черв'ячними фрезами, свідчить про вирішальний вплив наросту на шорсткість. Однією з найбільш вірогідних причин нестабільності формування наростоутворення при обкатному

зубофрезеруванні, крім перервності процесу різання і змінності товщин різаних шарів, вочевидь, слід вважати складність кінематики взаємних поділів заготовки інструменту.

Складність взаємних переміщень викликає зміну напрямку дії сил на передніх поверхнях зубів інструменту, що сприяє зриву наросту.

Проковзування частинок наросту на задню грань зубів фрези внаслідок вібрацій системи ВПД супроводжується їх адгезійним зчепленням із інструментальним матеріалом, що у подальшому погіршує стан оброблюваної поверхні.

Визначено вплив розміру заднього кута зубів фрези на інтенсивність проковзування наросту. Оптимальна величина заднього кута, при якій проковзування наросту є мінімальним, становить 5° - 7° .

За наявності на зубах гвинтової стрічки неможливо отримати шорсткість оброблення зубів менше 20 мкм. У діапазоні подач 2 - 4 мм/об і швидкостей різання 10 – 30 м/хв шорсткість поверхні, обробленої стандартною фрезою та фрезою з роздільною схемою формоутворення практично однакова.

Одночасно, при заданій шорсткості оброблення в межах 20 - 40 мкм швидкість різання при роботі фрезою з роздільною схемою формоутворення може бути збільшеною в 1,5 рази.

Віб्राції, які збільшуються зі зростанням швидкості різання, посилюють нестабільність наростоутворення, що сприяє зростанню шорсткості обробки.

Отримано формулу, що характеризує залежність висоти мікронерівностей від режимів різання.

З метою зниження шорсткості обробленої поверхні та підвищення поверхневої твердості зубів запропонований черв'ячний накатник для оброблення зубів ППД.

Встановлено вплив способу профілювання черв'ячної фрези на точність профілю зубів оброблених коліс.

Точність обробки зубів архімедовою фрезою з роздільною схемою формоутворення, яка є спрофільованою за середньою точкою робочої ділянки профілю основного евольвентного черв'яка, вища, ніж при обробленні стандартною архімедовою фрезою і знаходиться в межах 8-го ступеня точності.

Найточніше оброблення профілю зубів у розглянутих умовах, за 7-им ступенем точності, забезпечила евольвентна черв'ячна фреза з роздільною схемою формоутворення, яка не має органічних похибок профілювання.

Зі збільшенням режимів різання зростають деформації системи ВПД, а точність передач знижується. Вплив швидкості різання на точність обробки зубів є сильнішим, ніж вплив подачі.

З підвищенням швидкості різання збільшується нерівномірність обертання верстатного столу з заготовкою, що призводить до зростання похибок оброблення. При нарізуванні зубів фрезою з роздільною схемою формоутворення отримані менші похибки оброблення, ніж при нарізуванні стандартною фрезою, що пояснюється меншими силами різання, а відповідно і меншими деформаціями системи ВПД.

Отримано узагальнені залежності для визначення параметрів точності оброблених зубчастих коліс, в залежності від режимів різання. Граничні режими різання фрезою з роздільною схемою формоутворення, при яких забезпечується 8-й ступінь точності оброблення, дозволяють підвищити продуктивність зубонарізання в 2,8 рази в порівнянні зі стандартними фрезами. Точність оброблених зубчастих коліс значною мірою визначається станом зубофрезерного верстату, і перш за все - станом його ділильної черв'ячної пари.

На основі лабораторних і виробничих досліджень розроблені рекомендації щодо режимів різання фрезою з роздільною схемою формоутворення при обробці великомодульних коліс з урахуванням заокруглення різального леза. Розроблені режими різання є кращими за режими, рекомендовані відомою нормативно-технічною документацією, та

дозволяють, без зниження якості оброблення, підвищити продуктивність чистового зубофрезерування великомодульних коліс методом обкатування в 2 рази.

З метою підвищення точності зачеплення переважно загартованих зубчастих коліс, що сполучуються, шляхом їх обробки одним інструментом і зменшення номенклатури застосовуваних фрез запропоновано новий спосіб нарізання зубів черв'ячною фрезою з роздільною схемою формоутворення з профільним кутом зубів 20° .

Розроблено методику розрахунку установлювальної відстані корпусів фрези. Показано, що розмір установлювальної відстані не залежить від кількості зубів обробного колеса, а є функцією модулю і коефіцієнту зміщення вихідного контуру інструментальної рейки.

Запропоновано та проаналізовано нові конструкції черв'ячної фрези з роздільною схемою формоутворення – двозахідна фреза та фреза з непереточуваними різальними елементами. Нові технічні рішення ляжуть у основу подальших пошуків у сфері вдосконалення виготовлення великомодульних зубчастих коліс.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

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

1. Проведено дослідження схеми різання та завантаження зубів фрези в контактному полі різання; траєкторій руху зубів фрези та їх впливу на товщину зрізуваних шарів, знос інструменту і якість обробленої поверхні.

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

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

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

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

наклепу поверхневого шару оброблених зубів.

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

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

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abon - Aly M. Die Bestimmung der wahren Berurungsfläche zweier Rauher Oberflächen und der Anderugn einiger statistischen Parameter in obhan - gjgkeit von der Belastung / M. Abon-Aly // Dissertation von der Fakultat für Maschinenbau und Elektroiechnik der Technischen Universitai zu Braunschweig. – 1972. – S. 185.
2. Arana A. Partial friction EHLcoefficient model to predict power losses in cylindrcial gears / A. Arana, J. Larranaga, I. Ulacia - Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J. - Journal of Engineering Tribology, 2019. – Vol. 233 (2) – P. 303 – 316.
3. Artoni A. A methodology for simulation - based multiobjective gear design optimization / A. Artoni.- Mech. Mach. Theory - 133 (2019) – P. 95 – 111.
4. Bolz. Lintstehung und Beiuiussuug augespautu flachen / Bolz // Fertigung. – 1972. – № 6. – P. 163–169.
5. Chang L. Modeling and analysis of the meshing losses of involute spur gears in high-speed and high - load conditions / L. Chang, Y. R. Jeng, P. Y. Huang // ASME . Journal of Engineering Tribology , 2013. - 135 (1) – 1 – 11.
6. Clarke A. Effects of profile errors on lubrication performance of helical gears / A. Clarke, H. U. Jamali, K. J. Shariff, H. P. Evans, B. Shaw - Journal of Engineering Tribology, 2017. - 111 – P. 184 – 191.
7. Czerniec M. Computer Simulation of the Impact of Optimization of Width in the Helical Cylindrical Gear on Bearing and Durability. Part 1. Height Correction of the Gear Profile / M. Czerniec, J. Kielbiński, J. Czerniec. // Advances in Science and Technology. Research Journal, 2019. – 13 (1) – P. 52 – 59.
8. Diez – Ibarbia A. De - Juan A. Assessment of load dependent friction coefficients and their influence on spur gear efficiency / A. Diez - Ibarbia, A. Fernandez – Del - Rincon, P. Garcia, A. De - Juan – Meccanica, 2018. – 53 (1 –

2) (2018) – P. 425 – 445.

9. Gavranovic S. Topology optimization using GPGPU / S. Gavranovic, D. Hartmann, U. Wever // EUROGEN, September, 14 – 16. - Glasgow, UK, 2015.

10. Holmquist T.J., Johnson G.R., Determination of constants and comparison of results or various constitutive models, Journal de Physique, vol. 1, Issue 3, France 1991 – P. 853 – 860.

11. Jian K. Optimization Design of a Gear Profile Based on Governing Equations / K. Jian, Z. Li - Ping , Y. Wen - Qiang // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013. – 5 (19) - P. 4780 - 4784.

12. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Analytical approach to determination of surface strengthening of chevron gears // Вісник Тернопільського національного технічного університету - Тернопіль: ТНТУ, 2021. – том № 2 (102). - С. 5 - 10

13. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Modern methods of gear milling of hardened large-module gears / Kateryna Kamchatna - Stepanova, Oleksandr Klochko // Periodyk Naukowy Akademii Polonijnej - Czestochowa, Poland, 2020. - № 6 (43). - С. 312 – 324.

14. Kamchatna – Stepanova K. Influence of waviness parameters on the operational properties of cylindrical large-modular gears / K. Kamchatna - Stepanova, A. Klochko, A. Naydenko, A. Manokhin // International journal of engineering and advanced technology studies. - London. United Kingdom, 2021. – Vol. 9, Issue 1. – № 9. - P. 30 – 37.

