

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 зрізуваного 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 фрезам 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-кологого 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.

Аналіз публікацій та стану проблеми. Придатність радіально-колового способу (РКС) для нарізання глобоїдних черв'ячних коліс дисковою фрезою на зубофрезерному верстаті розглянуто у [2]. Особливості геометрії глобоїдного зачеплення, які ускладнюють традиційну технологію, полягають у такому. Номінальні бокові поверхні глобоїдних лінійчастих черв'яків, які використовуються найширше у практиці зубчастих передач, утворюються коловим рухом прямолінійної твірної 1, яка обертається навколо профільного кола діаметром D_p та є дотичною до цього кола. Рух твірної 1 у немодифікованих глобоїдних черв'яків рівномірний та відбувається з постійною кутовою швидкістю ω_p . Витік такого черв'яка має прямолінійну форму в осьовому перерізі – площині 3 ділильного глобоїда 2 (рис. 1, а). Профіль зубців глобоїдного колеса визначається конструкцією і розмірами глобоїдного черв'яка та глобоїдної черв'ячної фрези, яка відтворює верстатне глобоїдне зачеплення у процесі нарізання черв'ячного колеса. Прямолінійність гвинтової виробничої поверхні черв'яка зумовлює прямолінійність зубців колеса, а кут між твірними, що формують профіль черв'яка, визначає ділильний кут профілю в його осьовому перерізі (рис. 1, б).

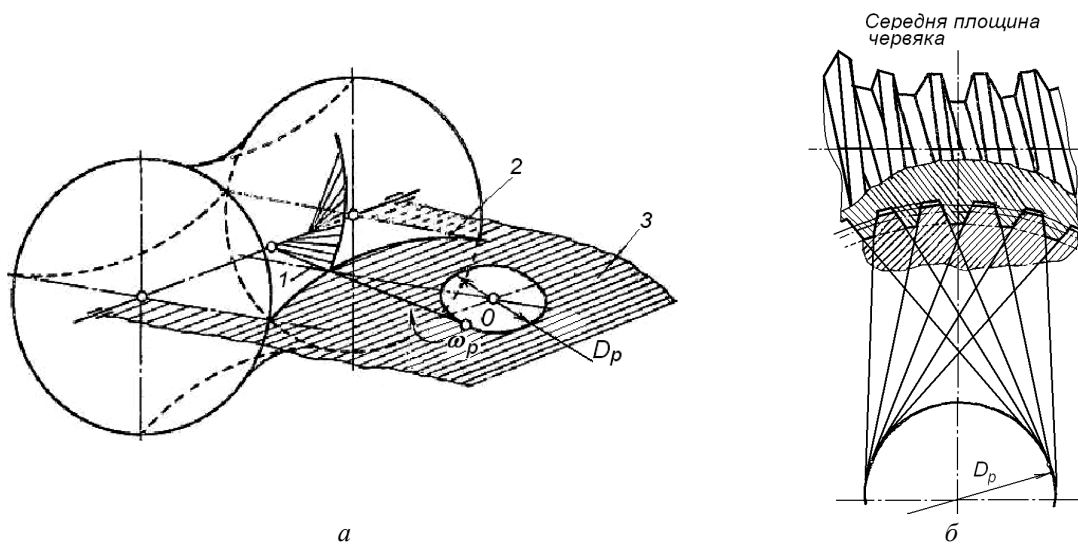


Рис. 1. Утворення бокової поверхні витка глобоїдного черв'яка (а) та геометрія глобоїдного зачеплення (б)

Мета роботи – промоделювати формоутворення та встановити залежності для розрахунку похибок профілів зубців глобоїдних коліс у радіально-кововому методі нарізання глобоїдних черв'ячних коліс дисковою фрезою для розроблення методики їх усунення.

