

І.Є. Грицай, С.І. Громнюк, А.М. Кук  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

## ПАРАМЕТРИ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ЗРІЗІВ В РАДІАЛЬНО-ОБКОЧУВАЛЬНОМУ СПОСОБІ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС З ОСЬОВОЮ ПОДАЧЕЮ

© Грицай І.Є., Громнюк С.І., Кук А.М., 2013

**Розроблено математичні залежності для дослідження процесу різання і формоутворення в радіально-коловому способі нарізання зубчастих коліс дисковою фрезою. Наведено результати теоретичного аналізу параметрів зрізів – товщини і площі поперечного перерізу та експериментального дослідження зношування дискової фрези у процесі нарізання зубчастих коліс.**

**Mathematical dependences are worked out for research of cutting process and formation in the radial-circle method of gear-wheels cutting by a disk milling cutter. Results over of theoretical analysis of cuts parameters - thickness and area of transversal cut and experimental research of wear of disk milling cutter are brought in the process of cutting of gear-wheels.**

**Актуальність завдання.** У кожному методі оброблення різанням параметри зрізуваних шарів – форма, розміри і періодична зміна у циклі оброблення відповідно до схеми різання, час контакту інструменту з заготовкою в періодичному різанні, розподілення припуску між лезами та зубцями багатозубцевого інструменту дають повну інформацію про цей процес. Ці закономірності зумовлюють та відображають складні статичні і динамічні деформаційні, контактні, силові і теплові процеси і явища на інструментальних поверхнях. Визначення параметрів зрізів є першим кроком до вивчення процесу різання у відповідному методі оброблення та основою для дослідження сили різання і тертя, теплоти процесу і температури різання, інтенсивності зношування інструментів тощо.

Відомий радіально-коловий спосіб нарізання зубчастих коліс тонкими дисковими фрезами на обкочувальному зубофрезерному верстаті під час неперервного ділення-обкочування – “спосіб Благута” [1], за яким нарізаються синусоїдальні колеса. Цей спосіб придатний для виготовлення коліс будь-якого профілю, зокрема евольвентного, за зміни закону радіального зворотно-поступального періодичного руху дискової фрези, наприклад, за допомогою системи ЧПК верстата або з використанням кулачкового слідкуючого пристрою.

Як і у черв'ячному зубофрезеруванні, параметри зрізів дискової фрези визначають коливання сили за оберт фрези і роботу різання, величину теплоутворення, нагрівання і спрацювання інструменту, інтенсивність коливань і вібрацій, точність оброблення та якість утворених поверхонь. Проте внаслідок малої товщини дискової фрези її зубці порівняно із масивними та жорсткими зубцями черв'ячної фрези зазнають великих теплових і силових навантажень, а сама дискова фреза схильна до підвищених пружних деформацій та коливань, особливо в осьовому напрямку.

Оскільки параметри зрізів у цьому способі ще мало вивчені, ставиться завдання дослідити їх закономірності та вплив на силу різання, що необхідно для комплексного описання, математичного моделювання і оптимізації технологічного процесу зубонарізання та конструкції інструментів.

**Мета роботи** – встановлення закономірностей процесу різання і формоутворення та параметрів зрізів дискової фрези у радіально-коловому способі як основи для комплексного та системного дослідження процесу зубооброблення у цьому способі.

**Виклад основного матеріалу.** В більшості методів оброблення, які характеризуються простою кінематикою (точіння, стругання, протягування тощо), параметри зрізів визначаються на основі елементарних розрахункових схем. Проте у процесах зубонарізання за методом неперервного обкочування з діленням у формоутворенні бере участь велика кількість зубців і лез, параметри зрізів на яких неперервно змінюються у циклі оброблення, а їх точне визначення в кожен момент часу різання є складним завданням. Западини між зубцями колеса формуються у циклі, який охоплює часткові процеси попереднього різання десятками зубців з трьома лезами – вершинними та двома боковими. Форма і розміри зрізів відмінні на кожному зубці і лезі та змінюються за час контакту з заготовкою, при цьому на лінії зачеплення може діяти одночасно кілька зубців інструменту. У таких умовах визначення параметрів зрізів на основі спрощених розрахункових схем, якими ще до цього часу користуються на практиці черв'ячного зубонарізання, немає сенсу та не відображає суті складних процесів, що перебігають в робочих зонах зубонарізних інструментів.