15. Klochko A. Современные методы технологии формообразования крупномодульных зубчатых колес / A. Klochko, A. Skorkin, K. Kamchatna - Stepanova, E. Starchenko, M. Ishchenko // Znanstvena misel journal - Ljubljana, Slovenia, 2020. - № 48. – С. 25 - 26.

16. Kostyk Kateryna. Ensuring the High Strength Characteristics of the Surface Layers of Steel Products / Kateryna Kostyk, Viktoriia Kostyk, Oleg Akimov, Kateryna Kamchatna - Stepanova, Yurii Shyrokyi // Lecture Notes in

Mechanical Engineering - Germany: Springer Verlag, 2021. – C. 211 – 216.

17. Kostyk V. O. Increase of operational properties of tools and machine parts nitriding the powder mixture. / V. O Kostyk, K. O. Kostyk ., V. D. Kovalov , R. Turmanidze., P. Dašić // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019 – 568 (1) 012118. - P. 1 - 6.

18. Liu M., Zhu C., Liu H., Ding H., Sun Z. Effects of working conditions in TEHL performances of a helical gear pair with non - Newtonian fluids / M. Liu, C. Zhu, H. Liu, H. Ding, Z. Sun // ASMEJ. Journal of Tribology, 2014. – B. 136 – P. 1 – 9.

19. Kaneta M. Pressure increase in elliptical impact elastohydrodynamic lubrication contacts with longitudinal asperities / M. Kaneta, F. Guo, J. Wang, I. Krupka, M. Hartl // ASME. Journal of Engineering Tribology, 2013.- 135 (1) - P. 1 – 6.

20. Li S. A thermal tribo - dynamic mechanical power loss model for spur gear pairs / S. Li // Journal of Engineering Tribology, 2015. - Int. 88 – P. 170 – 178.

21. Li S. Influence of dynamic behaviour on elastohydrodynamic lubrication of spur gears / S. Li, A. Kahraman // Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Journal of Engineering Tribology, 2011. - 225 – P. 740 – 753.

22. Masjedi M. On the effect of surface roughness in point - contact EHL: formulas for film thickness and asperity load / M. Masjedi, M. M. Khonsari // Journal of Engineering Tribology, 2015. - 82 - P. 228 – 244.

23. Mohammadkhani R. Optimizing Helical Gear Profile for Decreasing Gearbox Noise / R. Mohammadkhani, D. Nemati, B. Babaei // Journal of Basic and Applied Research International, 2012. - 2 – P. 6685 - 6693.

24. Imai N. Effects of texture patterns on hydrodynamic and mixed lubrication characteristics / N. Imai, T. Kato // Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Journal of Engineering Tribology, 2013.- 227 - P. 898–904.

25. Naik K. N. Static Analysis Bending Stress on Gear Tooth Profile By Variation of Gear Parameters With The Help of FEA / K. N. Naik, D. Dolas // International Journal of Engineering Research & Technology, 2014. - 3(6) –

P. 132 - 136.

26. Patil M. Multi - objective optimization of two stage spur gearbox using NSGA - II / M. Patil, P. Ramkumar, S. Krishnapillai // SAE. Int. Indian Inst. Technol. Chennai, 2017.

27. Ramadani R. Topology optimization based design of lightweight and low vibration gear bodies. / R. Ramadani, A. Belsak ., Kegl M., Predan J., Pehan S. // International Journal of Simulation Modelling, 2018. - 17(1) – p. 92 - 104.

28. Sekar P. R. A mixed finite element and analytical method to predict load, mechanical power loss and improved efficiency in non - standard spur gear drives /P. R. Sekar., E. V. Geo, L. J. Martin // Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Journal of Engineering Tribology, 2017. - 231 – p. 1408 – 1424.

29. Senthilkumaar J. S. Selection of machining parameters based on the analysis of surface roughness and flank wear in finish turning and facing of Inconel 718 using Taguchi technique / J. S. Senthilkumaar, P. Selvarani, R. M. Arunachalam // Emirates Journal for Engineering Research, 2010. – 15 (2). - P. 7 - 14.

30. Shaida Shaik Johny, Rajasekhara Babu K. Prediction of surface roughness in hard turning by using fuzzy logic / Johny Shaida Shaik, K. Rajasekhara Babu. // International Journal of Emerging trends in Engineering and Development, 2012. – Issue 2, Vol. 5 - P. 38 - 49.

31. Singh. V. Finite element analysis of a spur gear tooth using ANSYS and stress reduction by stress relief hole / V. Singh, S. Chauhan, A. Kumar // Int. J. Emerging Trends Eng. Development, 2012. - 6 – P. 491 - 495.

32. Sudhansu Ranjan Das. Effect of Machining Parameters on Surface Roughness in Machining of Hardened AISI 4340 Steel Using Coated Carbide Inserts / Das Sudhansu Ranjan, Amaresh Kumar, Debabrata Dhupal // International Journal of Innovation and Applied Studies, 2013. - Vol. 2, No. 4. -P. 445 - 453.

33. Shah. C. Optimizing weight of a Gear using Topology Optimization / C. Shah, S. Thigale, R. Shah // International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 2018. – 7 (6) – P. 403 - 406.

34. 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. – № 3 (3). – P. 59 – 70.
35. Qiu P. Optimum microgeometry modifications of herringbone gear by means of fitness predicted genetic algorithm / P. Qiu, N. Zhao, F. Wang // Journal of Vibroengineering, 2016. - 18 (8) – P. 4964 – 4979.
36. Yan X. L. Influence of roughness parameters skewness and kurtosis on fatigue life under mixed elastohydrodynamic lubrication point contacts / X. L. Yan, X. L. Wang, Y. Y. Zhang // ASME. Journal of Engineering Tribology, 2014. – 136 (3) – P. 1 – 7
37. Zhang J. Optimization design on dynamic load sharing performance for an in - wheel motor speed reducer based on genetic algorithm / J. Zhang, X. Qin, C. Xie, H. Chen // Mechanism and Machine Theory, 2018. – 122 – P. 132 – 147.
38. Адам Я. И. Применение зубообрабатывающего инструмента из быстрорежущих сталей для обработки зубьев повышенной твердости / Я. И. Адам, Г. Г. Овумян // Усовершенствование зубообрабатывающего инструмента. – М., 1969. – С. 150 – 156.
39. Анділахай О. О. Технологічні засоби обробки крупногабаритних евольвентних шліцевих з'єднань з модифікацією зуборізного інструменту / О. О. Анділахай, О. О. Клочко, К. В. Камчатна - Степанова, О. П. Старченко // Наука та виробництво. Машинобудування і зварювальне виробництво. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2019. – № 20. – С. 53 - 66.
40. Базров Б. М. Основы технологии машиностроения / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.
41. Базров Б. М. Модульная технология в машиностроении / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.
42. Беловол А. В. Имитационное моделирование в задачах

машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 1: / А. В. Беловол, А. А. Ключко, Е. В. Набока, А. О. Скоркин, А. Н. Шелковой, под редакцией А. Н. Шелкового // Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – 400 с.

43. Витренко В. А. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами колес для транспортных машин / В. А. Витренко, И. А. Кириченко // Збірник наукових праць. – Луганськ: Вид-во СУДУ, 1998. – С. 54 – 59.

44. 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.

45. Воронцов Б. С., Богомаз П. В., Технологія термічного зміцнення зубчастих коліс / Б. С. Воронцов, П. В. Богомаз // Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації. Матеріали Міжнародної науково - практичної інтернет - конференції: Зб. наук. праць. – Переяслав - Хмельницький, 2019. — С. 426 – 428.

46. Воронцов Б.С. Сокращение сроков технологической подготовки производства зубчатых колес на базе компьютерно-интегрированной системы / В.А. Пасічник, Б.С. Воронцов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: XV міжнар. наук.–техн. конф., 04 червня – 07 червня 2017 р.: тези доп. – Краматорськ: ДДМА, 2019. —С. 97.

47. Заблонский К. И. Влияние погрешностей изготовления на концентрацию нагрузки в зацепления с учетом конструкция передачи / К. И. Заблонский [и др.] // Детали машин : сборник. – К. : Техника, 1974. – № 19. – 126 с.