Викладення основного матеріалу. Універсальність РК-способу забезпечує отримання заданих конструктивних параметрів черв'ячного колеса, оскільки у РК-способі кут зачеплення в передачі та відповідно ділильний кут профілю можна змінювати у широких межах – від 10^0 до 45^0 зміною профільного кута дискової фрези (рис. 2). Необхідна висота зубця колеса забезпечується вибором відповідного ексцентриситету фрези.

Особливості формоутворення у РК-способі нарізання глобоїдних черв'ячних коліс з радіальною подачею. Як і під час нарізання глобоїдних черв'ячних коліс глобоїдною черв'ячною фрезою, у РК-способі (рис. 3) різання відбувається з радіальною подачею. Особливості формоутворення у цьому

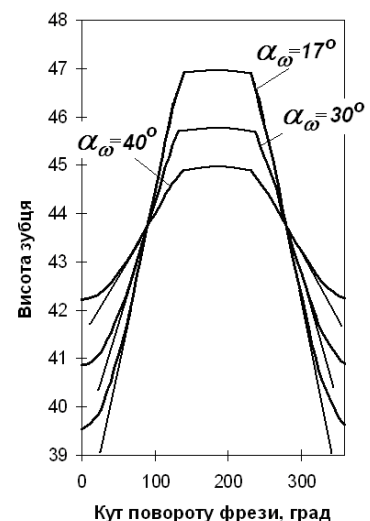


Рис. 2. Зміна кута профілю зубця глобоїдного колеса, отриманого РК-способом залежно від кута профілю дискової фрези

способі такі, що у кожному i -му положенні зубця дискової фрези в циклі радіальної подачі він здійснює рух по власному сліду, залишеному в його попередньому i_{sr-1} -му положенні у радіальному переміщенні інструмента. Це призводить до виникнення похибки профілів глобоїдних зубців, на яких залишаються сліди від радіальної подачі та колового руху зубців від обертання інструмента. На рис. 4 показано початкове положення дискового інструмента стосовно заготовки глобоїдного черв'ячного колеса, а на рис. 5 – схему утворення профілів в одній впадині між зубцями (а) та положення зубців, сусідніх по діаметру інструмента, радіус-вектори яких змінюються за законом ексцентриситету.

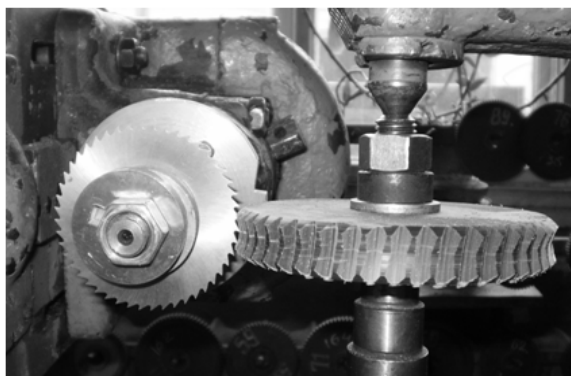


Рис. 3. Нарізання глобоїдного черв'ячного колеса дисковою фрезою на зубофрезерному верстаті. Кількість зубців: колеса – $z_k=50$; фрези – $z_f=48$; матеріал колеса – текстоліт, зовнішній діаметр – $D_a=132$ мм

