

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

ПАЩЕНКО ДМИТРО МИХАЙЛОВИЧ

УДК 621.95.01 : 004.942

**Проектування збірних черв'ячних фрез для обробки крупномодульних
циліндричних зубчастих коліс**

Спеціальність 8.05050302 – інструментальне виробництво

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
магістр**

Київ – 2013

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
Національний технічний університет України «КПІ», м.
Київ, професор кафедри інтегрованих технологій
машинобудування імені П.Р. Родіна

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

**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 „18” червня 2013 року о 14:00 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.611

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. 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 евольвентне зубчасте колесо , шляхом зміщення вихідного виробничого контуру черв'ячної фрези. Але при певній величці зміщення виробничого контуру черв'ячної фрези настає інтерференція в зубчастій передачі, яку можливо усунути модифікацією профілю виробничого контуру черв'ячної фрези та відповідною модифікацією профілю зубчастого колеса. Рішення цієї задачі з допомогою традиційних методик неможливо. Тому розробка методики проектування та конструкції крупномодульних збірних черв'ячних фрез з модифікованим профілем для виготовлення циліндричних зубчастих коліс 8 9-ої ступеня точності із твердістю зубів до HB 320 із зношених зубчастих коліс є актуальним завданням.

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

Задачі досліджень:

1. Визначити структуру логічного графа для теоретичного та технологічного формоутворення крупномодульних великогабаритних циліндричних зубчастих коліс з модифікованим профілем із зношеного зубчастого колеса.

2. Удосконалення методики завдання, математичного опису й візуалізації на ПК вихідних формотворних профілів з евольвентним модифікованим профілем.

3. Удосконалення узагальненої уніфікованої математичної моделі теоретичного формоутворення зубчастих контурів плоскої системи зубчастих зачеплень.

4. Виконати аналіз області існування рейкових вихідних виробляючих контурів для формоутворення евольвентних циліндричних зубчастих передач.

5. Обґрунтувати спосіб формоутворення великогабаритного зубчастого колеса використовуючи як заготовку зношене евольвентне зубчасте колесо.

6. Розробити методику проектування та конструкцію спеціальної крупномодульної збірної черв'ячної фрези з модифікованим профілем.

7. Експериментально дослідити зусилля різання при моделюванні процесу зубофрезерування.

8. Охорона праці при виконанні експериментальних досліджень.

Об'єкт досліджень. Формоутворення вихідного інструментального (виробничого) модифікованого контуру черв'ячної фрези.

Предмет досліджень. Аналіз і синтез формоутворення зубчастих контурів з модифікованим профілем 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. Удосконалена методика завдання та математичного опису вихідних формотворних евольвентних модифікованих профілів.

2. Удосконалена узагальнена уніфікована математична модель прямого й оберненого формоутворення зубчастих контурів плоских систем зубчастих зачеплень з евольвентним модифікованим профілем.
3. Вперше показано принципову можливість формоутворення модифікованим профілем інструменту без точки злому зубчастого колеса без підрізу, але з точкою злому.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Удосконалена методика проектування та конструкція збірних циліндричних черв'ячних фрез з модифікованим профілем.
2. 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 зміщенні вихідного виробляючого контуру черв'ячної фрези та модифікації її профілю.

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

Публікації. По темі магістерської роботи опубліковано 1 стаття.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота складається з вступу, 6 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 103 сторінки, з них 95 сторінок основного тексту без урахування малюнків, виконаних на окремих сторінках, 25 рисунків і 12 таблиць, 4 додатків, 44 назв літературних джерел на 5 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

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

У **першому розділі** дисертації проведено аналіз літературних джерел з питань завдання, теоретичного і технологічного формоутворення черв'ячними фрезами великогабаритних евольвентних циліндричних зубчастих передач, в тому числі з модифікованим профілем, та існуючих способів їх формоутворення із зношених зубчастих коліс. Представлений аналіз конструкцій збірних черв'ячних фрез.

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.