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

49. Гасанов М. І. Технологічний регламент оптимізації систем відновлення функціональних властивостей великогабаритних відкритих зубчатих передач / М. І. Гасанов, О. О. Ключко, О. Ю. Заковоротний, Є. В. Пермінов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Технології в машинобудуванні.» - Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) 2018. – С. 107 – 112. – ISSN 2079-004X.
50. Гинзбург, Е. Г., Халебский Н. Т. Производство зубчатых колес / Е. Г. Гинзбург, Н. Т. Халебский. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 136 с.
51. Гинзбург Е. Г., Голованов Н. Ф., Фирун Н. Б., Халебский Н. Т. Зубчатые передачи / 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.
52. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В. Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1977. – 479 с.
53. 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.
54. ГОСТ 20736 - 75. Статистический приемочный контроль по количественному признаку. Планы контроля. – Введ. 01.01.76. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 120 с.
55. Грицай, І. Є. Удосконалення технології виготовлення зубчастих коліс на основі нового методу зубонарізання / Грицай І. Є., Вільшанецький В. І. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», зб. наук. пр. Темат. вип.: Проблеми механічного приводу. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – № 28. – С. 44 - 52.
56. Демкин Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рыжов. – М., 1981. – 244 с.
57. Драчев О. И. Управление технологической наследственностью деталей малой жесткости / О. И. Драчев. – Ирбит: ОНИКС, 2011. – 192 с.

58. Драчев О. И., А. Н. Кравцов Автоматическое управление процессом точения маложестких деталей / О. И. Драчев, А. Н. Кравцов // Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроении / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева. - ВолгГТУ - Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 – 250 с.

59. Дроздов, Ю. Н. К расчету зубчатых передач на износ / Ю. Н. Дроздов - Машиноведение, 1969. – № 2. – С. 84 – 88.

60. Жигалко Н. И., Киселев В. В. Проектирование и производство режущих инструментов / Н. И. Жигалко, В. В. Киселев. – Минск: Высшейш. школа, 1975. – 399 с.

61. Жуков К. П. Расчеты и проектирование деталей машин / К. П. Жуков [и др.]. – М.: Высшая школа, 1978. – 247 с.

62. Заковоротний О. Ю. Підвищення точності, якості та продуктивності обробки крупногабаритних евольвентних шліцевих поверхонь / О. Ю. Заковоротний, О. О. Клочко, О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова, О. А. Анциферова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково - практичної конференції 04 - 07 липня 2019 р. / за заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2019, - С. 36 - 37.

63. Иноземцев, Г. Г. Проектирование металлорежущих инструментов / Г. Г. Иноземцев. – М.: Машиностроение, 1984. – 272 с.

64. Ионак, В. Ф. Приборы кинематического контроля / В. Ф. Ионак. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.

65. Инженерия поверхностей деталей / Колл. авт.; под ред. А. Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.

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

67. Камчатная - Степанова Е. В. Перспективные схемы

зубофрезерования крупномодульных закаленных шевронных колес с раздельной схемой формообразования // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVIII Міжнародної науково - технічної конференції 21 - 24 грудня 2020 р. / за заг. редакцією В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2020. - С. 36.

68. Кане М. М. Управление качеством продукции машиностроения / М. М. Кане, А.Г. Суслов, О. А. Горленко и др. под общ. ред. д.т.н. М. М. Кане. – М.: Машиностроение, 2010. – 416 с.

69. Клебанов Б. М. Зубчатые передачи в машиностроении / Б. М. Клебанов, А. Е. Гинзбург. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1978. – 120 с.

70. Клочко Ю. А. Анализ механизмов реализации производственной деятельности промышленного предприятия / Ю. А. Клочко, Е. В. Камчатная - Степанова, Н. Г. Сикетина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4 (1113). – С. 76 – 78.

71. Клочко А. А. Влияние технологического воздействия на обеспечение эксплуатационных свойств тяжело нагруженных крупномодульных закаленных шевронных зубчатых колес / А. А. Клочко, О. А. Анциферова, Е. В. Камчатная - Степанова // Інформатика, управління та штучний інтелект. Матеріали шостої міжнародної науково - технічної конференції (27 - 29 листопада 2019 року). Харків - Краматорськ – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – С. 50 - 51.

72. Клочко А. А. Влияние точностных параметров зубчатых колес вертикально - фрезерных обрабатывающих центров на их динамическую устойчивость / А. А. Клочко, И. Г. Годзула // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – Вып. 35. – С. 31 – 35.

73. Клочко Ю. А. Моделирование синергетических стратегий развития производственно - экономических систем. [Монографія] /

Ю. А. Клочко, Е. В. Камчатная - Степанова, Н. Г. Сикетина, И. Н. Кравцов. // Донбасская государственная машиностроительная академия, - Краматорск: ДГМА; Ирбит; НИКС, 2015. – 221 с.

74. Клочко А. А. Повышение надежности зубчатых передач тяжелых токарных станков путем моделирования процесса формообразования состояния поверхностного слоя крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Клочко, В. А. Чмырь // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – Вып. 35. – С. 48 – 54.

75. Клочко А. А. Предпосылки исследования новых направлений комбинированного формообразования поверхностного слоя зубчатых колес / А. А. Клочко, С. В. Рябченко, О. А. Анцыферова, Е. В. Перминов // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня - 01 липня 2017 року. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2017. – Т. 4. – С. 346 – 347.

76. Клочко А. А. Технологические методы скоростного зубофрезерования крупномодульных шевронных зубчатых колес / А. А. Клочко, Е. В. Басова, Е. В. Камчатная - Степанова // Праці XXIX Міжнародної конференції «Нові технології в машинобудуванні», 2 - 8 вересня 2019 р. – Коблево – Харків: НАКУ «ХАІ», 2019. – С. 7.

77. Клочко А. А. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес. [Монографія] / А. А. Клочко [и др.]. – Краматорск: ДГМА, 2014. – 479 с.

78. Клочко А. А. Технологические особенности зубообработки закаленных колес одношпиндельной и двухшпиндельной схемой резания / А. А. Клочко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 42 (1085). – С. 167 – 173.

79. Ключко А. А. Технология ремонта и восстановления крупномодульных закаленных зубчатых колес методом высокоскоростной лезвийной обработки / А. А. Ключко, А. Н. Шелковой, В. Ф. Шаповалов, А. В. Беловол, О. А. Анциферова // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – Харків. 2017. – № 2 (2). – С. 38 – 47.

80. Ключко А. А. Технология чистовой лезвийной обработки крупномодульных закаленных зубчатых колес / А. А. Ключко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки» – Чернігів, 2011. – № 2(49). – С. 58–68.

81. Ключко А. А. Уникальные технологические приемы зубофрезерования крупномодульных цилиндрических зубчатых колес / А. А. Ключко, А. О. Скоркин, Е. П. Старченко, Г. И. Ищенко, Е. В. Перминов // Research and Science. – Banská Bystrica. Slovakia. №13, 2020.- С. 19 – 24.

82. Ключко О. О. / Управління технологічним процесом обробки великогабаритних ЕШЗ з модифікованим профілем / О. О. Ключко, О. О. Анциферова, К. В. Камчатна - Степанова, О. П. Старченко // Інформатика, управління та штучний інтелект, Харків - Краматорськ, 17 - 19 листопада 2020, Тези сьомої міжнародної науково-технічної конференції. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. - С. 33.

83. 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 Всесоюзной научно - технической конференции – Одесса, 1990. – С. 86.

84. Ключко О. О. Чистове нарізання загартованих шевронних коліс обкатувальними різцями / О. О. Ключко., О. О. Анциферова, К. В. Камчатна - Степанова, Я. С. Антоненко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVIII Міжнародної науково - технічної конференції 21 - 24 грудня 2020 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2020.- С. 45

85. Ковалев В. Д. Исследование гидродинамических свойств

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

86. Кобельник В. Р. Обґрунтування геометричних параметрів токарних різців для напівчистового оброблення архімедових черв'яків великих модулів / П. Д. Кривий, В. Р. Кобельник, О. В. Литвин, І. Р. Петrenchко // Матеріали Міжнародної науково - технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 60 - річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175 - річчя з дня народження Івана Пулюя, 14 - 15 травня 2020 року. — Тернопіль: ТНТУ, 2020. — С. 85 – 86.

87. 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 физико - химии процессов резания, абразивной обработки и поверхностного пластического деформирования: материалы Международной научно - практической конференции, 14 – 16 мая 2002 г. Киев, Институт сверхтвердых материалов Киев, 2002. С. 20 24.

88. 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.

89. Ларин М. Н. Основы фрезерования / М. Н. Ларин. – М. : Машгиз, 1947. – 302 с.

90. Мазур М. П. Основи теорії різання матеріалів / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, В. Л. Доброскок, В. О. Залога, Ю. К. Новосьолов,

Ф. Я. Якубов; під заг. ред. М. П. Мазура. – 2 - е вид. перероб. і доп. – Львів: Новий світ - 2000, 2011. – 422 с.

91. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М. : 1976. – 278 с.

92. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / А. А. Маталин. – К., 1971. – 140 с.

93. Маталин А. А. Технология механической обработки / А. А. Маталин. – Л., 1977. – 460 с.

94. Маталин А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.

95. Мироненко Е. В. Информационное моделирование технологических процессов зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Д. Кошелева, И. Г. Годзула // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали одинадцятої Міжнародної науково – технічної конференції, 4 – 6 червня 2013 р. / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2013. – С. 83.

96. Мироненко Е. В. Конструкторско-технологические способы повышения производительности и качества зубообработки крупногабаритных зубчатых венцов / Е. В. Мироненко, В. Ф. Шаповалов, А. А. Клочко, С. Ю. Палашек, Е. В. Остапович // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Технології в машинобудуванні.» – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4 (1113). – С. 28 – 32.

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

98. Мироненко Е. В. Проблемы поляризационного технического контроля в машиностроении / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали II Міжнародної науково – практичної конференції, 1 – 3 червня 2004 р. – Краматорськ: ДДМА, 2004. – С. 58.

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

100. Мироненко Е. В. Исследование влияния параметров волнистости на эксплуатационные свойства цилиндрических крупномодульных зубчатых колес / Е. В. Мироненко, А. А. Клочко, А. Н. Шелковой, А. А. Ярошенко, С. Ю. Палашек // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем: сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2014. – Вып. 34. – С. 19 – 25.

101. Новиков Ф. В. Анализ перспективных технологических схем зубофрезерования крупномодульных шевронных закаленных колес / Ф. В. Новиков, А. А. Клочко, Е. В. Камчатная - Степанова и др. // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо - и энергосбережении: материалы международной научно-технической конференции, 16 - 18 мая 2019г. – Одесса: ОНПУ, 2019. - С. 124 – 129.

102. Новіков Ф. В. Математична модель теплонапруженості процесу імпульсного переривчастого шліфування / Ф. В. Новіков, О. О. Клочко, О. А. Охріменко, О. О. Анциферова, Є. В. Басова // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія «Технології в машинобудуванні» Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 6 (1282) – С. 127 – 132.

103. Овумян Г. Г. Совершенствование технологических процессов зубообработки / Г. Г. Овумян // Энергомашиностроение. – 1984. – № 7. – С. 15 – 17.

104. Онищенко В. П. Математическая модель процесса износа рабочих поверхностей зубьев зубчатых колес / В. П. Онищенко // XIII

Miedzynarodowe Kolokwium «Modele projektowania i konstruowania maszyn» 25 - 28.04.1989, Zakopane. Zeszyty naukowe Politechniki Slaskiej. Mechanika, Z.92, Gliwice.1989.– S. 215 – 223.

105. Пермяков А. А. Синтез технологических параметров высокопродуктивной обработки зубчатых реек спаренными фрезами / А. А. Пермяков, А. А. Клочко, Ю. А. Сеница // Вісник НТУ «ХП». Серія: «Технології в машинобудуванні». – Х.: НТУ «ХП», 2017. – № 17 (1239). – С. 71 – 77.

106. Пермяков А. А. Современные технологии повышения долговечности цилиндрических зубчатых колес / А. А. Пермяков, А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, А. А. Охрименко // XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта», 29 червня - 01 липня 2017 року. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». – Київ: НТУУ «КПІ», 2017. – Т. 4. – С. 348 – 350.

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

108. Пермяков А. А. Технологические основы зубофрезерования шевронных закаленных колес с отдельной схемой формообразования / А. А. Пермяков, А. А. Клочко, Е. П. Старченко, Е. В. Камчатная - Степанова, С. П. Сапон // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем - 2019: Матеріали тез доповідей IX Міжнародної науково - практичної конференції. м. Чернігів, 14 – 16 травня 2019 р. Чернігівський національний технологічний університет / відп. за вип. А. М. Єрошенко [та ін.]. – Чернігів: ЧНТУ, 2019. – Т. 1. - С. 117 - 119.

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

110. Равская Н. С. Определение угла в плане червячных фрез при нарезании косозубых зубчатых колес / Н. С. Равская, О. А. Охрименко // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула, 2013. - № 8, - С. 179 – 189.

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

112. Равська Н. С. Застосування CAD систем при визначення параметрів зрізаемого шару при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами / Н. С. Равська, О. О. Ключко, О. А. Охріменко // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези докладів VII - ої Всеукраїнської науково - технічної конференції, 5 - 9 лютого 2018 р. – Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – С. 135 – 137.

113. 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.

114. Скоркін А. О. Дослідження методів і умов формоутворення різальних елементів твердосплавного інструменту для фрезерної обробки композиційних неметалевих матеріалів / А. О Скоркін, О. Л. Кондратюк,

О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова // Збірник наукових праць. Машинобудування. – Харків: УПА, 2019. – № 23. – С. 32 – 42.

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

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

117. Скоркін А. О. Забезпечення якості швидкорізального інструменту при плоскому шліфуванні. / А. О. Скоркін, О. Л. Кондратюк, О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова // Збірник наукових праць. Машинобудування. – Харків: УПА, 2020. – №25. – С. 79 - 89.

118. Скоркин А. Повышение эффективности фрезерования за счет использования систем динамического контроля производительности / А. Скоркин, О. Кондратюк, Е. Старченко, Е. Камчатная - Степанова // Збірник наукових праць. Машинобудування. - Харків: УПА, 2021. – № 27. – С.76 - 86.

119. Семенченко И. М. Проектирование металлорежущих инструментов / И. М. Семенченко, В. М. Матюшин, Г. Н. Сахаров. – М.: Машгиз, 1962. – 949 с.

120. Сидоренко А. К. Особенности изготовления крупномодульных колес / А. К. Сидоренко. – М.: Машиностроение, 1976. – 112 с.

121. Справочник по обработке металлов резанием / под ред. Ф. Н. Абрамова [и др.]. – К.: Техника, 1983. – С. 48 – 58, 239.

122. Справочник технолога - машиностроителя / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 1. –

694 с.

123. 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.

124. Суслов А. Г. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Г. Суслов, А. А. Ключко // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении – 2016: сборник научных трудов. – Ирбит: НПК «ОНИКС», 2016. – С. 105 – 119.

125. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.

126. Тимофеев Ю. В. Анализ параметров поверхностного слоя закаленных крупномодульных зубчатых колес, характеризующих их эксплуатационные свойства / Ю. В. Тимофеев, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, А. Н. Кравцов // Збірник наукових праць. Прогресивні технології в машинобудуванні: Тези доповідей III - ої Всеукраїнської науково - технічної конференції, 2 - 6 лютого 2015 р. — Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2015. – С. 103.

127. Тимофеев Ю. В. Анализ схем резания и технологическое оснащение при интенсивной и высококачественной зубообработке закаленных крупномодульных колес / Ю. В. Тимофеев, А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко, А. Н. Кравцов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Серія: «Технології в машинобудуванні.» – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 42 (1085). – С. 7 – 19.

128. 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. Клочко, А. Н. Кравцов // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. тр. – Краматорск: ДГМА, 2012. – Вып. 30. – С. 194 – 204.

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

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

131. Тимофеев Ю. В. Оптимизация технологического обеспечения эксплуатационных свойств поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес / Ю. В. Тимофеев, А. А. Клочко, А. Н. Кравцов // Східно-Європейський журнал передових технологій: Прикладна механіка. - Харків: ПП «Технологічний центр», 2013. - Том 4, – № 7 (64). – С. 49 – 55.

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

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

134. Шелковой А. Н. Анализ технологических методов, обеспечивающих эксплуатационные свойства контактирующих поверхностей закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2014. – Вип. 151. – С. 207 – 214.

135. Шелковой А. Имитационное моделирование в задачах механосборочного производства / А. Шелковой, А. Ключко, Е. Набока // Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 528 с.

136. Шелковой А. Н. Критерии формирования структур и параметров систем обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Ключко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. пр. Тематичний випуск: Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ ХПІ, 2013. – Вип. 8. – С. 185 – 200.

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

138. Шелковой А. Н. Общая имитационная модель формирования погрешностей при зубообработке лезвийным инструментом / А. Н. Шелковой, А. А. Ключко, С. Ю. Палашек, Т. В. Терещенко // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали тринадцятої Міжнародної науково - технічної конференції, 2 – 4 червня 2015 р. / за загал. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2015. – С. 93.

