

Я.М. Литвиняк, Є.М. Махоркін
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра технології машинобудування

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОПЕРАЦІЇ НАРІЗАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ВАРІЮВАННЯМ ШВИДКОСТІ ПРОЦЕСУ РАДІАЛЬНО-КОЛОВОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ

© Литвиняк Я.М., Махоркін Є.М., 2012

Наведено результати моделювання процесу нарізання зубців на циліндричних зубчастих колесах ексцентрично встановленими дисковими інструментами із тороподібною інструментальною поверхнею у разі застосування пристрою для варіювання швидкості формоутворення.

The results providing cutting operations for gear-wheels of disk milling cutter by change the speed of make forming the gear.

Постановка проблеми. Показники техніко-економічної ефективності процесів нарізання зубчастих коліс, разом із технічними характеристиками зубчастих передач, безпосередньо впливають на конкурентну здатність відповідних виробів підприємств, що спеціалізуються на випуску продукції у різних галузях машинобудування. Застосовуванням для зубонарізання традиційним методом обкату та копіювання притаманні певні недоліки, які обмежують можливість підвищення ефективності операцій зубооброблення особливо під час виготовлення зубчастих коліс великих модулів. Тому, наукові дослідження, що стосуються ефективного удосконалення наявних і розроблення нових технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс, які крім цього забезпечують одержання потрібних експлуатаційних показників зубчастих передач середніх і великих модулів, належить до актуальних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для усунення недоліків, властивих процесам нарізання зубчастих коліс черв'ячними фрезами (метод обкату) чи модульними дисковими фрезами (метод копіювання або метод ділення) розробляється новий процес радіально-колового зубонарізання дисковою фрезою з безперервним діленням (РКБД), що реалізується на зубофрезерному верстаті [1, 2]. Виконані попередні дослідження дали змогу встановити, що практичне застосування процесу РКБД потребує певних доопрацювань, які стосуються технологічного забезпечення необхідної товщини нарізаних зубців і їх профілю.

Формулювання мети досліджень. Моделювання процесу нарізання зубців циліндричних зубчастих коліс дисковими інструментами із тороподібною робочою поверхнею у разі застосування пристрою варіювання швидкості процесу радіально-колового формоутворення.

Викладення основного матеріалу досліджень. Процес нарізання циліндричних синусоподібних зубчастих коліс за допомогою дискового інструмента (ДІ) у разі безперервного ділення, полягає у формоутворенні бокових поверхонь зубців реалізацією специфічного верстатного зачеплення, яке створюється взаємоузгодженими рухами обертання циліндричної заготовки та ДІ під час його рівномірного переміщення із швидкістю подачі вздовж осі заготовки [1]. Кінематично узгоджений рух заготовки зубчастого колеса та ДІ забезпечує періодичне заглиблення інструмента в матеріал заготовки з формуванням міжзубцевої западини та омивання самого зубця зубчастого колеса. Нарізання синусоподібних зубців (позначення відповідають взаємному розташуванню систем координат, що наведена в [1]) здійснюється під час взаємно узгоджених обертових рухів

довкола відповідних осей ДІ та заготовки, якщо кути їх повороту зв'язані співвідношенням $\theta = Z_2 \cdot \varphi_2$ (Z_2 – кількість зубців колеса), а також у разі гвинтового переміщення ДІ вздовж осі Z_2 на величину ψ . Схема формоутворення передбачає рух системи S_1 по колу радіусом, який дорівнює ексцентриситету – e , що відображається поворотом її на кут θ , а також враховує поворот самої системи S_1 на кут φ_1 . Нарізання косозубих коліс із гвинтовими зубцями потребує розташування осі обертання інструментальної оправки та осі циліндричного колеса з кутом перехрещування осей – γ . Зміщення осі ДІ інструмента для його колового руху відносно осі інструментальної оправки зубофрезерного верстату визначається ексцентриситетом e , який залежить від модуля m зубчастого колеса.