Використовуючи теорію багатопараметричних відображень афінного простору, розроблена узагальнена уніфікована і компактна математична модель формоутворення ланок плоских систем зубчастих зачеплень без виведення громіздких аналітичних залежностей (1):

$$m_r \text{ И / Д} = m_{\varphi_0^w l_0^w} m_{\nu_1^w c_1^w} m_{\varphi_1^w l_1^w} m_{\nu_2^w c_2^w} m_{\varphi_2^w l_2^w} m_{\nu_3^w c_3^w} m_{\varphi_3^w l_3^w} m_{r_{кз}}$$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2^w &= \varphi_2^w(\varphi_3^w) \\ \varphi_1^w &= \varphi_1^w(\varphi_3^w) \\ \varphi_0^w &= \varphi_0^w(\varphi_3^w) \\ l_3^w &= l_3^w(\varphi_3^w) \\ l_2^w &= l_2^w(\varphi_3^w) \\ l_1^w &= l_1^w(\varphi_3^w) \\ l_0^w &= l_0^w(\varphi_3^w) \end{aligned} \right\}$$

$$n_{xкз}(\varphi_3^w) \nu_{xкз}(\varphi_3^w) + n_{yкз}(\varphi_3^w) \nu_{yкз}(\varphi_3^w) = 0 \quad (1)$$

Відповідно до узагальненої математичної моделі формоутворення (1) представлені окремі схеми формоутворення і їх математичні моделі (табл.).

Таблиця окремих схем формоутворення та їх математичних моделей

$m_{rИ} / D(1-2) = m_{\varphi_2^w} m_{C_{y12}} m_{l1} m_{rk(1)} ;$ $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi_2^w \leq \frac{\pi}{4} ; l_{x1} = K_{lx1} \varphi_2^w ;$ $K_{lx1} = -r_{w(2-1)} ; C_{y12} = -r_{w(2-1)} ;$ $n_{xk2}(\varphi_2^w) v_{xk2}(\varphi_2^w) + n_{yk2}(\varphi_2^w) v_{yk2}(\varphi_2^w) = 0$	$m_{rИ} / D(1-2) = m_{\varphi_2^w} m_{C_{y12}} m_{\varphi_1^w} m_{rk(1)} ;$ $-\frac{\pi}{4} \leq \varphi_1^w \leq \frac{\pi}{4} ; \varphi_2^w = K_{\varphi_2^w} \varphi_1^w ;$ $K_{\varphi_2^w} = r_{w(1-2)} / r_{w(2-1)} ; C_{y12} = r_{w(1-2)} + r_{w(2-1)} ;$ $n_{xk2}(\varphi_2^w) v_{xk2}(\varphi_2^w) + n_{yk2}(\varphi_2^w) v_{yk2}(\varphi_2^w) = 0$

Аналіз процесу формоутворення циліндричних зубчастих коліс евольвентного зачеплення показав, як залежить профіль їх зубів від коефіцієнту зміщення вихідного формотворного контуру фрези та можливих величин від'ємного коефіцієнта зміщення без підрізання при різних числах зубів багатозубого зубчастого колеса та різних кутах профілю вихідного контуру інструмента. Показано вплив модифікації профілю при рішенні прямої та оберненої задач формоутворення.

У **третьому розділі** обґрунтовано формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем з зношеного зубчастого колеса при критичному зносі, який досягав 8 мм по товщині зуба. Для цього була використана математична модель прямого і оберненого формоутворення зубчастого колеса.

Порівнявши теоретичний профіль вихідного виробничого контуру і отриманий в результаті прямого формоутворення профіль (рис. 1), можна зробити висновок, що вперше для конкретного зубчастого колеса отримано вихідний модифікований профіль рейки, що не має особливих точок злому, при формоутворенні яким, за

відсутності порушень умов формоутворення, отриманий модифікований профіль зубчастого колеса з особливими точками злому.

Можна зробити висновок, що АВС – область, в рамках якої можна змінювати параметри модифікації вихідного виробляючого контуру черв'ячної фрези без зміни модифікації профілю формоутворюваного зубчастого колеса. Відповідно можна замінювати відрізки АС і СВ на відрізок АВ (див. рис. 1).

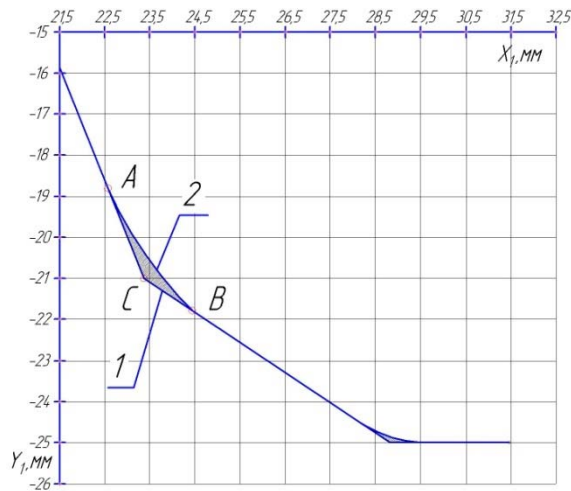


Рис. 1. Порівняння модифікованого профілю вихідного формоутворюючого рейкового контуру і профілю отриманого при прямому формоутворенні:

1 – теоретичний профіль зуба вихідного виробничого рейкового контуру з модифікованим профілем у ніжки зуба рейки; 2 – модифікований профіль вихідного виробничого контуру отриманий при прямому формоутворенні.