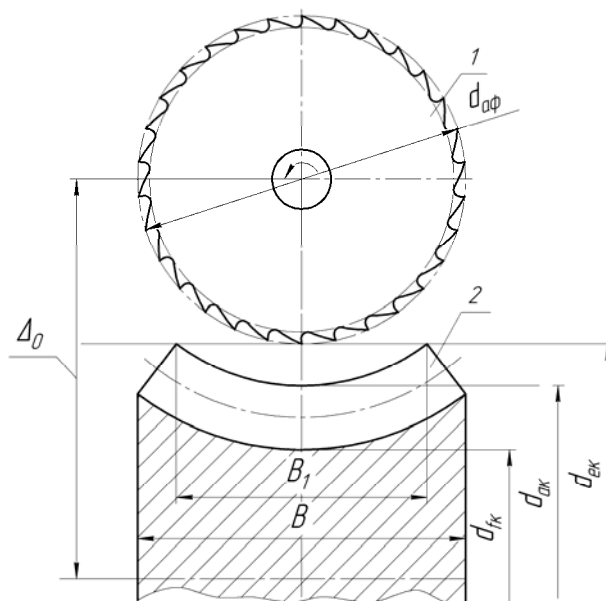


Рис. 4. Початкове положення дискової фрези (1) ($z=30$; $m=1,6$; $b=2$) стосовно оброблюваного глобоїдного черв'ячного колеса (2)

Сукупність слідів фрези по осьовій подачі можна відтворити у торці нарізованого колеса, як це відображено на рис. 6, а. Міжцентрова віддаль у верстатному зачепленні у циклі радіальної подачі зменшується від початкової величини A_0 до A_{0k} , де k – кількість циклів різання під час формування однієї впадини між зубцями:

$$k = \frac{2 \cdot e}{s_r} ;$$

$$A_{0k} = A_0 - k \cdot s_r , \quad (1)$$

де s_r – радіальна подача заготовки, мм/об.; e – ексцентриситет фрези, мм.

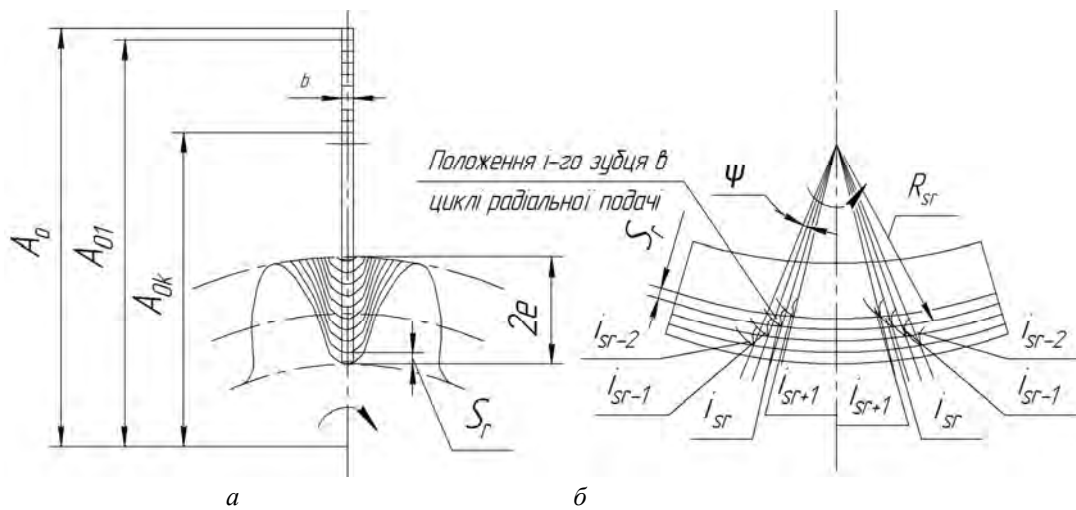


Рис. 5. Розрахункова схема різання – формоутворення дискової фрези у циклі радіальної подачі в РК-способі