Для моделювання параметрів зрізів в обкочувально-радіальному способі (РК-способі) використано основні положення, розроблені для черв'ячного зубофрезерування [2, 3]. У цій методиці різання інструменту у будь-який момент часу і у довільній точці робочого простору здійснюється у перехідній поверхні між сформованою формою впадини і необробленою поверхнею заготовки, що представлена у вигляді перехідної поверхні. Ця поверхня утворюється контурами зубців, які здійснювали на різі у попередніх циклах взаємного переміщення, приведених до лінійного і кутового положення цього зубця, а їх переріз визначає миттєву форму та розміри перерізу зрізу для цього зубця. Наприклад, як формується миттєвий переріз зубця черв'ячної фрези на гвинтовій поверхні у певному повороті його передньої поверхні стосовно заготовки, на рис. 1 показано множину перерізів, яка визначає його форму і розміри зрізу.

Для моделювання параметрів зрізів дискової фрези у РК-способі неперервного зубонарізання необхідно встановити, як впливає кінематика цього способу на формування миттєвого перерізу зрізів. Результуючий рух різання-формоутворення складається з обертання фрези навколо осі з центром в т.  $O_r$  – руху різання; руху колової подачі – неперервного обертання заготовки в русі обкочування навколо т.  $O_{кн}$  (конструктивний рух); руху інструменту в осьовій подачі (рис. 2, 3), де  $O_r$ ,  $O_{кн}$  – точки геометричної та кінематичної осей фрези.

У проміжному положенні фрези перехідна поверхня розглядається утвореною цим  $i$ -м зубцем з миттєвим радіусом виступів  $\rho_i$ ; цим самим зубцем у попередньому по осьовій подачі фрези положенні  $s_{o_{i-1}}$ , що має такий самий миттєвий радіус:  $\rho_i = \rho_{(i-1)s}$  (рис. 4, а), а також попереднім за подачею на зубець фрези  $s_{z_{i-1}}$  зубцем з радіусом виступів  $\rho_{(i-1)\phi}$  (рис. 4, а), слід якого повернений у напрямку обертання заготовки на одиничний кут обкочування  $\psi = \frac{360}{Z_k \cdot Z_\phi}$  (рис. 5), при цьому:

$$x_i = (R_{a\phi} + e \cdot \cos \varphi_i) \cdot \cos \frac{\varphi_i}{Z_k}; \quad (1)$$

$$y_i = (R_{a\phi} + e \cdot \cos \varphi_i) \cdot \sin \frac{\varphi_i}{Z_k}; \quad (2)$$

$$\rho_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}. \quad (3)$$

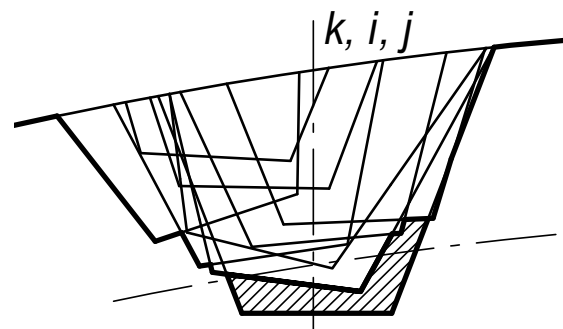


Рис. 1. Утворення миттєвого перетину зрізу одним із зубців черв'ячної фрези в його певному кутовому лінійному положенні у зоні різання