В четвертому розділі на базі модифікованого вихідного виробничого контуру були розраховані параметри основного конволютного черв'яка розроблена конструкція спеціальної крупномодульної модифікованої черв'ячної фрези з передньою поверхнею розташованою сходинками для нарізання великогабаритних циліндричних зубчастих коліс з евольвентним профілем із зношеного зубчастого колеса. 3D-модель фрези наведено на рис. 2.

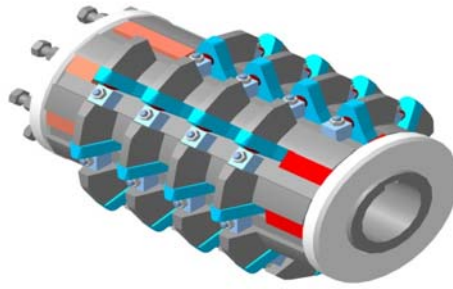


Рис. 2. 3D-модель черв'ячної фрези з модифікованим профілем.

Очікуваний економічний ефект від впровадження зубчастої передачі евольвентного зачеплення становить 299 тис. грн. на одну зубчасту передачу.

В п'ятому розділі доведено, що розташування передньої поверхні фрези сходинками призводить до збільшення сил різання.

Для оцінки збільшення сил різання були проведені експериментальні дослідження з вимірювання зусиль різання у порівнянні з розташуванням різальних елементів під різними кутами до лінії зубу фрези.

Дослідження зусиль процесу нарізування рейок проводилися на зразках, виготовлених з матеріалу конструкційної нелегованої сталі 45Л. Особливу увагу було приділено підготовці зразків. Зразки для досліджень виготовлялися з виливків. Після підготовки зразків відбувалося вимір їх твердості за Брінеллем. Для вимірювання твердості використовувався твердомер ТШ-2. Твердомір дозволяє вимірювати твердість металів і зразків з металів в межах від 8 до 450 НВ. Дослідження проводилися на горизонтально-фрезерному верстаті моделі 6М82Ш, загальний вигляд якого показаний на рис. 5.3.



Рисунок 5.3- Загальний вигляд фрезерного верстата 6М82Ш.

В якості інструменту використовувалася дискова фреза діаметром 90 мм зі вставкою (різцем) зі сталі Р6М5 рис. 5.4а. Заточка фрези-летючки вироблялася на заточний верстаті, за допомогою спеціального пристосування, при цьому задавати поворот можна у всіх трьох площинах рис. 5.4б.