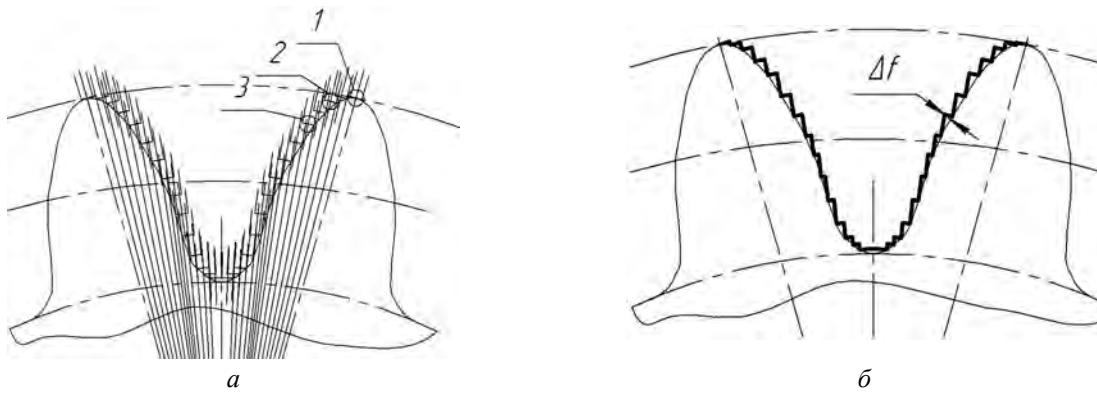


Рис. 6. Формування профілів зубців синусоїдального колеса у торцевому вигляді (а) та методична похибка профілів у РК-способі (б)

Після прорізання впадини на повну глибину синусоїдальні зубці матимуть систематичну похибку Δf_1 профілів, яка притаманна цьому способу зубонарізання. Цей висновок підтверджується експериментально. На рис. 7 показано фото зубців глобоїдного колеса з означеною похибкою профілів.

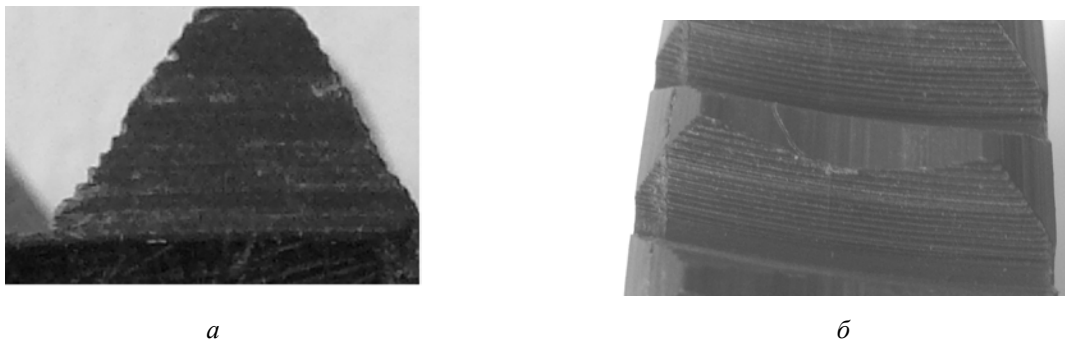


Рис. 7. Сліди інструментальної поверхні на профілях зубців черв'ячного глобоїдного колеса, нарізаного РК-способом з радіальною подачею: а – вигляд з торця; б – сліди на ширині вінця

Враховуючи наведену схему різання (рис. 5), величину похибки Δf_1 зубця глобоїдного колеса можна розрахувати із залежності

$$\Delta f_1 = (y_i - y_{(i-1)}) \cdot \sin \left[\operatorname{atg} \left(\frac{b}{y_i - y_{(i-1)}} \right) \right], \quad (2)$$

де b – ширина дискової фрези; $y_i, y_{(i-1)}$ – координати двох сусідніх точок профілю, утворених під час різання двома сусідніми зубцями дискової фрези.

Перша методична похибка, притаманна РК-способу, під час нарізання глобоїдних черв'ячних коліс. Нижче показано графіки цього відхилення у профілях зубців за один оберт фрези у функції від модуля (рис. 8) та від кількості зубців колеса (рис. 9).