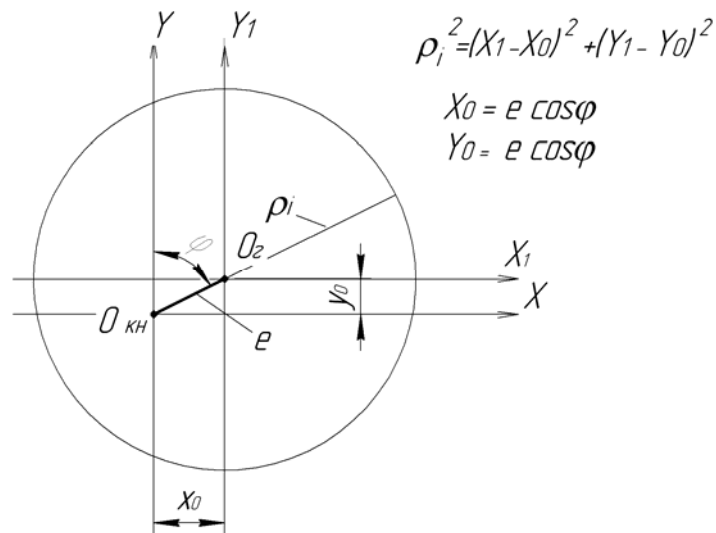


Рис. 2. Миттєвий радіус-вектор  $i$ -го зубця дискової фрези стосовно базової системи координат  $XO_kY$

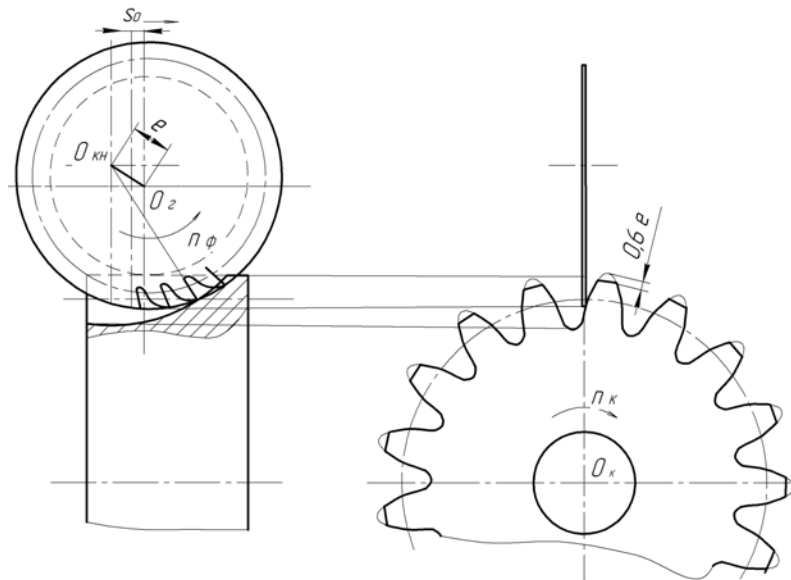


Рис. 3. Схема формоутворення і різання в РК-способі

Під час різання в одній впадині кут повороту фрези  $\varphi$  змінюється від 0 до  $2\pi$  з кроком  $\tau_{\varphi p} = \frac{360}{Z_{\varphi}}$ , де  $Z_{\varphi}$ ,  $Z_k$  – кількість зубців фрези та колеса відповідно. За такого описання кінематики

неперервний процес різання розглядається у дискретних фіксованих фазах, в яких відтворюються взаємні послідовні положення фрези і заготовки в русі різання, обкочування і осьової подачі.

Параметри зрізів змінюються у межах дуги контакту зубця з заготовкою. Товщина зрізів на вершинному лезі зростає від нульового значення до максимального, що відповідає куту  $\Phi$  повороту фрези, а на виході зубця з контакту з заготовкою знову зменшується до нуля. Значення кута  $\Phi$ , що змінюється на кожному зубці внаслідок ексцентриситету, під час розгляду цієї та попередньої по осьовій подачі положення фрези дорівнює:

$$\Phi_i = \arctg \frac{\Delta x_i}{\rho_{\min}}, \quad (4)$$

де  $\rho_{\min} = R_{a\varphi} - e$ .

Величина  $\Delta x_i$  визначається із умови перетину кіл, що мають миттєві радіуси вершин виступів зубців  $\rho_i$  та  $\rho_{i-1}$  з поверхнею заготовки зубчастого колеса у площині різання, що збігається з осьювою площиною фрези.