139. Шелковой А. Н. Общие принципы моделирования оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес /

А. Н. Шелковой, Е. В. Мироненко, А. А. Клочко // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія «Машиноприладобудування та транспорт». – Севастополь, 2013. – Вип. 140. – С. 203 – 210.

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

141. Шелковой А. Н. Функциональные аспекты имитационного математического моделирования геометрических параметров процесса зубофрезерования / А. Н. Шелковой, А. А. Клочко, М. И. Гасанов, Д. А. Кравченко, О. А. Анциферова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Технології у машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 66 – 74.

142. Ямников, А. С. Ресурсосберегающие технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес / А. С. Ямников, А. А. Маликов, Е. Н. Валиков, А. В. Сидоркин - Технология машиностроения. – 2008.- № 7.- С. 7 – 10.

143. Ямпольский Л. С. Оптимизация технологических процессов в гибких производственных системах / Л. С. Ямпольский, М. Н. Полищук. – К.: Техника, 1988. – 175 с.

144. Ящерицын П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск, 1977. – 254 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ***Публікації, що входять до переліку фахових видань:***

1. Камчатная - Степанова Е. В. Анализ механизмов реализации производственной деятельности промышленного предприятия. / Ю. А. Клочко, Е. В. Камчатная-Степанова, Н. Г. Сикетина // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія: «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 4 (1113). – С. 76 - 78.
2. Камчатная - Степанова Е. В. Моделирование синергетических стратегий развития производственно - экономических систем. [Монографія] / Ю. А. Клочко, Е. В. Камчатная - Степанова, Н. Г. Сикетина, И. Н. Кравцов // Донбасская государственная машиностроительная академия - Краматорск: ДГМА; Ирбит; НИКС, 2015. – 221 с.
3. Камчатна - Степанова К. В. Дослідження методів і умов формоутворення різальних елементів твердосплавного інструменту для фрезерної обробки композиційних неметалевих матеріалів. / А. О Скоркін, О. Л. Кондратюк, О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова // Збірник наукових праць. Машинобудування. – Харків: УПА, 2019. – № 23. – С. 32 - 42.
4. Камчатна - Степанова К. В. Технологічні засоби обробки крупногабаритних евольвентних шліцьових з'єднань з модифікацією зуборізного інструменту. / О. О. Анділахай, О. О. Клочко, К. В. Камчатна - Степанова, О. П. Старченко // Наука та виробництво. Машинобудування і зварювальне виробництво. – Маріуполь: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», 2019. – № 20. – С. 53 - 66.
5. Камчатна - Степанова К. В. Забезпечення якості швидкорізального

інструменту при плоскому шліфуванні. / А. О. Скоркін, О. Л. Кондратюк, О. П. Старченко, К. В. Камчатна - Степанова // Збірник наукових праць. Машинобудування. – Харків: УІПА, 2020. – №25. – С. 79 - 89.

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

7. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Analytical approach to determination of surface strengthening of chevron gears. // Вісник Тернопільського національного технічного університету - Тернопіль: ТНТУ, 2021. – том № 2 (102). - С. 5 - 10.

8. Камчатная - Степанова Е. В. Повышение эффективности фрезерования за счет использования систем динамического контроля производительности. / А. Скоркин, О. Кондратюк, Е. Старченко, Е. Камчатная - Степанова // Збірник наукових праць. Машинобудування. - Харків: УІПА, 2021. – №27. – С.76 – 86.

Публікації у закордонних виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз

9. Камчатная – Степанова Е В. Современные методы технологии формообразования крупномодульных зубчатых колес. / А. Klochko, A. Skorkin, K. Kamchatna - Stepanova, E. Starchenko, M. Ishchenko // Znanstvena misel journal - Ljubljana, Slovenia, 2020. - № 48. – С. 25 - 26.

10. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Modern methods of gear milling of hardened large-module gears / Kateryna Kamchatna - Stepanova, Oleksandr Klochko // Periodyk Naukowy Akademii Polonijnej - Czestochowa, Poland, 2020. - № 6 (43). - С. 312 – 324.

11. Kamchatna - Stepanova Kateryna. Ensuring the High Strength Characteristics of the Surface Layers of Steel Products. / Kateryna Kostyk,

Viktoriia Kostyk, Oleg Akimov, Kateryna Kamchatna - Stepanova, Yurii Shyrokyi // Lecture Notes in Mechanical Engineering - Germany: Springer Verlag, 2021. – С. 211 – 216.

12. Kamchatna - Stepanova K. Influence of waviness parameters on the operational properties of cylindrical large-modular gears / K. Kamchatna - Stepanova, A. Klochko, A. Naydenko, A. Manokhin // International journal of engineering and advanced technology studies. - London. United Kingdom, 2021. – Vol. 9, Issue 1. – № 9. - P. 30 – 37.

Публікації апробаційного характеру:

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

14. Камчатная - Степанова Е. В. Анализ современных конструкций инструментов для нарезания крупномодульных шевронных колес. / А. А. Клочко, А. Ю. Заковоротный, О. А. Анцыферова, Е. В. Камчатная - Степанова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XIX Міжнародної науково - технічної конференції 01 – 04 червня 2021 року / за заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2021. – С. 68 - 70. ISBN 978-966-379-987-2.

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

16. Камчатная - Степанова Е. В. Технологические основы

зубофрезерования шевронных закаленных колес с отдельной схемой формообразования. / А. А. Пермяков, А. А. Клочко, Е. П. Старченко, Е. В. Камчатная - Степанова, С. П. Сапон // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем - 2019: Матеріали тез доповідей ІХ Міжнародної науково - практичної конференції. м. Чернігів, 14 – 16 травня 2019 р. Чернігівський національний технологічний університет / відп. за вип. А. М. Єрошенко [та ін.]. – Чернігів: ЧНТУ, 2019. – Т. 1. - С. 117 - 119.

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

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

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

20. Камчатная – Степанова Е. В. Технологические методы скоростного зубофрезерования крупномодульных шевронных зубчатых колес. / А. А. Клочко, Е. В. Басова, Е. В. Камчатная - Степанова // Праці ХХІХ Міжнародної конференції «Нові технології в машинобудуванні», 2 - 8 вересня 2019 р. – Коблево – Харків: НАКУ «ХАІ», 2019. – С. 7.

21. Камчатная - Степанова Е. В. Влияние технологического воздействия

на обеспечение эксплуатационных свойств тяжело нагруженных крупномодульных закаленных шевронных зубчатых колес. / А. А. Ключко, О. А. Анциферова, Е. В. Камчатная - Степанова // Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали шостої міжнародної науково-технічної конференції (27 - 29 листопада 2019 року). Харків - Краматорськ – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – С. 50 - 51.

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

23. Kamchatna - Stepanova K. Methodology for the development of a model for managing the quality and productivity of shaping when processing hardened coarse-modular gears. / V. Kovalov, Y. Vasylchenko, M. Shapovalov, O. Antsyferova, K. Kamchatna - Stepanova // Информатика, управління та штучний інтелект. Тези сьомої міжнародної науково-технічної конференції (17 - 19 листопада 2020 р.). Харків - Краматорськ – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. - С. 36 - 38.

24. Камчатная - Степанова Е. В. Перспективные схемы зубофрезерования крупномодульных закаленных шевронных колес с раздельной схемой формообразования. // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали XVIII Міжнародної науково - технічної конференції 21 - 24 грудня 2020 р. / за заг. редакцією В. Д. Ковальова. – Краматорськ: ДДМА, 2020. - С. 36.

25. Камчатна - Степанова К. В. Особливості організації педагогічної взаємодії викладача із здобувачами технічної освіти в галузях металургії та машинобудування. / К. В. Камчатна - Степанова, М. М. Ямшинський // Scientific and pedagogical intership «Mastery of the organization of pedagogical

interaction between a teacher and engineering students. The experience of EU countries». February 15-March 26, 2021 Wloclawek, Republic of Poland, 2021. - С. 33 - 36.(ISBN 978-9934-26-056-8).