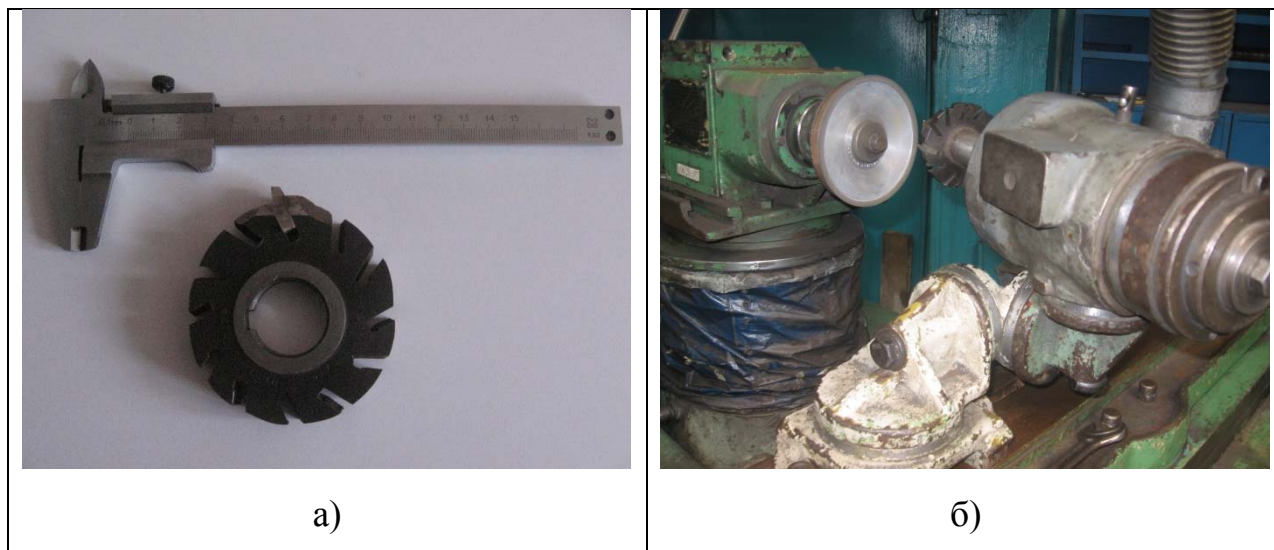


Рисунок 5.4- Дискова фреза-летучка (летучка) Φ 90 мм а) і пристосування для заточування різця б).

Фреза встановлювалася на шпиндель горизонтально-фрезерного верстата див. рис. 5.3. Сили визначають не тільки навантаження системи СНІД (верстат - пристосування - інструмент - деталь), але і температуру обробки, стійкість інструменту, точність обробки, продуктивність і необхідну потужність. Одним з основних елементів вимірювальної апаратури є динамометр. В якості динамометра використовувався випускається вітчизняною промисловістю універсальний динамометр УДМ-1200 рис. 5.5.

Дослідження проводили для двох типів різальних елементів: 1 – $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\Phi = 70^\circ$, $\Phi_1 = 70^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $\alpha_z = 2^\circ$, $h = 2,5$ мм; 2 – $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\Phi = 70^\circ$, $\Phi_1 = 70^\circ$, $\lambda = 5^\circ$, $\alpha_z = 2^\circ$, $h = 2,5$ мм. На рис. 3 і 4 приведені залежності сил різання від глибини фрезерування для двох варіантів конструкцій черв'ячних фрез. В результаті обробки експериментальних даних були отримані наступні математичні моделі для складових сил різання:

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

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

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

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

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

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

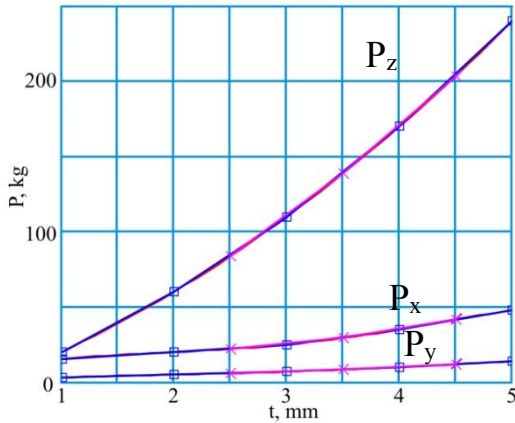


Рис. 3. Залежність сил різання від глибини фрезерування при швидкості $V = 17$ м/хв, $\lambda = 5$

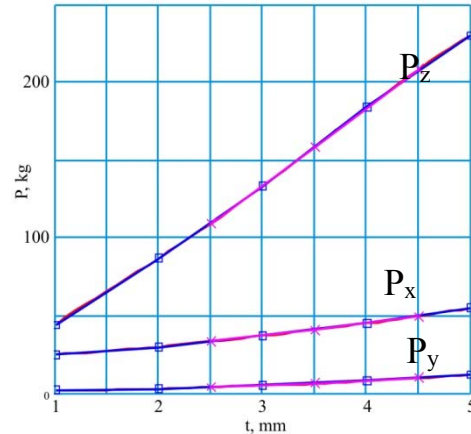


Рис. 4. Залежність сил різання від глибини фрезерування при швидкості $V = 17$ м/хв, $\lambda = 0$

Аналіз представлених результатів дає підстави зробити висновок, що збільшення сил різання при розташуванні передньої поверхні сходинок не перевищує 10%. Таке збільшення зусиль є незначним і дозволяє використовувати існуюче верстатне обладнання.

В шостому розділі представлена охорона праці при виконанні експериментальних досліджень.