Координати перетину прямої  $y = \rho_{\min} = R_{af} - e$  з колом миттєвого радіуса  $\rho_i$ , яке перебуває у попередньому по осьовій подачі положенні  $s_{o,i-1}$ :

$$x_{1,2} = s_o \pm \sqrt{2 \cdot R_{af} \cdot e \cdot \cos \varphi_i - e^2 \cdot \cos^2 \varphi_i}, \quad (5)$$

звідки отримаємо:

$$\Delta x_i = \sqrt{2 \cdot R_{af} \cdot e \cdot \cos \varphi_i - e^2 \cdot \cos^2 \varphi_i}. \quad (6)$$

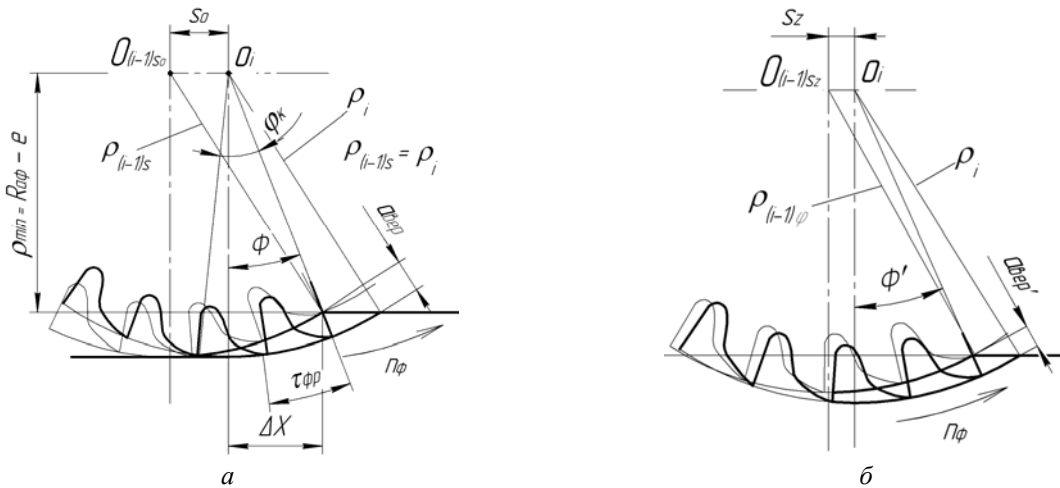


Рис. 4. Визначення координат миттєвих радіус-векторів вершин сусідніх зубців у сліді від осьової подачі (а) та від сліду по подачі на зубець фрези (б)

Після перетворень миттєва середня товщина зрізів на вершинному лезі  $a_{в.с.}$ , що відповідає цьому миттєвому радіусу і куту повороту фрези  $\varphi_i$ , приведена до площини передньої поверхні її зубця, становить (рис. 5):

$$a_i = \frac{\rho_i \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \operatorname{ctg}^2 \Phi_i}} - \rho_{\min}}{\cos \Phi_i}. \quad (7)$$

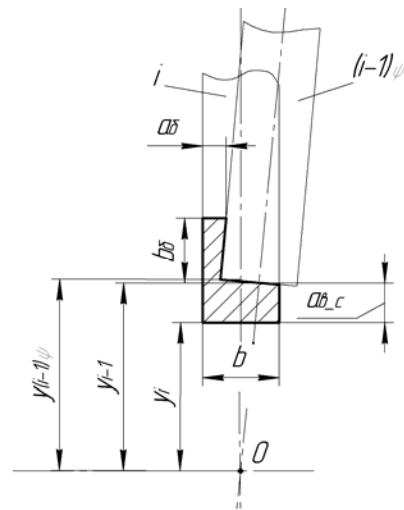


Рис. 5. Формування миттєвої перехідної поверхні внаслідок накладання слідів різів двома сусідніми зубцями по подачі на зубець фрези і повороту попереднього сліду на одиничний кут обкочування

