

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

ГОЛОБОРОДЬКО ОЛЕГ ВІТАЛІЙОВІЧ

УДК 621.95.01 : 004.942

Проектування та дослідження черв'ячної фрези з зачеплення Новікова

Спеціальність 8.05050302 – інструментальне виробництво

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
магістр**

Київ – 2014

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування імені П.Р. Родіна Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Девін Леонід Миколайович
директор спільного центру НТУУ "КПІ" - ІНМ ім.
В.М. Бакуля НАН України

Рецензент доктор технічних наук, професор
Сохань Сергій Васильович
старший науковий співробітник
Інституту надтвердих матеріалів НАН України, м.
Київ, ведучий науковий співробітник відділу
перспективних ресурсозберігаючих технологій
механічної обробки

**Консультант з
економічних питань**

**Консультант з
охорони праці та
техніки безпеки** кандидат технічних наук, доцент
Фоменко Ігор Олександрович
Національний технічний університет України «КПІ»,
м. Київ, доцент кафедри охорони праці, промислової
та цивільної безпеки

Захист відбудеться „17” червня 2014 року об 10 годині на засіданні ДЕК кафедри інтегрованих технологій машинобудування імені П.Р. Родіна НТУУ «КПІ» за адресою, 03056, м. Київ, вул. Борщагівська 115, к.615-22

З дисертацією можна ознайомитись на кафедрі інтегрованих технологій машинобудування імені П.Р. Родіна НТУУ «КПІ» за адресою, 03056, м. Київ, вул. Борщагівська 115, к.61

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Циліндричні зубчасті передачі як складова частина більшості машин і механізмів є в той же час одними із самих масових, складних і трудомістких деталей в технології машинобудування. Оптимальне теоретичне та технологічне формоутворення циліндричних зубчастих коліс дозволить підвищити якість і знизити собівартість обробки, поліпшити експлуатаційні, економічні та екологічні показники різних машин і механізмів, а також їх ремонтпридатність і конкурентоспроможність, що є актуальною задачею. Це особливо важливо для великогабаритних зубчастих коліс, що використовуються в гірничодобувній галузі України. Так, в даний час в приводах млинів гірничо-збагачувальних комбінатів України використовують евольвентні кореговані, але немодифіковані циліндричні зубчасті колеса модулем 20 - 30 мм, діаметром 4 - 12 м, масою 12 – 16 т, вартістю понад 1 млн. грн. В процесі експлуатації таких зубчастих коліс протягом 8 - 12 років критичний знос зубів по товщині зубів досягає 8 мм. Критерієм критичного зносу є підвищений шум та вібрації механізму приводу. Після закінчення цього терміну зубчасті колеса демонтують, розрізають на частини і відправляють на переплавку.

Аналіз літературних джерел показує що з зношеного великогабаритного евольвентного зубчастого колеса можна виготовити нове зубчасте колесо, шляхом нарізування (без наплавки) на зношеному зубчастому вінці нового виду зачеплення - зачеплення Новікова. Таке зубчасте колесо може бути зібране в зубчасту передачу з шестернею в стані її постачання, так як конструкція приводу дозволяє в широких межах регулювати міжосьову відстань в зубчастій передачі. Але шестерню при цьому необхідно виготовити нову з відповідним профілем Новікова або відновити наплавленням, так як її необхідно виготовити з опуклим профілем. Проаналізувати всю множину можливих варіантів теоретичного і технологічного формоутворення великогабаритного зубчастого колеса зі зношеного зубчастого колеса з урахуванням величини зносу вибрати оптимальний варіант формоутворення є складним та актуальним завданням.

Метою магістерської роботи є розробка методики проектування та конструкції збірних черв'ячних фрез з профілем Новікова та оптимальною геометрією для виготовлення циліндричних зубчастих коліс 8 9-ої ступеня точності із твердістю зубів до НВ 320 із зношених зубчастих коліс.

Задачі досліджень:

1. Розробка окремої структури узагальненого логічного графа плоских систем зубчастих зачеплень для теоретичного та технологічного формоутворення крупно модульних крупногабаритних циліндричних зубчастих коліс з профілем Новікова.

2. Удосконалення методики завдання, математичного опису й візуалізації на ПЕВМ вихідних формотворних профілів з профілем Новікова.