Висновки та результати роботи

У роботі вирішена актуальна науково-технічна задача розробки спеціальних черв'ячних модифікованих фрез для підвищення ефективності процесу формоутворення крупномодульних великогабаритних модифікованих 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 модифікованого вихідного виробничого контуру для теоретичного та технологічного формоутворення великогабаритних циліндричних зубчастих коліс з модифікованим профілем із зношеного зубчастого колеса.
2. Удосконалена математична модель формоутворення плоских систем зубчастих зачеплень з урахуванням параметрів модифікації черв'ячної фрези, підрізання на зубчастому колесі і усунення інтерференції в зубчастій передачі.
3. Для формоутворення циліндричних зубчастих передач з модифікованим профілем який має точки зламу профілю на вершині зуба може бути спроектований інструмент рейкового типу що не має точок зламу профілю, що значно збільшить стійкість інструменту.
4. Вперше визначена область в рамках якої можна змінювати профіль модифікованого вихідного виробничого контуру не змінюючи профіль формоутворюючого зубчастого колеса;
5. Запропоновано спосіб формоутворення крупномодульних великогабаритних циліндричних зубчастих коліс з зношеного евольвентного зубчастого профілю для кульового млина МШР-3600 × 5000 (діаметр колеса 5,5м), який полягає в зміщенні черв'ячної фрези в тіло зубчастого колеса, виявлено умови, які усувають інтерференцію, розраховані параметри модифікації: коефіцієнт глибини модифікації $a_c = 0.08$, коефіцієнт висоти модифікації $h_c = 0.45$.

6. Удосконалена методика розрахунку та нова конструкція збірної крупномодульної черв'ячної фрези ($m = 20$ мм) 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.
7. 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

1. Кривошея А.В. Особенности прямого и обратного формообразования эвольвентных цилиндрических зубчатых колес с модифицированным профилем у основания зуба / А. В. Кривошея, В. Е. Мельник, Д. М. Пащенко, В. Ю. Шапошник // Материалы 13-го Международного научно-технического семинара (18-22 февраля 2013 г., Свалява) / Ассоциация технологов-машиностроителей Украины. – Киев, 2013. – С. 89–91.

АНОТАЦІЯ

Пащенко Д. М. Проектування спеціальних черв'ячних фрез для обробки крупномодульних циліндричних зубчастих коліс. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 8.05050302 – інструментальне виробництво. – Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут. – Київ, 2013

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 з урахуванням підрізання, модифікації та усунення інтерференції. Такий аналіз дозволив встановити можливість формоутворення циліндричних зубчастих коліс після їх зносу, який досягає 8 мм по товщині зубу. На основі результатів досліджень були спроектовані спеціальні збірні черв'ячні фрези модулем 20 мм

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

АННОТАЦИЯ

Пашенко Д. Е. Проектирование специальных червячных фрез для обработки крупномодульных цилиндрических зубчатых колес. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени магистра по специальности 8.05050302 – инструментальное производство. – Национальный технический университет Украины „Киевский политехнический институт. – Киев, 2013

В настоящее время на мельницах горно-обогатительных комбинатов Украины в приводах механизмов используют немодифицированные крупногабаритные цилиндрические зубчатые колеса модулем 20–30 мм, диаметром 4–12 м, массой 12–16 т, стоимостью свыше 1 млн. грн. По истечении этого срока эксплуатации 8–12 лет зубчатые колеса демонтируют, разрезают на части и отправляют на переплавку. Целесообразным и экономически оправданным является формообразование таких зубчатых колес с учетом (изношенного) исходного профиля заготовки.

Разработаны программно-реализованные математические и логические модели теоретического формообразования звеньев плоской системы зубчатых зацеплений позволяющие определить множество возможных вариантов формообразования цилиндрических зубчатых колес с учетом подрезания, модификации и устранения интерференции. Анализ этого множества позволил определить возможные варианты формообразования крупногабаритных зубчатых колес после их износа, который достигает 8 мм по толщине зуба.

На основе данных исследований были спроектированы сборные специальные червячные фрезы с модулем 20 мм.

Ключевые слова: формообразование, крупногабаритные цилиндрические зубчатые колеса, червячные фрезы, исходный контур, зубофрезерование.

ABSTRACT

Pachenko D. M. Creating special hobs processing of coarse cylindrical gears. – Manuscript.

MSc thesis by specialty 8.05050302 – Tool Production. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”. – Kyiv, 2013

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. On the basis of the research results special assembled hob-cutters of 20 mm .

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