Аналогічно знайдемо товщину зрізів на вершинному лезі у положенні  $s_{z,i-1}$ . Кут відносного повороту передньої поверхні у цьому випадку дорівнює:

$$\Phi = \arctg \frac{\Delta x_i}{y'}, \quad (8)$$

де

$$\Delta x_i = \sqrt{\rho_{i-1}^2 - \rho_{\min}^2} - \frac{s_o}{Z_{фр}}; \quad (9)$$

$$y' = \rho_i - \rho_{i-1}. \quad (10)$$

**Результати моделювання.** Дослідження параметрів різання та графіки виконані за допомогою електронних таблиць Excel на основі залежностей (1)–(10), які описують миттєві положення

і величини радіус-векторів зовнішнього діаметра фрези у послідовних кутах її повороту через одиничний кут обточування та їх перетину з характерними поверхнями заготовки. Товщина зрізу визначається у точці виходу зубця з заготовки на куті  $\Phi$ , де вона має найбільше по довжині дуги контакту значення під час різання з зустрічною подачею.

На рис. 6–10 показано залежності товщини зрізів на вершинному лезі по куту повороту фрези від модуля, осьової подачі, максимальної товщини від кількості зубців фрези; ширини зрізів боковим вхідним лезом ( $D_{af} = 200$  мм,  $s_o = 2$  мм/об.  $m = 2,5$  мм) та сумарної площі зрізів на вершинних і бокових лезах фрези.

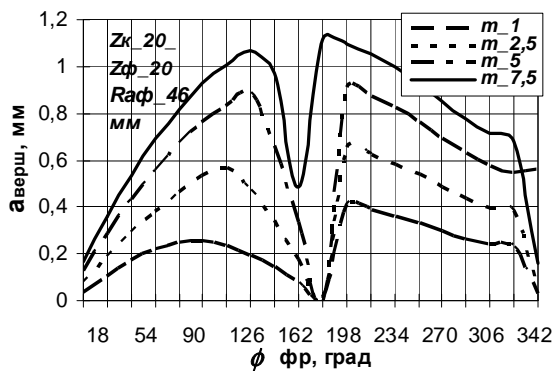


Рис. 6. Залежність товщини зрізів вершинного леза від модуля: осьова подача 2 мм/об.;  $Z_k = 20$ ;  $Z_{фр} = 20$ ;  $D_{af} = 92$  мм; ширина вершинного леза фрези 2 мм; передавальне число мультиплікатора 3

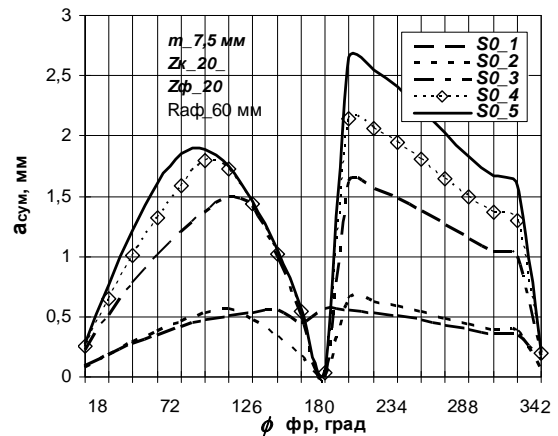


Рис. 7. Залежність товщини зрізів вершинного леза від осьової подачі:  $m = 7,5$  мм;  $D_{af} = 150$  мм

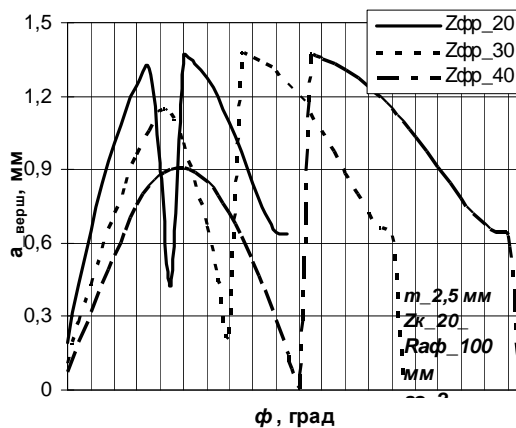


Рис. 8. Залежність товщини зрізів вершинного леза від кількості зубців фрези: подача  $S_o = 2,5$  мм/об. колеса;  $Z_k = 35$ ;  $D_{af} = 120$  мм;  $m = 7,5$  мм