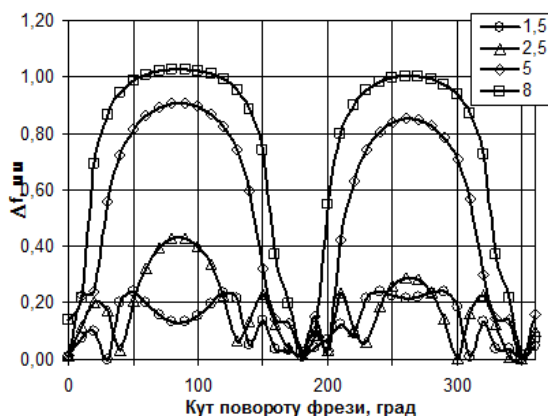


Рис. 8. Похибки профілів глобоїдного колеса від слідів інструмента за радіальною подачею залежно від модуля: ширина фрези $b = 2$ мм; радіальна подача $s_r = 0,2$ мм/об. колеса; $D_{ак} = 125$ мм; $D_{а_фр} = 80$; $m = 5$ мм, $z_{фр} = 36$; $z_k = 25$

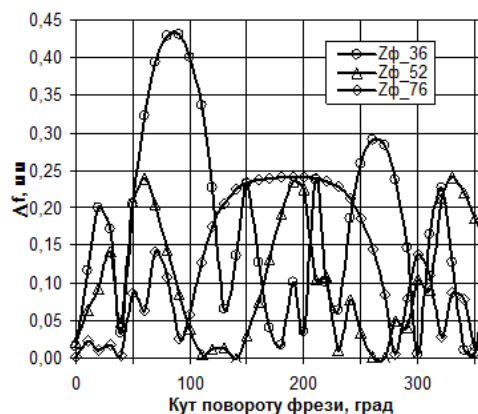


Рис. 9. Похибки профілів глобоїдного колеса внаслідок слідів інструмента за радіальною подачею від кількості зубців дискової фрези: ширина фрези: $b = 2$ мм; радіальна подача – $s_r = 0,2$ мм/об. колеса: $D_{ак} = 125$ мм; $m = 2,5$ мм; $z_k = 25$

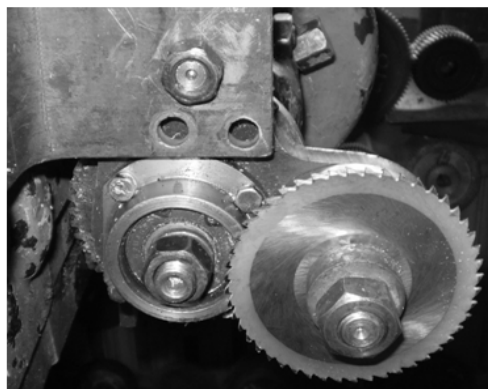


Рис. 10. Нарізання глобоїдного черв'ячного колеса дисковою фрезою на зубофрезерному верстаті з мультиплікатором та зі зміною закону формоутворення

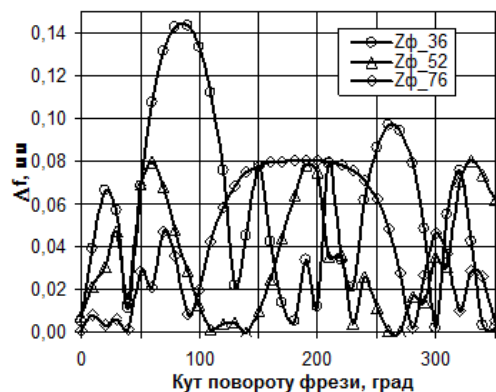


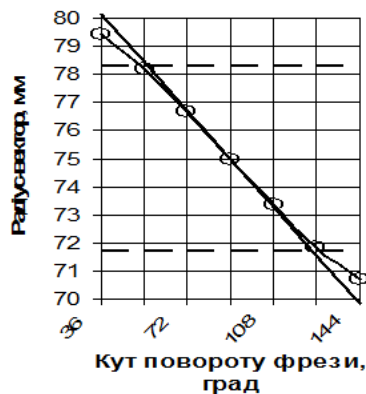
Рис. 11. Похибки профілів глобоїдного колеса від слідів інструмента в радіальній подачі від кількості зубців дискової фрези під час різання з мультиплікатором: ширина фрези – $b = 2$ мм; радіальна подача – $s_r = 0,2$ мм/об. колеса; $D_{ак} = 125$ мм; $m = 2,5$ мм $z_k = 25$