Для розв'язування поставленої задачі, згідно з відповідними положеннями диференціальної геометрії, необхідно в системі координат інструмента S_1 записати рівняння бокової поверхні ДІ у параметричному вигляді, а потім, використовуючи рівняння переходу від системи S_1 до системи координат заготовки зубчастого колеса S_2 , отримати сукупність інструментальних поверхонь в системі S_2 :

$$x_2 = x_2(\varepsilon, \vartheta, \theta, \psi); \quad y_2 = y_2(\varepsilon, \vartheta, \theta, \psi); \quad z_2 = z_2(\varepsilon, \vartheta, \theta, \psi). \quad (1)$$

Для тривимірної формоутворювальної поверхні ДІ аналітичне визначення рівнянь її бокової поверхні зубців потребує встановлення у матричній формі співвідношень, які визначають умову існування у точці контакту спільної площини дотичної до інструментальної поверхні та зв'язаної із нею бокової поверхні зубців колеса:

$$\begin{vmatrix} \frac{\partial x_2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial y_2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial z_2}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial y_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial z_2}{\partial \vartheta} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \theta} & \frac{\partial y_2}{\partial \theta} & \frac{\partial z_2}{\partial \theta} \end{vmatrix} = 0; \quad \begin{vmatrix} \frac{\partial x_2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial y_2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial z_2}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial y_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial z_2}{\partial \vartheta} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \psi} & \frac{\partial y_2}{\partial \psi} & \frac{\partial z_2}{\partial \psi} \end{vmatrix} = 0. \quad (2)$$

Оригинальна сукупність інструментальних поверхонь в системі координат зубчастого колеса S_2 встановлює профіль зубців колеса і кінцево визначається під час розв'язування системи рівнянь, до якої входять вирази (1) та (2).

Враховуючи взаємозв'язок між системами координат, а також беручи до уваги параметричні рівняння профілюючого кола ДІ в системі S_1 , отримуємо в системі координат S_2 рівняння формоутворювальної поверхні, що утворена складним рухом профілюючого кола дискового інструмента радіусом R :

$$\begin{aligned} x_2 &= R \cos \varepsilon \cdot (\cos \varphi_2 \cos \varphi_1 + \cos \gamma \sin \varphi_2 \sin \varphi_1) + R \sin \varepsilon \cdot (-\cos \varphi_2 \sin \varphi_1 + \cos \gamma \sin \varphi_2 \cos \varphi_1) + \\ &+ e \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi_2 + e \cdot \sin \theta \cdot \cos \gamma \cdot \sin \varphi_2 - \delta \sin \varphi_2 \sin \gamma + a \cdot \cos \varphi_2; \\ y_2 &= R \cos \varepsilon \cdot (-\sin \varphi_2 \cos \varphi_1 + \cos \gamma \cos \varphi_2 \sin \varphi_1) + R \sin \varepsilon \cdot (\sin \varphi_2 \sin \varphi_1 + \cos \gamma \cos \varphi_2 \cos \varphi_1) + \\ &+ e \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi_2 + e \cdot \sin \theta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \varphi_2 - \delta \cos \varphi_2 \sin \gamma - a \cdot \sin \varphi_2; \\ z_2 &= [R \cdot \sin(\varepsilon + \varphi_1) + e \cdot \sin \theta] \cdot \sin \gamma + \delta \cos \gamma + \psi. \end{aligned} \quad (3)$$

Якщо дисковий інструмент стосовно інструментальної оправки верстата не обертається, тобто здійснює коловий рух разом з інструментальною оправкою, тоді приймаємо, що $\varphi_1 = \theta$. Можна допустити, що профіль синусоподібного зубця кінцево формується точкою кола R , яка найвіддаленіша від точки O_1 – центра рухомої системи S_1 , тоді кутова координата цієї точки на профілюючому колі дорівнює $\varepsilon = \pi - \theta$. Враховуючи, що міжосьова віддаль дорівнює $a = R + R_2$, отже, можна із виразу (3) отримати простіші співвідношення для практичного застосування.

У разі застосування різальних зубців ДІ радіусної форми, отримуємо тороподібну інструментальну поверхню, як наслідок безперервного обертання ДІ. Рівняння інструментальної тороподібної поверхні в системі координат ДІ – S_1 у параметричній формі мають вигляд (див. рис. 1):

$$\begin{aligned} x_1 &= [(R_1 - b) + b \cdot \sin \nu] \cdot \cos \varepsilon; \\ y_1 &= [(R_1 - b) + b \cdot \sin \nu] \cdot \sin \varepsilon; \\ z_1 &= b \cdot \cos \nu; \end{aligned} \quad (4)$$