3. Удосконалення узагальненої кінематичної схеми формоутворення плоских контурів зубчастих зачеплень та її математичної моделі.

4 Удосконалення узагальненої уніфікованої програмно-реалізованої математичної моделі теоретичного формоутворення зубчастих контурів плоскої системи циліндричних зубчастих зачеплень.

5. Розробка методики проектування спеціальної крупно модульної збірної черв'ячної фрези з профілем Новікова.

6. Експериментальні дослідження зусиль різання при моделюванні процесу зубофрезерування.

Об'єкт досліджень. Узагальнена формотворна система плоских зубчастих зачеплень.

Предмет досліджень. Аналіз і синтез формоутворення зубчастих контурів плоских систем зубчастих зачеплень.

Методика досліджень. При теоретичних дослідженнях використовувалася теорія формоутворення поверхонь різанням, теорія зубчастих зачеплень, теорія множин, теорія технічних систем, теорія геометричного моделювання, методи диференціальної геометрії, теорія відображення афінного простору. В експериментальних дослідженнях використовувалася сучасна динамометрична апаратура.

Підтвердженням вірогідності розроблених методик є багаторазове порівняння математичних моделей формоутворення з геометричним комп'ютерним моделюванням.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Удосконалено узагальнену кінематичну схему та розроблено математичну модель процесу формоутворення ланок плоских систем зубчастих зачеплень з різним профілем.

2. На основі розробленої математичної моделі процесу формоутворення циліндричних зубчастих коліс вперше запропоновано спосіб формоутворення великогабаритних зубчастих коліс приводу шарового млина з урахуванням вихідного профілю заготовки зі зносом 5–8 мм по товщині зубу, який полягає в проектуванні вихідного виробляючого контуру Новікова черв'ячної фрези.

3. Вперше розраховано геометричні показники повного профілю зубів черв'ячної фрези та зубчастого колеса, яке формоутворюється, та вперше показано принципову можливість формоутворення профілем Новікова інструменту зубчастого колеса без подрізу.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблені і практично реалізовані алгоритми завдання, математичного опису та формоутворення зубчастих контурів (вихідних, вихідних формоутворюючих, вихідних виробляючих і контурів циліндричних зубчастих передач) з різними, в тому числі профілями Новікова;

– розроблено рекомендації щодо вибору параметрів вихідних виробляючих контурів черв'ячних фрез для формоутворення зношених великогабаритних циліндричних зубчастих коліс з урахуванням величини їх зносу;

– встановлено, що розташування різальних елементів черв'ячної фрези східчасто по відношенню до гвинтової лінії фрези та під кутом, який відповідає куту підйому гвинтової лінії, забезпечує одночасну роботу обох бічних поверхонь

цих елементів та вібростійкість процесу зубофрезерування великогабаритних циліндричних зубчастих коліс при швидкостях різання 11–17 м/хв

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи отримані автором самостійно. Постановка задач та аналіз наукових результатів виконано разом з науковим керівником та з співавторами публікацій. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачем розроблені математичні моделі та здійснено чисельний їх аналіз. Безпосередньо автором виконано розрахунок профілів різців черв'ячних фрез для обробки великогабаритних зубчастих коліс. Автор провів вимірювання зусиль різання при моделюванні процесу зубофрезерування і математичну обробку отриманих даних.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на конференції.

Публікації. По темі магістерської роботи опубліковано 1 стаття.

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 6 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 100 сторінок, з них 95 сторінок основного тексту без урахування малюнків, виконаних на окремих сторінках, 20 рисунків і 15 таблиць, 2 додатків, 57 назв літературних джерел на 10 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульована мета і задачі досліджень, показана наукова новизна і практична цінність наведених результатів, подано відомості про апробацію результатів, публікації та структуру роботи.

У **першому розділі** дисертації проведено аналіз літературних джерел з питань завдання, теоретичного і технологічного формоутворення черв'ячними фрезами циліндричних зубчастих передач з різним профілем та існуючих способів їх формоутворення.