Усунення означеної похибки профілів можливе або шляхом збільшення кількості зубців фрези, або зміною закону різання – розімкненням кінематичного ланцюга між обертанням заготовки і обертанням фрези. В останньому випадку це реалізовано введенням на осі фрези між інструментальним верстатним шпинделем та віссю дискової фрези мультиплікатора, який дає змогу підвищити частоту обертання фрези у багато разів, що дорівнює його передавальному числу (рис. 10) [2]. Відповідно у стільки ж разів збільшується кількість профілюючих нарізів, зменшується висота залишкових виступів на профілях

колеса і підвищується якість оброблення. На рис. 11 показано графіки залежності похибки профілів глобоїдного колеса від слідів інструмента для тих самих початкових даних, що зазначені на рис. 9, під час використання мультиплікатора, передавальне число якого дорівнює 3.

Друга методична похибка профілів зубців глобоїдного черв'ячного колеса. У межах робочої висоти головки синусоїдального зубця, що дорівнює $+0,6e$, де e – ексцентриситет фрези, існує відхилення прямої, що збігається з боковою поверхнею глобоїдного зубця у ділительній площині від фактичного профілю, який отримують у РК-способі (рис. 12) (активна висота зубця – 6,75 мм; межі висоти – $\pm 0,6 \cdot e$, відмічені штриховими лініями).

Рис. 12. Теоретичний та дійсний профілі зубця глобоїдного черв'ячного колеса: еквівалентний модуль – 7,5 мм; кількість зубців: фрези – 20, колеса – 20; осьова подача – 2 мм/об.; кут зачеплення – $2\alpha_x = 40^\circ$; активна висота зубця – 6,75 мм (межі, відмічені штриховими лініями; ділительний діаметр колеса – 150 мм; зовнішній діаметр фрези – 92 мм



Лінія, що збігається з боковою лінією профілю зубця в осьовому перерізі колеса, є прямою, дотичною до синусоїди у точці перетину профілю з ділительним діаметром колеса. Кутовий коефіцієнт цієї прямої отримаємо з рівняння похідної до синусоїди у цій точці, тобто

$$k = \left. \frac{d\rho}{d\varphi} \right|_{\varphi=\pi/2} = -e = \operatorname{tg} \alpha_x, \quad (3)$$

тоді рівняння дотичної:

$$y = -e \cdot x + b, \quad (4)$$

де e – ексцентриситет фрези; $b = \frac{m \cdot z + e \cdot \pi}{2}$.

Відхилення синусоїдального профілю від дотичної до цього профілю у межах $\pm 0,6 e$ залежно від модуля, кількості зубців фрези та кута зачеплення (кута профілю фрези) показано на рис. 13.