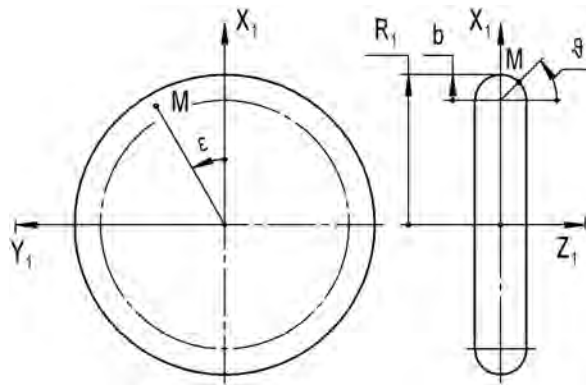


Рис. 1. Інструментальна тороподібна поверхня дискового інструмента

Підставляючи (4) в рівняння (3) визначаємо тороподібну інструментальну поверхню в системі координат заготовки зубчастого колеса S_2 , а після визначення часткових похідних для системи рівнянь (2) у загальному вигляді отримуємо:

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} \frac{\partial x_2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial y_2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial z_2}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial y_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial z_2}{\partial \vartheta} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \theta} & \frac{\partial y_2}{\partial \theta} & \frac{\partial z_2}{\partial \theta} \end{vmatrix} = \\ & = 2 \cdot (R_1 - b) \cdot [\cos(\varphi_1 + \varepsilon - \theta + \nu) - \cos(\varphi_1 + \varepsilon - \theta - \nu)] + \\ & + b \cdot [\sin(\varphi_1 + \varepsilon - \theta + 2\nu) + \sin(\varphi_1 + \varepsilon - \theta - 2\nu)] - 2b \cdot \sin(\varphi_1 + \varepsilon - \theta) = 0; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} \frac{\partial x_2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial y_2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial z_2}{\partial \varepsilon} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial y_2}{\partial \vartheta} & \frac{\partial z_2}{\partial \vartheta} \\ \frac{\partial x_2}{\partial \psi} & \frac{\partial y_2}{\partial \psi} & \frac{\partial z_2}{\partial \psi} \end{vmatrix} = -4(R_1 - b)[\cos(\nu + \gamma) + \cos(-\nu + \gamma)] + \\ & + 2(R_1 - b)[\sin(\varepsilon + \varphi_1 + \nu + \gamma) + \sin(\varepsilon + \varphi_1 - \nu - \gamma) - \sin(\varepsilon + \varphi_1 - \nu + \gamma) - \sin(\varepsilon + \varphi_1 + \nu - \gamma)] + \\ & + b[\cos(\varepsilon + \varphi_1 - 2\nu - \gamma) + \cos(\varepsilon + \varphi_1 + 2\nu - \gamma) - \cos(\varepsilon + \varphi_1 + 2\nu + \gamma) + \\ & - \cos(\varepsilon + \varphi_1 - 2\nu + \gamma)] + 2b[\cos(\varepsilon + \varphi_1 + \gamma) - \cos(\varepsilon + \varphi_1 - \gamma)] + 2b[\sin(-2\nu + \gamma) - \sin(2\nu + \gamma)] = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Використовуючи (5), (6), а також співвідношення, які враховують, що для прямокубних зубчастих коліс $\gamma = \pi/2$, ДІ стосовно верстатної інструментальної оправки не обертається $\varphi_1 = \theta$, формування профілю зубця колеса здійснюється найвіддаленішою від центра O_1 системи S_1 точкою кола $(R_1 - b)$, кутова координата якої визначається за рівністю $\varepsilon = \pi - \theta$, системи координат S_1 та S_2 розташовані на міжосьовій відстані $a = (R_1 - b) + R_2$, можемо для визначених значень ν встановити параметричні рівняння огинальної сукупності точок контакту робочої тороподібної поверхні ДІ.

Аналіз процесу формотворення зубців ексцентрично встановленим ДІ дав змогу виявити, що наявності ДІ із різальними зубцями, які мають певну ширину на робочій периферійній поверхні, нарізані зубці зубчастого колеса мають товщину недопустимо меншу від потрібної. Для усунення цього недоліку запропоновано прорізання міжзубцевої западини у заготовці зубчастого колеса здійснювати, надаючи ДІ, встановленому із ексцентриситетом на інструментальній оправці, певні періодичні кутові сповільнення та пришвидшення, що однакові за абсолютною величиною амплітуди та за середнім значенням, а реалізацію такого технологічного заходу здійснювати за допомогою додаткового інструментального пристрою динамічної зміни кутової швидкості (ДЗКШ) [2]. Розрахункова схема згаданого ДЗКШ описує рух двох однакових послідовно встановлених двокривошипних