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

Використання методів математичного планування експериментів та оптимізації експериментальних даних

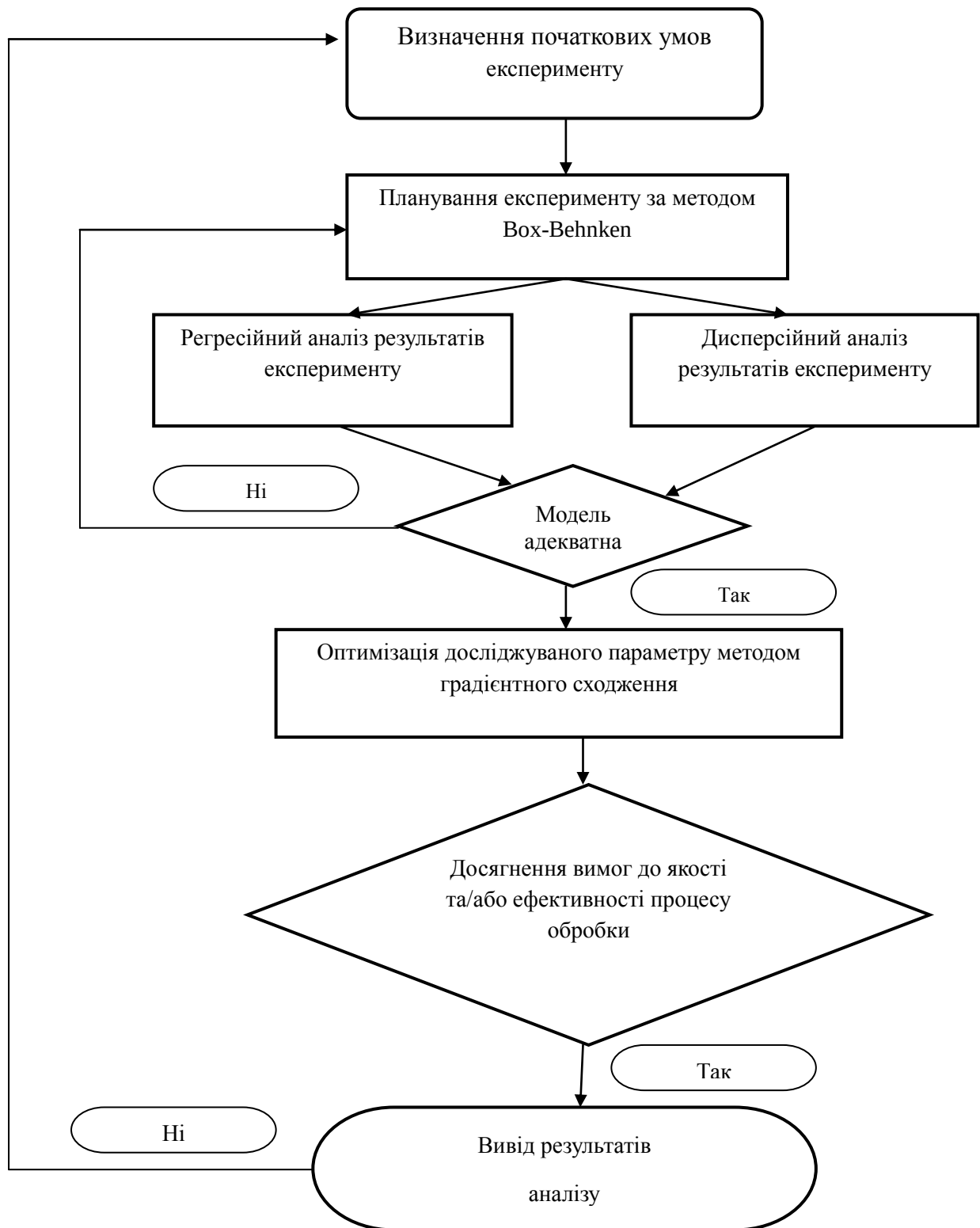


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму для обробки результатів експериментальних досліджень

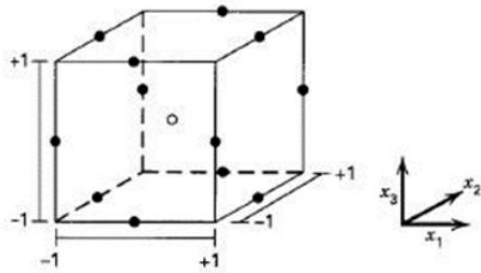
Схема розробленого алгоритму для обробки результатів експериментальних досліджень методами багатовимірної статистичного аналізу представлена на Рис 1. Даний алгоритм дозволяє підвищити точність та швидкість обчислень при проведенні аналізу процесів схем різання та загрузки зубів фрези в контактному полі різання; траєкторії руху зубів фрези та їх вплив на товщину зрізуваних шарів, знос інструмента та якість обробленої поверхні з урахуванням радіусу заокруглення різальної кромки.

Для скорочення кількості дослідів, необхідних для проведення комплексного дослідження процесу, а також для обробки отриманих результатів використовувався метод математичного планування експерименту.

Опис поверхні відгуку поліномами першого порядку часто виявляється недостатнім. У багатьох випадках задовільна апроксимація може бути досягнута, якщо скористатися поліномом другого порядку. В цьому випадку потрібно, щоб кожен фактор варіювався не менше ніж на трьох рівнях.

Плани експерименту дозволяють нам оцінити взаємодія факторів і їх вплив на досліджуваний параметр, і, отже, дати уявлення про локальний профілі поверхні відгуку. Факторні плани експериментів Боксу-Бенк є ефективними методом для отримання моделей-поліномів другого порядку, що описують поверхні відгуку, в разі нелінійного поведінки досліджуваної системи. У цих планах використовується відносно невелика кількість експериментальних точок, необхідних для оцінки досліджуваного параметра. Ротатабельність плану цього типу є перевагою, що дозволяє отримати поліпшену оцінку параметра оптимізації в області, де вид поверхні відгуку заздалегідь не відомий. Дизайн плану експериментів по Боксу-Бенкену передбачає три рівня для кожного фактора, розташованих в багатовимірному просторі в центрі граней гіперкуба (рис. 1 а). Реалізація плану дозволяє в разі 3-х факторного аналізу скоротити загальну кількість експериментів з 27 до 13 (без повторів в центрі плану). Приклад умов планування Використання при проведенні чисельного експерименту при моделюванні методом скінченних елементів, рівні варіювання факторів та результати обчислень приведені в

таблиці (рис. 1 б). Обчислення коефіцієнтів поліноміальної моделі, перевірку їх статистичної значущості і дисперсійний аналіз ступеня впливу коефіцієнтів моделі на досліджуваний параметр проводили з використанням спеціального програмного забезпечення (Statistica 6.0).



а)

Standard Run	3 factor Box-Behnken design			
	ro	f	v	Seq
1	10,00000	0,100000	125,0000	4,36
2	50,00000	0,100000	125,0000	0,82
3	10,00000	0,800000	125,0000	2,84
4	50,00000	0,800000	125,0000	1,17
5	10,00000	0,450000	50,0000	1,58
6	50,00000	0,450000	50,0000	1,08
7	10,00000	0,450000	200,0000	2,6
8	50,00000	0,450000	200,0000	2,77
9	30,00000	0,100000	50,0000	0,83
10	30,00000	0,800000	50,0000	0,89
11	30,00000	0,100000	200,0000	1,1
12	30,00000	0,800000	200,0000	0,59
13	30,00000	0,450000	125,0000	1,02
14	30,00000	0,450000	125,0000	1,02
15	30,00000	0,450000	125,0000	1,02

б)

Рисунок 2 – Рівні факторів та рас положення точок плану експерименту

Адекватність отриманої моделі перевіряли за критерієм Фішера:

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2}, \quad (1)$$

Дисперсію параметра оптимізації визначали за результатами дослідів в центрі плану:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2}{n_0 - 1}, \quad (2)$$

где n_0 – число паралельних дослідів в центрі плану;

y_u – значення параметра оптимізації в центрі плану в u – м досліді;

$\bar{y}$ – середнє арифметичне значення параметру оптимізації в n_0 досліді;

u – номер паралельного дослідів в центрі плану.

Дисперсія адекватності:

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \left(y_j - \bar{y}_j \right)^2 - \sum_{u=1}^{n_0} \left(y_u - \bar{y} \right)^2}{N - k - (n_0 - 1)}, \quad (3)$$

де y_j – експериментальне значення функції відгуку в j -м досліді;

•

$\bar{y}_j$ – розрахункове значення функції відгуку в j -м досліді;

N – повна кількість дослідів;

k – число статистично значимих коефіцієнтів регресії.

Гіпотеза адекватності приймається, якщо при вибраному рівні значимості виконується умова $F_p < F_T$.

Після регресійної обробки було отримано рівняння залежності максимальної величини еквівалентних напружень в небезпечних зонах різального клина та максимальної температури в контактній зоні:

$$\begin{aligned} \sigma_{eq} = & 1,84608 - 1,7748 \cdot \rho - 0,96632 \cdot \rho^2 + 0,50503 \cdot f - 0,93763 \cdot f^2 \\ & + 0,17075 \cdot v + 0,34491 \cdot v^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} T = & -422 + 23,985 \cdot \rho - 0,315 \cdot \rho^2 + 952,98 \cdot f - 635,374 \cdot f^2 + 4,89 \cdot v \\ & - 0,008 \cdot v^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Коефіцієнт детермінації моделей R^2 : 0,81 та 0,85 відповідно.