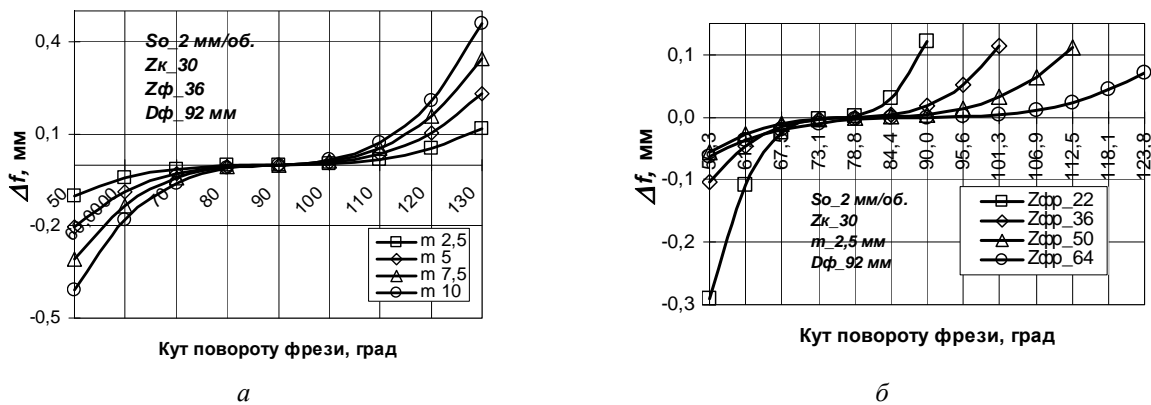
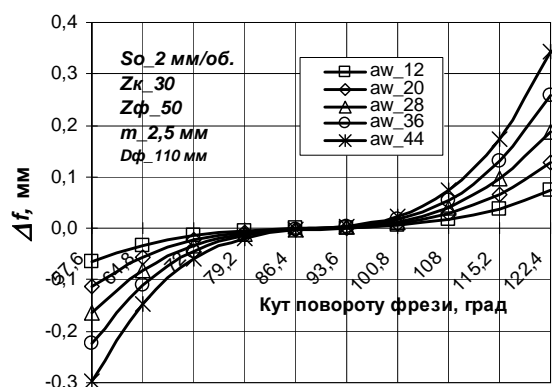


Рис. 13. Залежність відхилення профілів зубців від модуля (а), кількості зубців фрези (б)



в

Рис. 13. (Продовження). Залежність відхилення профілів зубців від кута зачеплення (в)

Як зрозуміло із наведених даних, максимальне відхилення дійсного профілю від теоретичного припадає на крайні ділянки активних поверхонь і для досліджуваних параметрів лежить у межах 0,08 – 0,4 мм. У глобоїдному зачепленні контакт колеса і черв'яка відбувається по висоті зубця, а не по його ширині, внаслідок цього вказана похибка призводитиме до відсутності контакту черв'ячного колеса з глобоїдним черв'яком біля вершин зубців колеса та збільшення контактного тиску у ділянці ділильного колеса.

Усунення другої методичної похибки зубооброблення можливе або зміною швидкості різання з частотою, що дорівнює кількості зубців черв'ячного колеса, або періодичною зміною швидкості обкочування стола верстата з заготовкою. Під час використання зубофрезерного верстата з ЧПК компенсація цієї похибки можлива за зміни програми, а на універсальних верстатах з ручним керуванням – введенням у привід зворотно-поступального руху фрези копіювального пристрою, в якому профіль кулачка виконано з урахуванням цієї похибки і закону її зміни за один оберт фрези.

Висновки: 1. Досліджено процес формоутворення профілів зубців глобоїдальних черв'ячних коліс дисковими фрезами у радіально-коловому методі з радіальною подачею та закономірності виникнення двох методичних похибок зубонарізання, притаманних цьому методу. Присутність похибки внаслідок руху дискової фрези у радіальній подачі підтверджена експериментально.

2. Розроблено математичні залежності для розрахунку та моделювання методичних похибок, досліджено їх закономірності залежно від параметрів процесу.

3. Окреслено шляхи компенсації похибок профілювання з використанням мультиплікатора та зі зміною закону різання і формоутворення, а також введенням кулачкового пристрою для компенсації відхилення профілів.

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., Литвиняк Я.М. Нарізання глобоїдальних черв'ячних коліс дисковим інструментом в умовах обкочування: зб. "Ефективність реалізації наукового, ресурсного и промислового потенціала в сучасних умовах" // Матер. дев'ятої щорічної промислової конференції. – 9–13 лютого 2009 г., п. Славск. – К.: ІНТТ, 2009. – С. 97 – 99.