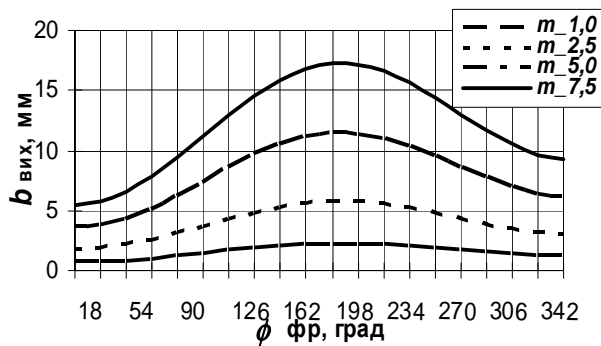


Рис. 9. Залежність ширини зрізів на бокових вхідних лезах від модуля: подача  $S_o = 5$  мм/об. колеса;  $Z_k = 35$ ;  $Z_{фр} = 20$ ;  $D_{a\_ф} = 120$  мм

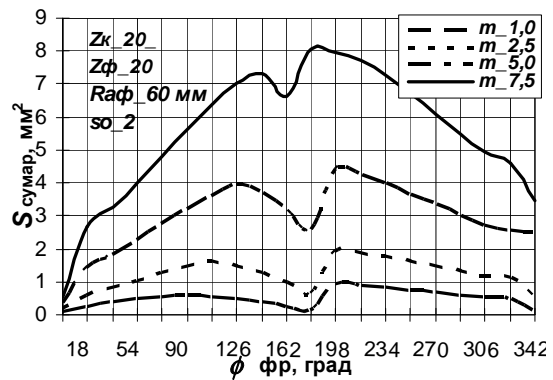


Рис. 10. Залежність сумарної площі зрізів від модуля

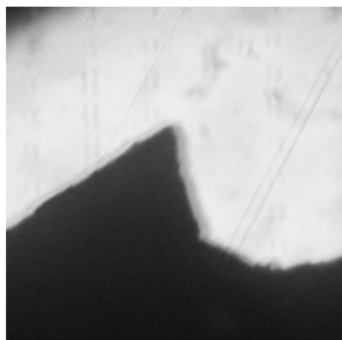
З наведених графіків випливає, що найнавантаженишими зубцями фрези є не ті, що розташовані на максимальному ексцентриситеті, як це здавалося б, враховуючи рух фрези, яка встановлена ексцентрично за синусоїдальним законом, а дві групи зубців, розташованих на кутах повороту у ділянці  $90^{\circ}$ – $130^{\circ}$  і  $180^{\circ}$ – $250^{\circ}$  (залежно від параметра зрізів). Ці групи зубців знімають найбільшу за площею перерізу стружку та зазнають найінтенсивнішого зношування. Подібна картина спостерігається також для інших діапазонів робочих режимів та параметрів фрези і колеса. Вихідні леза фрези фактично не беруть участі в усуненні припуску із впадин між зубцями коліс і працюють частиною висоти, що мало відрізняється від товщини на вершинних лезах.

**Експериментальні дослідження.** Отримані дані узгоджуються з експериментальними результатами, отриманими під час нарізання прямозубого колеса модулем 2,5 мм і кількістю зубців 56 дисковою фрезою (матеріал – Р6М5;  $D_{aф} = 160$  мм;  $s_o = 2$  мм/об.;  $Z_{ф} = 64$ ). Вимірювання за допомогою інструментального мікроскопа підтверджує зношування дискової фрези на ділянках, де теоретичні значення товщини і площі поперечного перерізу зрізів є максимальними. На рис. 11 показано зубець, що працює на ділянці повороту фрези  $185^{\circ}$  (а) та зубець – на ділянці  $210^{\circ}$  (б), величина зношування по задній поверхні становить 0,55 мм.