Оптимізація методом градієнтного спуску

Найбільш поширений спосіб вирішення завдань оптимізації - ітеративна оптимізація. Стандартні алгоритми оптимізації включають градієнтний спуск. Отже, щоб записати алгоритм градієнтного спуску. Мета оптимізації - мінімізувати функцію втрат. Напрямок градієнта функції являє собою напрямок найбільш швидкого зростання значення функції, а протилежний

напрямок - напрямок найбільш швидкого спадання функції. Ідея оптимізації градієнтного спуску полягає в використанні напрямку негативного градієнта (протилежного напрямку) поточної позиції в якості напрямку пошуку, також відомого як «метод найшвидшого спуску». Метод градієнтного спуску - це ітераційний алгоритм, кожен крок якого потребує вирішення цільової функції і вектора градієнта.

Алгоритм статистичного методу пошуку екстремальних значень функції

Вхід: цільова функція $f(x)$, Градієнтна функція $g(x) = \nabla f(x)$, точність розрахунків (завдана похибка): ε

Вивхід: $f(x)$ Точка екстремуму: x'

- приймаємо початкове довільне значення $x^0 \in R^n$, приймаємо $k = 0$
- розрахуємо $f(x^k)$
- розрахунок градієнту $g_k = g(x^k)$, коли $\|g_k\| < \varepsilon$, ітерація зупиняється та приймається $x' = x^k$;
- в протилежному випадку нехай $p_k = -g(x^k)$, зменшуємо значення λ_k та виконуємо
- $f(x^k + \lambda_k p_k) = \min f(x^k + \lambda p_k)$
- встановлюємо $x^{k+1} = x^k + \lambda_k p_k$, розрахуємо $f(x^{k+1})$, коли
- $\|f(x^{k+1}) - f(x^k)\| < \varepsilon$ або $\|x^{k+1} - x^k\| < \varepsilon$,
- Зупиняємо ітерацію, приймаємо $x' = x^{k+1}$, в протилежному випадку $k = k + 1$, перейдемо до $g_k = g(x^k)$.

Коли цільова функція є опуклою функцією, рішення методу градієнтного спуску є глобальним оптимальним рішенням. При нормальних обставинах не гарантується, що рішення буде глобальним оптимальним рішенням, і швидкість збіжності методу градієнтного спуску може бути невисокою.

Якщо набір даних великий, кожна ітерація займає багато часу і вимагає великого обсягу пам'яті. Виходячи з цього, метод градієнтного спуску має модифікацію: метод стохастичного градієнтного спуску.

$$J(\Theta) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (y^i - h_{\Theta}(x^i))^2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \text{cost}(\Theta, (x^i, y^i))$$

$$\text{cost}(\Theta, (x^i, y^i)) = \frac{1}{2} (y^i - h_{\Theta}(x^i))^2$$

Функція втрат кожного зразка, Θ . Знайдемо частну похідну та обновляємо Θ

$$\Theta'_j = \Theta_j + (y^i - h_{\Theta}(x^i))x_j^i$$

Де регресійна модель: $h(x)$. Бажана функція фітингу, $J(\Theta)$. Функція втрат, Θ .

Параметр, значення якого необхідно знайти ітеративно, де m – кількість виборок в наборі, а n – кількість функцій.

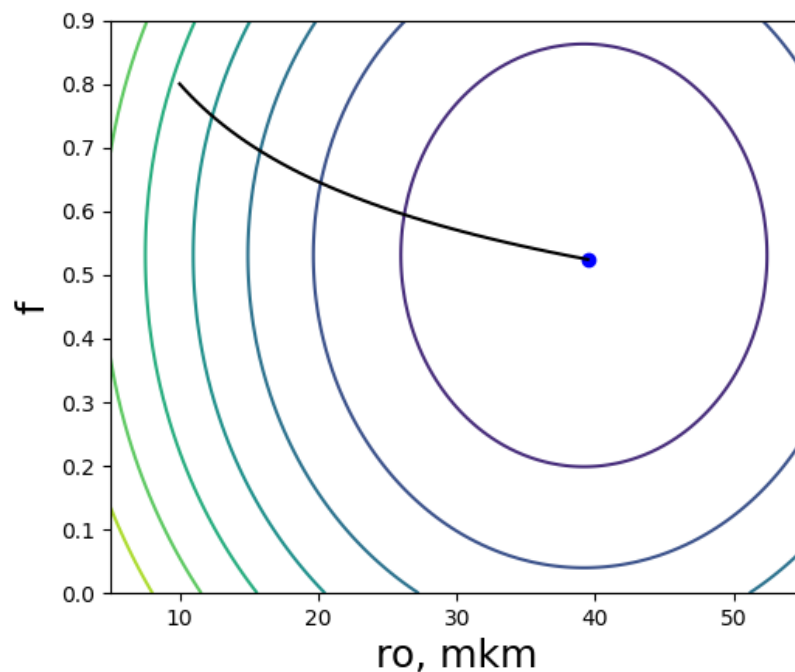


Рисунок 3 – Траєкторія руху точки при градієнтному спуску на моделі

$$\text{залежності } \sigma_{eq} = F(\rho, f)$$

Пошук оптимальних умов, за яких напруження в інструменті мінімальні, проведено методом градієнтного сходження. Лінія на малюнку – траєкторія руху точки при пошуку локального мінімуму на поверхні відклику.

Лістинг для розрахунку еквівалентних напружень за Писаренко-Лебедєвим
(мова програмування - Python)

<pre> #Calculation of an average value of the stresses based on N points from numpy.testing._private.utils import jiffies import pandas as pd import matplotlib import numpy as np from scipy.ndimage import gaussian_filte r1d np.__version__ import matplotlib.pyplot as plt #import of files data = pd.read_csv("f:\WorkFiles\1240\Py thon\Plan2/full factor plan/ro50f045v125 2 .CSV", delimiter = ',', names = ['Step#', 'Dimension', 'Time', 'Svm ', 'S1', 'S3', 'Sx', 'Sy', 'Sres', 'Sxy', 'num']) min = 0 max = 1.0*len(data) max = round(max) data = data[min:max] #number of points N=10 svm = [] for m in data['Svm']: svm.append(m) s1 = [] for m in data['S1']: </pre>	<pre> mean_svm = mean_svm/N if mean_svm > 950: mean_svm == 720 mean_s1 = mean_s1/N mean_svm_arr.append(mean_svm) mean_s1_arr.append(mean_s1) i=i+1 print('mean Svm:', mean_svm_arr) print('mean S1:', mean_s1_arr) fig, (ax3) = plt.subplots(1,1,figsi rese=(8,4), dpi= 80) ax3.set_title('Stresses in dangerou s point') ax3.grid() ax3.set_xlabel('Time, ms', fontsire se = 14) ax3.set_ylabel('P- L Eff Stress, MPa', fontsirese = 14) PL_Eff_Stress = [] for i in range(0,N_loops-1): print('i',i) print('00',mean_svm_arr[i]) current_stress = 0.38*mean_svm_ arr[i] + (1-0.38)*mean_s1_arr[i] if current_stress >900: current_stress = 640 PL_Eff_Stress.append(current_st ress) </pre>
---	---

<pre> s1.append(m) time = [] i = 1 for m in data['Time']: if i==6: time.append(m) i = 1 else: i = i+1 mean_svm = 0 mean_svm_arr = [] mean_s1 = 0 mean_s1_arr = [] #number of loops (steps) with N points o n each step N_loops = max/N N_loops = int(N_loops) time = time[:N_loops-1] i = 0 while i<=N_loops -1: j = 1 while j<=N: k = i*N+j-1 print('i:',i) print('j:',j) print('k',k) print('S:', svm[k]) mean_svm = mean_svm + svm[k] mean_s1 = mean_s1 + s1[k] </pre>	<pre> #Signal filtration PL_Eff_Stress = gaussian_filter1d(P L_Eff_Stress, 12) #Graph j=0 for i in time: i = i*1000 time[j] = i j=j+1 mean_PL_Eff_Stress = np.mean(PL_Eff _Stress) print('mean_PL_Eff_Stress: ', mean_ PL_Eff_Stress) ax3.text(4,1, mean_PL_Eff_Stress) ax3.plot(time, PL_Eff_Stress) plt.show() </pre>
---	---

$j = j+1$	
-----------	--



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи «Підвищення ефективності механічного оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс при швидкісному зубофрезеруванні» асистента кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» К.В.Камчатної-Степанової на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Основні наукові положення, висновки, рекомендації та розробки, отримані в дисертаційній роботі асистента національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Камчатної-Степанової К.В. забезпечують підвищення технічного рівня робочих машин, продуктивності та якості нарізання великомодульних шевронних коліс має надзвичайно важливе економічне значення, дає можливість раціонально використовувати лімітоване спеціальне зуборізальне обладнання та дороговартісний інструмент. Підвищення якості різання зубів, а, відповідно, надійності та довговічності зубчастих передач дозволяє істотно скоротити час простою та витрати на міжремонтне обслуговування унікальних машин, а також збільшити їх виробничі потужності.