У **другому розділі** представлена розробка узагальненої уніфікованої математичної моделі формоутворення циліндричних зубчастих передач. У якості математичного апарату при розробці математичної моделі формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс застосовується теорія відображення афінного простору та матричний опис. На підставі аналізу форм і структури існуючих вихідних формоутворюючих профілів зубчастих ланок розроблено узагальнений симетричний вихідний формоутворюючий профіль

Запропонована узагальнена кінематична схема формоутворення ланок плоских систем циліндричних зубчастих зачеплень. Ця схема має чотири системи координат, що дозволило описати необхідну і достатню множину досліджуваних кінематичних схем формоутворення. Використовуючи теорію багато-параметричних відображень афінного простору, розроблена узагальнена уніфікована і компактна математична модель формоутворення ланок плоских систем зубчастих зачеплень без виведення громіздких аналітичних залежностей (1):

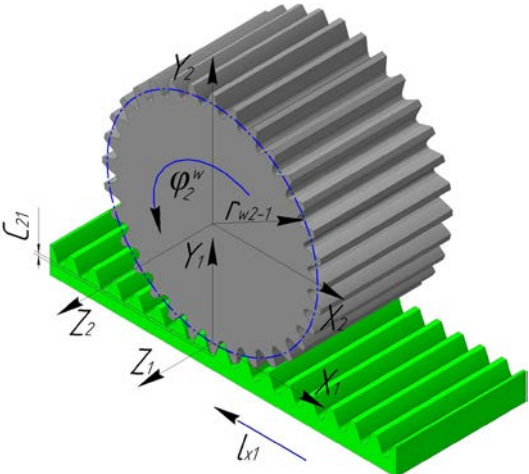
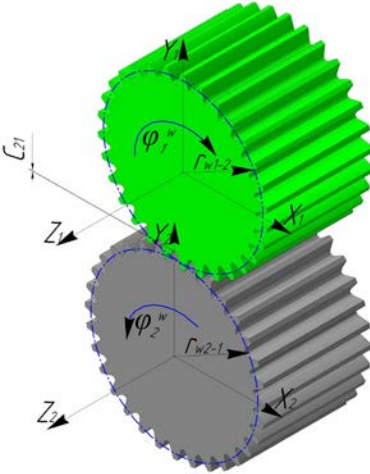
$$m_{r \text{ И/ Д}} = m_{\varphi_0^w I_0^w} m_{\nu_1^w c_1^w} m_{\varphi_1^w I_1^w} m_{\nu_2^w c_2^w} m_{\varphi_2^w I_2^w} m_{\nu_3^w c_3^w} m_{\varphi_3^w I_3^w} m_{r \text{ КЗ}}$$

$$\left. \begin{aligned}
 \varphi_2^w &= \varphi_2^w(\varphi_3^w) \\
 \varphi_1^w &= \varphi_1^w(\varphi_3^w) \\
 \varphi_0^w &= \varphi_0^w(\varphi_3^w) \\
 I_3^w &= I_3^w(\varphi_3^w) \\
 I_2^w &= I_2^w(\varphi_3^w) \\
 I_1^w &= I_1^w(\varphi_3^w) \\
 I_0^w &= I_0^w(\varphi_3^w)
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$n_{xk3}(\varphi_3^w) v_{xk3}(\varphi_3^w) + n_{yk3}(\varphi_3^w) v_{yk3}(\varphi_3^w) = 0$$

Перше рівняння в цій моделі описує відносний рух формоутворюючої ланки відносно формоутворювальної, де m_{rk3} – матриця контуру інструменту, $m_{\varphi_1^w I_1^w}$ – матриці відносно руху контуру інструменту, $m_{v_{I_1^w} c_{I_1^w}}$ – матриці відносного положення. Наступні рівняння описують зв'язок між параметрами відносного руху формоутворюючої ланки. Останнє рівняння системи (1) описує основну умову формоутворення. Відповідно до узагальненої математичної моделі формоутворення (1) представлені часткові схеми формоутворення і їх математичні моделі (табл.).