механізмів. Загалом для всього пристрою ДЗКШ встановлені такі співвідношення між кутами повороту провідної ланки φ_{01} (шпинделя зубофрезерного верстату) та веденої ексцентрикової частини φ_1 інструментальної оправки, а також співвідношення між їх кутовими швидкостями (визначає змінне передавальне відношення пристрою ДЗКШ залежно від кута повороту інструментальної оправки):

$$\varphi_1 = 2 \cdot \arctg \left[\left(\frac{l_0 - e_r}{l_0 + e_r} \right)^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{01}}{2} \right]; \quad \frac{\omega_1}{\omega_{01}} = \frac{\left(\frac{l_0 + e_r}{l_0 - e_r} \right)^2}{\sin^2 \frac{\varphi_{01}}{2} + \cos^2 \frac{\varphi_{01}}{2} \cdot \left(\frac{l_0 + e_r}{l_0 - e_r} \right)^4}, \quad (7)$$

де e_r та l_0 – відповідно величина радіального зміщення та довжина шатуна двокривошипного механізму.

Якщо взяти до уваги, що параметр φ_{01} відповідає $\varphi_1 = \theta$, тоді може бути встановлений профіль зубця циліндричного зубчастого колеса, який нарізується ДІ із тороподібною робочою інструментальною поверхнею із застосуванням пристрою ДЗКШ в процесі радіально-колового формоутворення, у разі сумісного застосування першого виразу (7) із, наприклад, виразами (3). Розраховані профілі зубців в торцевій поверхні зубчастого колеса для різних параметрів процесу радіально-колового формоутворення з безперервним діленням у разі варіювання швидкості формоутворення відображено на рис. 2.

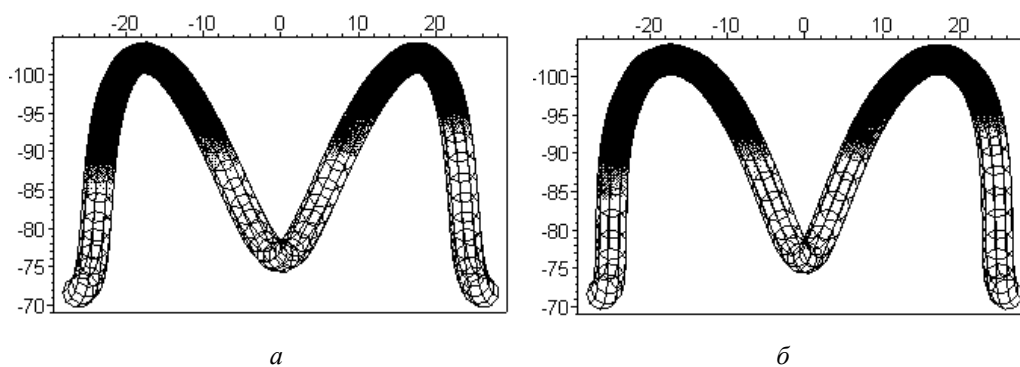


Рис. 2. Профіль зубців прямозубого колеса утворена тороподібною інструментальною робочою поверхнею дискового інструмента у разі варіювання швидкості формоутворення у процесі РКБД ($m = 10$ мм; $Z = 18$; $\alpha_0 = 20^\circ$; $R_1 = 80$ мм; $R_2 = 90$ мм; $e = 13,7374$ мм; $b = 0,7$ мм; $L_0 = 96$ мм):
 $a - e_r = 0$ мм; $b - e_r = 7$ мм

Висновки. Товщина зуба та ширина міжзубцевої западини нарізаного зубчастого колеса безпосередньо залежать від поперечного радіуса b тороподібною поверхні дискового інструмента – у разі збільшення b товщина зуба істотно зменшується. Форма зубця нарізаного колеса може значною мірою змінюватися залежно від параметрів пристрою динамічної зміни кутової швидкості, що вказує на широкі технологічні можливості процесу радіально-колового формоутворення дисковим інструментом із тороподібною інструментальною формоутворювальною поверхнею.

1. Литвиняк Я.М. Моделирование процессов отримання випукло-ввігнутих зубців циліндричних коліс методами обкату та радіально-колового формоутворення / Я.М. Литвиняк // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2012. – № 730: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – С. 57–64. 2. Литвиняк Я.М. Забезпечення технологічної гнучкості операцій зубонарізання в автоматизованому виробництві циліндричних зубчастих коліс підвищеної навантажувальної здатності із застосуванням процесу радіально-колового профілювання зубців / Я.М. Литвиняк: Міжгалузевий збірн. наук. праць. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2012. – Вип. 46: Автоматизація виробничих процесів в машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 135–140.