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. Достовірність теоретичних положень роботи підтверджується результатами експериментальних досліджень і промисловим впровадженням результатів досліджень процесів формоутворення при обробці зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс.

Для великомодульного зуборізального інструменту, зокрема чистових черв'ячних фрез, першочергове значення набуває раціоналізація схеми різання до геометрії ріжучої частини, спрямована на поліпшення динаміки різання, підвищення стійкості і точності інструменту, а значить, і на підвищення продуктивності і якості обробки зубчастих коліс. Водночас важливе значення має спрощення конструкції інструменту, підвищення його економічності.

Метою досліджень є забезпечення підвищення продуктивності і якості чистового зубофрезерування великомодульних ($m = 12 - 30$ мм) шевронних зубчастих коліс шляхом дослідження і впровадження у виробництво принципово нової конструкції черв'ячної фрези з роздільною схемою формоутворення.

Для досягнення мети були вирішені такі задачі:

1. Досліджена схема різання і завантаження зубів фрези в контактному полі різання; траєкторії руху зубів фрези та їх вплив на товщину різаних шарів, знос інструменту і якість обробленої поверхні.
2. Розроблен метод профілювання та проектування теоретично точних черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення.
3. Проведені порівняльні дослідження динаміки чистового зубофрезерування великомодульних коліс зі стандартними черв'ячними фрезами і фрезами з роздільною схемою формоутворення в широкому діапазоні змін режимів різання. Дослідити вплив технологічних

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

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

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

В роботі сформульовані принципи забезпечення підвищення продуктивності та якості чистового зубофрезерування загартованих великомодульних шевронних зубчастих коліс при швидкісному зубофрезеруванні та досліджені вплив конструктивних параметрів інструментів і режимів різання на хвилястість, шорсткість і точність обробленої поверхні зубів великомодульних шевронних коліс.

На основі системного аналізу і узагальнення досвіду дослідження різальних властивостей черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення загартованих шевронних зубчастих коліс, вимог до забезпечення якості та точності обробленої поверхні зубів відповідальних передач, вперше сформульовані і реалізовані принципи формоутворення евольвентної поверхні загартованих шевронних зубчастих коліс на основі моделювання високоякісної обробки, що дозволяють інтенсифікувати процес при зустрічному фрезеруванні за допомогою спеціальної фрези з роздільною схемою різання. Наукова новизна одержаних результатів полягає: - вперше розроблено модель формоутворення евольвентної поверхні загартованих шевронних зубчастих коліс при зустрічному фрезеруванні за допомогою спеціальної фрези з роздільною схемою різання за рахунок розположення різувальних лез по лінії зачіплення; - розширені умови остаточного формоутворення евольвентної поверхні загартованих шевронних зубчастих коліс черв'ячною фрезою збірної конструкції за рахунок розположення фрез правого та лівого корпусів на розрахунковій відстані; - удосконалено спосіб чистового швидкісного лезового оброблення загартованих шевронних зубчастих коліс за рахунок співвідношення радіусу округлення ріжучого леза та режимів різання. За наслідками експериментальних та виробничих досліджень отримані залежності, які характеризують динаміку процесу різання новим інструментом.

Основні положення дисертаційної роботи Камчатної-Степанової К.В., способи забезпечення підвищення продуктивності та якості чистового зубофрезерування загартованих великомодульних шевронних зубчастих коліс при швидкісному зубофрезеруванні впроваджені на ТОВ «КЗМО».

Очікуваний економічний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи на ТОВ "Костянтинівський завод механічного обладнання" у процесі виготовлення загартованих великомодульних шевронних коліс при швидкісному зубофрезеруванні складає 145045 грн на рік.

Від ТОВ "КЗМО"

Головний інженер



Євген КИРЄЄВ

Начальник цеха



Юрій ШАПОВАЛОВ

Затверджую: Головний інженер АТ «Турбоатом»

Іщенко Г.І.



АКТ

20.04.2021

впровадження результатів дисертаційної роботи «Підвищення ефективності механічного оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс при швидкісному зубофрезеруванні» асистента кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» К.В.Камчатної-Степанової на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Розробки і рекомендації, отримані в дисертаційній роботі, забезпечують раціональні властивості черв'ячних фрез із роздільною схемою формоутворення. Удосконалена конструкція черв'ячної фрези з роздільною схемою формоутворення, яка виключає органічні похибки профілювання, рівняння траєкторії руху зубів фрези та аналіз впливу траєкторій на різальні здібності інструменту та якість обробленої поверхні.

При виконанні ремонту токарно-центрового верстата була виконана фінішна дообробка шестерні $m = 10\text{мм}$, 7 ступеню точності по ГОСТ 1643 з використанням фрез з роздільною схемою формоутворення. Це забезпечило якісне виготовлення деталі з значним скороченням циклу підготовки виробництва та виконання дообробки деталі на верстаті з ЧПК.

Наведені в роботі узагальнені залежності для визначення величини хвилястості та параметрів точності оброблених зубчастих коліс в залежності від режимів різання дозволили раціонально визначити первинні параметри режимів різання. Дослідження нарізання зубчастих коліс $m = 10\text{ мм}$, виконані в дисертаційній роботі, черв'ячними затіленими фрезами з позитивним переднім кутом $\varphi = 10^\circ$ при режимах різання: $V = 24\text{--}23\text{ м/хв}$, $S = 1,6\text{--}2,47\text{ мм/об.}$ показали, що стійкість цих фрез збільшується в порівнянні зі стійкістю фрез, які мають $\varphi = 0^\circ$, в 1,5 рази, що перевірено на практиці при обробці. Споживання верстатом потужності на процес різання зменшується на 15 - 20%, що дозволяє збільшити подачу інструменту.

Очікуваний ефект від впровадження результатів дисертаційної роботи на АТ «ТУРБОАТОМ» полягає в можливості в умовах ремонтного виробництва виготовити нові або дообробити зубчаті колеса на власному обладнанні з ЧПК та універсальними фрезами з роздільною схемою формоутворення.

Начальник ТВ-Головний технолог

Головний механік

Іщенко М.Г.

Пархоменко С.А.

ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з наукової роботи

НТУ «ХПІ»

Андрій МАРЧЕНКО

«19» квітня 2021 року

АКТ

впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи «Підвищення ефективності механічного оброблення загартованих великомодульних шевронних коліс при швидкісному зубофрезеруванні» здобувача наукового ступеня кандидата технічних наук, асистента кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів Камчатної-Степанової Катерини Валеріївни.

У період з 12 по 14 квітня 2021 року комісія у складі голови завідуючого кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів д.т.н., проф. Пермякова О.А. та членів комісії проф.. Хавіна Г.Л. і доц. Набоки О.В. провела роботу по визначенню результатів використання науково - методичних положень дисертаційного дослідження Камчатної-Степанової К.В. в навчальному процесі при підготовці фахівців в Навчально-науковому інституті механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Результати дисертаційної роботи Камчатної-Степанової К.В. впроваджені в навчальний процес НТУ «ХПІ», у наступних напрямках:

1. Основні положення дослідження К.В. Камчатної-Степанової успішно використовуються при викладанні дисциплін «Сучасні технології в прикладній механіці» та «Технології ремонту та обробки типових деталей» при підготовці фахівців за спеціальністю 131 Прикладна механіка, спеціалізації 131-03 «Технологія автоматизованого виробництва», машинобудівного профілю в Навчально-науковому інститут механічної інженерії і транспорту.

2. Практичні положення дисертаційних здобутків К.В. Камчатної-Степанової також використовуються студентами Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту при виконанні курсових, дипломних робіт бакалаврів та магістрів.

Голова комісії

Члени комісії:

Олександр ПЕРМЯКОВ

Геннадій ХАВІН

Олена Набока