Таблиця схем формоутворення та їх математичних моделей

	
$m_{rИ/Д(1-2)} = m_{\varphi_2^w} m_{C_{Y12}} m_{I_1} m_{rk(1)};$ $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi_2^w \leq \frac{\pi}{4}; I_{x1} = K_{Ix1} \varphi_2^w;$ $K_{Ix1} = -r_{w(2-1)}; C_{Y12} = -r_{w(2-1)};$ $n_{xk2}(\varphi_2^w) v_{xk2}(\varphi_2^w) + n_{yk2}(\varphi_2^w) v_{yk2}(\varphi_2^w) = 0$	$m_{rИ/Д(1-2)} = m_{\varphi_2^w} m_{C_{Y12}} m_{\varphi_1^w} m_{rk(1)};$ $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi_1^w \leq \frac{\pi}{4}; \varphi_2^w = K_{\varphi_2^w} \varphi_1^w;$ $K_{\varphi_2^w} = r_{w(1-2)} / r_{w(2-1)}; C_{Y12} = r_{w(1-2)} + r_{w(2-1)};$ $n_{xk2}(\varphi_2^w) v_{xk2}(\varphi_2^w) + n_{yk2}(\varphi_2^w) v_{yk2}(\varphi_2^w) = 0$

Особливістю проектування зубчастих передач з зачепленням Новікова є їх формоутворення вихідною формоутворюючою рейкою, яка є контршаблоном вихідного рейкового контуру (ВК). Причому вихідні формоутворюючі рейки для

шестерні і колеса є різними, тобто з опуклими і увігнутими радіусними профілями [53].

Однак, існуючі вихідні контури зубчастих передач Новікова рекомендовані для виготовлення зубчастих коліс модулем до 16 мм. [23, 24]. До того ж велике передавальне відношення формоутворюючої зубчастої передачі для зубчастих передач Новікова не досліджувалась, а малий кут нахилу лінії зуба ($\beta = 5^\circ 15'$) за літературними джерелами може зменшити коефіцієнт перекриття, який необхідно уточнити. Відсутні також рекомендації з вибору величини бічного і радіального зазорів для таких крупномодульних і великогабаритних передач.

Тому для оцінки можливості виготовлення з зношених евольвентних зубчастих коліс модулем 20 мм і кутом нахилу лінії зуба $\beta = 5^\circ 15'$ зубчастої передачі із зачепленням Новікова необхідно розрахувати вихідні формотворчих рейкові контури для колеса і шестерні, тобто, розробити їх математичні моделі, а також математичні моделі формоутворення зубчастого колеса і шестерні цими контурами.

Аналіз математичних моделей формоутворення дозволить встановити основні якісні характеристики зачеплення і визначити працездатність такої передачі.

Розташування передньої поверхні фрези сходинками призводить до збільшення сил різання. Для оцінки сил різання були проведені експериментальні дослідження з вимірювання зусиль різання у порівнянні з розташуванням різальних елементів під різними кутами. Дослідження проводили для двох типів різальних елементів: 1 – $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 70^\circ$, $\varphi_1 = 70^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\alpha_3 = 2^\circ$, $h = 2,5$ мм; 2 – $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\varphi = 70^\circ$, $\varphi_1 = 70^\circ$, $\lambda = 5^\circ$, $\alpha_3 = 2^\circ$, $h = 2,5$ мм. На рис. 15 і 16 приведені залежності сил різання від глибини фрезерування для двох варіантів конструкцій черв'ячних фрез. В результаті обробки експериментальних даних були встановлені наступні математичні моделі для складових сил різання:

$$1) P_x(t) = -10 + 25 \cdot t + 5 \cdot t^2;$$

$$P_y(t) = -1 + 5,917 \cdot t - 2,458 \cdot t^2 + 0,583 \cdot t^3 - 0,042 \cdot t^4;$$

$$P_x(t) = -2 + 28,75 \cdot t - 15,208 \cdot t^2 + 3,75 \cdot t^3 - 0,292 \cdot t^4;$$

$$2) P_x(t) = -10 + 67,167 \cdot t - 18 \cdot t^2 + 5,33 \cdot t^3 - 0,5 \cdot t^4;$$

$$P_y(t) = 2 - 0,5 \cdot t + 0,5 \cdot t^2;$$

$$P_x(t) = 25 - 4 \cdot t + 4,917 \cdot t^2 - t^3 + 0,083 \cdot t^4.$$

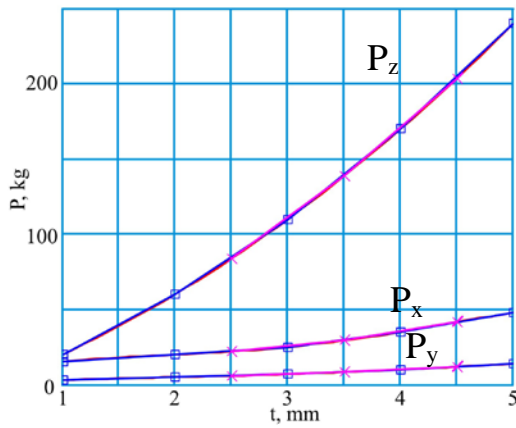


Рис. 1. Залежність сил різання від глибини фрезерування при швидкості $n = 17$ м/хв, $\lambda = 5$