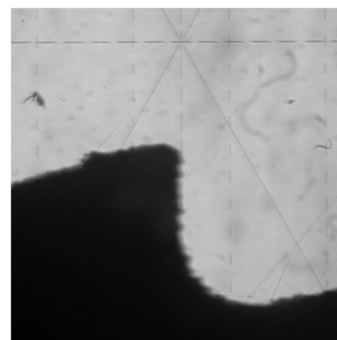
**Висновки:** 1. Розроблено методику та визначено розрахункові схеми для встановлення параметрів зрізів дискової фрези у радіально-коловому способі нарізання зубчастих коліс. Отримані дані становлять основу для комплексного і системного дослідження процесу різання у цьому способі зубооброблення.



Рис. 11. Нарізання зубчастого колеса дисковою фрезою в умовах неперервного обточування на зубофрезерному верстаті мод. 5E32



а



б

Рис. 12. Зношування зубців дискової фрези

2. Основні положення розробленої методики та отримані залежності для розрахунку параметрів зрізів підтверджені аналізом закономірностей зношування зубців фрези, що відповідають їх розрахунковому навантаженню.

3. Встановлено кути повороту дискової фрези та ділянки різання, на які припадають найбільші товщина зрізаного шару та площа поперечного перерізу зрізів. Найнавантаженішими зубцями дискової фрези за параметрами зрізів є не ті, що розташовані на ділянці максимального ексцентриситету, а зубці на ділянках, наближених до величини  $e_{max}$ , на підході до максимального ексцентриситету та відразу після його проходження.

1. Патент України №73550: МПК7 В23Р15/14: Благут Е.М. Спосіб нарізки зубчастих коліс синусоїдальної передачі Благута. Бюл. № 8, 2005 р. 2. Грицай І.Є. Моделювання параметрів зрізів, сил та моментів під час нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами // *Машинознавство*. – 1998. – № 7. – С. 19–23. 3. Грицай І.Є., Афтаназів І.С. Підвищення ефективності двоперехідного нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами з модифікованим профілем // *Вестник Национального технического университета Украины “Киевский политехнический институт” // Машиностроение*. – 2001. – Вып. 40. – С. 140–149.

УДК 621.9.02:621.9.14

І.Є. Грицай, Н.М. Юрчишин

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

## **ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМОУТВОРЕННЯ ТА МЕТОДИЧНІ ПОХИБКИ ПРОФІЛЮВАННЯ У РАДІАЛЬНО-КОЛОВОМУ МЕТОДІ НАРІЗАННЯ ГЛОБОЇДНИХ ЧЕРВ'ЯЧНИХ КОЛІС**

© Грицай І.Є., Юрчишин Н.М., 2013

**Встановлено закономірності формоутворення та розроблено залежності для розрахунку методичних похибок нарізуваних профілів зубців в радіально-коловому способі виготовлення глобоїдних черв'ячних коліс з радіальною подачею.**

**The regularities of formation and developed according to the calculation methodology errors of the made teeth profiles in radial-circular manner making hloboyidnyh worm wheels with radial serve.**

**Постановка проблеми.** Глобоїдні черв'ячні передачі широко використовують у машинобудуванні, зокрема, у приводах підйимально-транспортних машин. Проте їх переваги порівняно із циліндричними черв'ячними передачами – багатопарність зачеплення і підвищена навантажувальна здатність, кращі умови контакту зубців, здатність до самогальмування – нівелюються підвищеною складністю інструментів і технології нарізання глобоїдних коліс, необхідністю у спеціальному обладнанні та жорсткими вимогам до точності його налагоджування. Існуюча технологія має вузьку спеціалізацію та не передбачає універсальності, бо для кожної глобоїдної пари потрібен власний комплект черв'ячних фрез і оснащення. Це обмежує область використання цієї технології великосерійним або масовим виробництвом.

Можливості, закладені у способі радіально-колового зубонарізання (“метод Благута” [1]), можуть компенсувати відсутність сьогодні у виробництві глобоїдних черв'ячних фрез і спеціальних верстатів для їх виготовлення та дають змогу використати для виготовлення коліс глобоїдних черв'ячних пар прості дискові фрези і серійне зубонарізне обладнання.