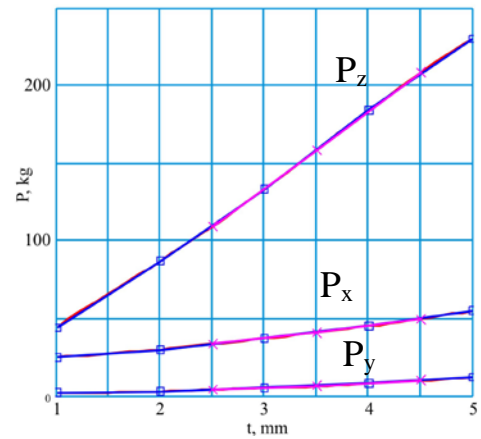


Рис. 2. Залежність сил різання від глибини фрезерування при швидкості $n = 17$ м/хв, $\lambda = 0$

Аналіз представлених результатів дає підстави зробити висновок, що збільшення сил різання при розташуванні передньої поверхні сходінками не перевищує 10%. Таке збільшення зусиль є незначним.

У **третьому розділі** наведені результати формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс з Новіковським профілем з урахуванням вихідного профілю заготовки при критичному зносі, який досягав 8 мм по товщині зуба. Для цього була використана математична модель формоутвореного зубчастого колеса наведена вище.

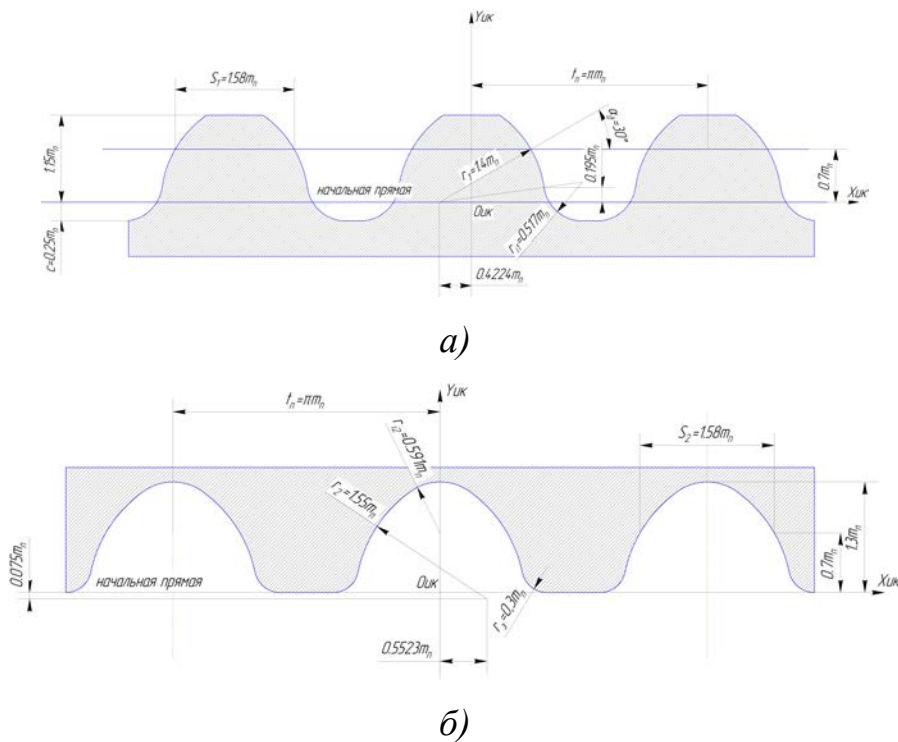


Рис. 3. Вихідні контури для зубів зачеплення Новікова з однією лінією контакту а - опуклий, б - увігнутий.

представлена 3-Д модель черв'ячної фрези.

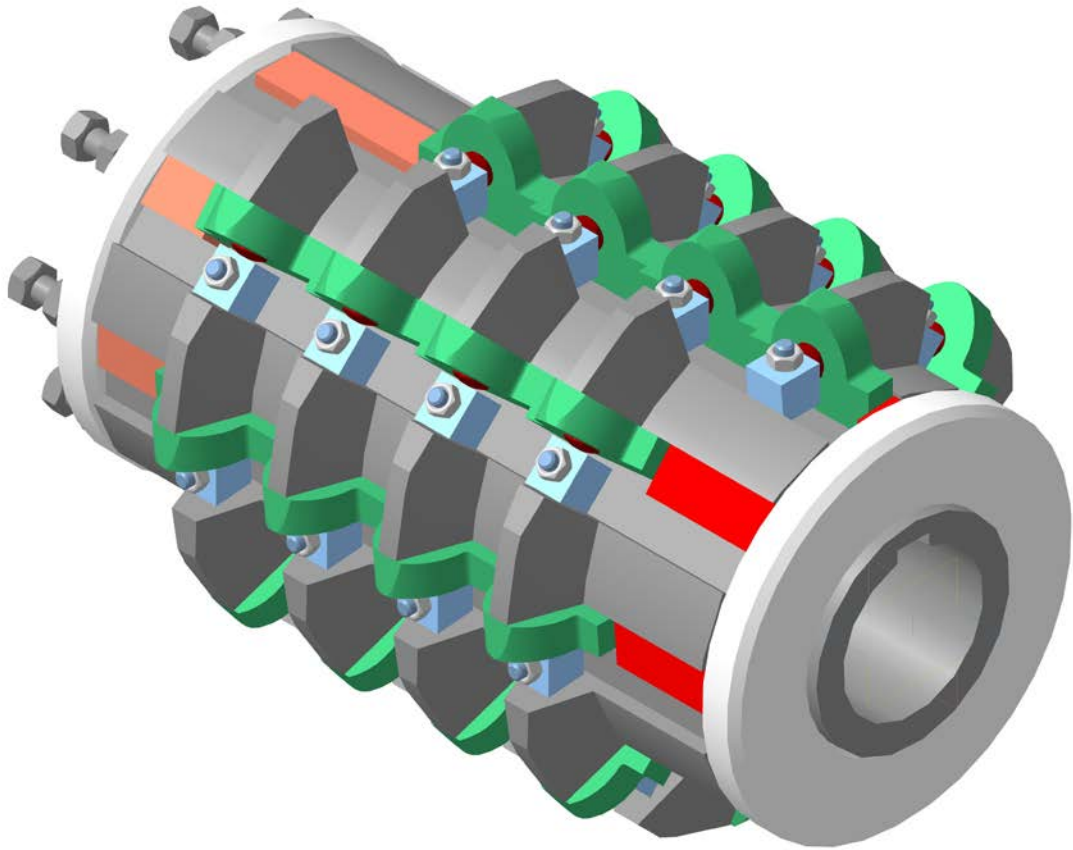


Рис. 4. 3-Д модель черв'ячної фрези з профілем Новікова.

Висновки та результати роботи

У роботі вирішена актуальна науково-технічна задача розробки спеціальних черв'ячних фрез для підвищення ефективності процесу формоутворення великогабаритних зубчастих коліс з використанням заготовок якими є зношені евольвентні зубчасті колеса з величиною зносу до 8мм по товщині зубу.

У магістерській роботі отримані такі найбільш вагомні наукові і практичні результати:

1. Визначений алгоритм розрахунку вихідного виробничого контуру для теоретичного та технологічного формоутворення великогабаритних зубчастих коліс профілем Новікова із зношеного зубчастого колеса.
2. Розроблено методику і програму на ПК для завдання та візуалізації вихідних формотворних профілів плоских систем зубчастих зачеплень.
3. Удосконалена математична модель формоутворення плоских систем зубчастих зачеплень з урахуванням параметрів черв'ячної фрези.
4. Запропоновано спосіб формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс з зношеного евольвентного зубчастого профілю для кульового млина МШР-3600 × 5000 (діаметр колеса 5,5м), який полягає в тому, що їх повторне формоутворення можливо шляхом нарізування (без наплавки) на зношеному зубчастому вінці нового виду зачеплення - зачеплення Новікова
5. Розроблена методика розрахунку та нова конструкція збірної черв'ячної фрези різальні елементи якої в зборі створюють сходинки, кут нахилу яких відповідає куту підйому гвинтової лінії фрези. Проведено експериментальні дослідження, які дозволили встановити можливість застосування нової конструкції фрези на вибраному верстаті.
6. Очікуваний економічний ефект від формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс із зношених зубчастих коліс становить 299 тис. грн. на одне зубчасте колесо.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Видання, що внесені до переліку наукометричних баз

1. Кривошея А. В. Математические модели формообразования звеньев плоских систем зубчатых зацеплений / А. В. Кривошея, О. В. Голобородько, А. В. Коринец // Сверхтвердые материалы. – 20014. – № 5. – С. 60–76. *Здобувач склав алгоритми і практично їх реалізував по формоутворенню ланок плоских систем зубчастих зачеплень.*

АНОТАЦІЯ

Голобородько О. В. Формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс спеціальними черв'ячними фрезами з урахуванням вихідного профілю заготовки. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ, 2014.

Дисертація присвячена рішення актуального науково-технічного завдання, формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс спеціальними черв'ячними фрезами з урахуванням вихідного профілю заготовки.

Основною передумовою формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс є аналіз існуючих способів формоутворення циліндричних зубчастих передач з використанням розроблених програмно-реалізованих математичних моделей по завданню і математичному опису вихідних формоутворюючих контурів, а також формоутворення інших ланок робочих та верстатних зачеплень. За допомогою програмно-реалізованих моделей проведений аналіз формоутворення великогабаритних зубчастих передач. Такий аналіз дозволив встановити можливість формоутворення циліндричних зубчастих коліс після їх зносу, який досягає 8 мм по товщині зубу. Формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс після такого зносу, з урахуванням вихідного контуру заготовки, допускається за рахунок використання зубчастих коліс с зачепленням Новікова.

На основі результатів досліджень були спроектовані та виготовленні спеціальні збірні черв'ячні фрези і формоутворенні великогабаритні циліндричні зубчасті колеса з зачепленням Новікова. Проведено дослідно-виробниче впровадження технології формоутворення зношених великогабаритних циліндричних зубчастих коліс зачеплення Новікова в умовах ТОВ «Укркомплект» з подальшою експлуатацією на Інгулецькому гірничозбагачувальному комбінаті.

Ключеві слова: формоутворення, великогабаритні циліндричні зубчасті колеса, черв'ячні фрези, вихідний контур, зубофрезерування.

ABSTRACT

Oleh Holoborodko. Forming of large-size cylindrical gears by special hob-cutters adjusted for part blank profile. – Manuscript.

Dissertation for the Candidate of Science (Eng.) degree in speciality 05.03.01 – Machining Processes, Machines, and Tools. – V. Bakul Institute for Superhard Materials, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2014.

Thesis is devoted to solving of an actual scientific-technical task: forming of large-size cylindrical gears by special hob-cutters adjusted for part blank profile. The main prerequisite for the forming of large-size cylindrical gears is analysis of existing forming methods of large-size cylindrical gears with the use of developed software-based mathematical models for specification and mathematical description of initial forming contours as well as forming of other links of working and manufacturing gearing. By means of software-based models an analysis of large-size cylindrical gears forming taking into account undercut, modification and interference avoidance was carried out. This analysis allowed it to ascertain possibility of

cylindrical gears forming after their wear of up to 8 mm in cog width. Forming of large-size cylindrical gears adjusted for part blank contour after such wear is allowed due to the use of Novikov or involute gearing on account of initial contour shift of hob-cutter with modified profile. On the basis of the research results special assembled hob-cutters of 20 mm module were designed and manufactured and large-size cylindrical gears were formed. Experimental-manufacturing implementation of worn-out large-size cylindrical Novikov gears forming technology is carried out on the basis of the «Ukrkomplekt» company with further operation on Inguletsky ore mining and processing enterprise.

Keywords: forming, large-size cylindrical gears, hob-cutters, initial contour, cog cutting.