

шування черв'ячної фрези // *Проблеми трибології: Міжнар. наук. журн.* – 2001. – № 1. – С. 12–21. 9. Грицай И.Е., Козут Н.С. Влияние параметров срезов на динамические характеристики процесса резания червячными фрезами с разделенным исходным контуром // *Вестн. Национального технического университета Украины “Киевский политехнический институт”.* – 2000. – Вып. 39. – С. 163–177. 10. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. – М., 1981. – 279 с. 11. Кабалдин Ю.Г. Трение и износ при резании // *Вестн. машиностроения.* – 1995. – № 1. – С. 26–32.

УДК 621.833.002-19

Е.М. Гуліда

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

## ПОХИБКИ ОБРОБЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

© Гуліда Е.М., 2002

**Розглянуто класифікацію зубооброблювальних операцій та визначено джерела похибок оброблення зубчастих коліс. Встановлено закони їх дії та вплив на точність зубчастого колеса, а також наведено методику їх аналізу. Всі зубчасті колеса були поділені на два класи і шість груп залежно від методу оброблення зубців та інструмента, який використовували при зубонарізанні. Враховуючи клас і групу зубчастого колеса розглядали джерела похибок.**

**It considered the classification of gear machining operations and determined the resources of its errors. The laws of these errors action and its influence on the gear precision are established. The methods of its analysis are led. All cogwheels were divided into two classes and six groups in dependence on a method of processing tooth and tool, which used for want of processing tooth. Proceeding from a class and groups of a cogwheel were considered sources of errors.**

На сучасному етапі у вітчизняній і закордонній практиці використовують у виробничому процесі різні зубооброблювальні операції з використанням високопродуктивного обладнання та інструментів. Але з погляду прогнозування точності оброблення зубчастих коліс, яку можна досягти під час отримання зубців на зубооброблювальних операціях (зубофрезерних, зубошліфувальних, зубошевінгувальних тощо), та довговічності їх роботи, найбільш доцільно для спрощення розглядання цих питань провести певну класифікацію зубооброблювальних операцій. Така класифікація дозволить деякою мірою спростити методику математичного моделювання процесу зубооброблення, виявити джерела похибок, а також розробити і впровадити засоби виділення або зменшення цих похибок і тим самим сприяти розв'язанню поставлених задач.

Зубооброблювальні операції, які зараз використовують у вітчизняній та закордонній практиці при обробленні зубчастих коліс, доцільніше класифікувати за двома основними ознаками: 1) за методом оброблення бокових поверхонь зубців; 2) за використаним інструментом, який може бути одним з елементів уявної спряженої пари зубчастої передачі (оброблюване колесо – інструмент) або відтворюючий його.

На підставі цих ознак зубооброблювальні операції можна поділити на два класи:

1-й клас – зубооброблювальні операції, які виконуються методом копіювання або огинання з використанням:

перша група – інструмента, який працює з головним обертовим рухом;

друга група – інструмента, який працює з головним прямолінійним зворотно-поступовим рухом.

2-й клас – зубооброблювальні операції, які виконуються методом обкату з використанням:

третья група – шнекового (черв'ячного) інструмента;

четверта група – дискового зубчастого інструмента;

п'ята група – рейкового інструмента;

шоста група – інструмента, який відтворює рейку.

Отже, в двох класах ми виділили шість груп зубооброблювальних операцій, які виконуються певним, характерним для кожної групи, інструментом.

Під час виконання зубооброблювальної операції на колесі виникають похибки оброблення, які призводять до відхилення форми і розмірів оброблених зубців від теоретично заданих, тобто виникає кінематична похибка передачі, погіршується плавність її роботи та контакт зубців, а також змінюється боковий зазор між зубцями передачі. Значить, погіршуються експлуатаційні якості зубчастої передачі, тобто її довговічність.

Головними джерелами виникнення похибок оброблення є фізико-механічні властивості матеріалу колеса; похибки форми і розмірів колеса, які отримані на комплексі заготівельних (попередніх перед зубообробленням) операцій; похибки виготовлення; похибки налагодження верстата; похибки пристрою і інструмента; похибки встановлення (базування і закріплення) оброблювального колеса і інструмента; деформація (силова і температурна) технологічної системи; похибки, які виникають за рахунок наближених методів розрахунку (профілювання) зубооброблювального інструмента; знос різальних елементів інструмента; похибка вимірювання. Визначення цих похибок для двох класів зубооброблювальних операцій, що складаються з шести груп, наведено в роботі [1].

При виконанні технологічних операцій джерела похибок можуть проявляти випадковий (В) і систематичний характер дії. Крім того, систематично діючі джерела похибок можуть бути постійними (П) і функційними (періодичними) (Ф).

Джерела похибок кожної з розглянутих груп операцій зубооброблення призводять до відносних надлишкових (додаткових) лінійних та кутових переміщень технологічної системи, які своєю чергою зумовлюють під час виконання операції безперервну зміну відстані між твірною поверхнею (наприклад, різальним лезом) інструмента і ідеальним (теоретично точним) зубчастим колесом. Отже, виникають сумарні надлишкові переміщення в напрямку трьох координатних осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  на величини  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  та  $\Delta z$  (мм) та надлишкові повороти навколо цих осей на кути  $\Delta\varphi_x$ ,  $\Delta\varphi_y$  та  $\Delta\varphi_z$  (рад.).

Розмістимо ідеальне зубчасте колесо в системі координат  $XYZ$  так, щоб вісь його обертання збігалася з віссю  $Z$ , а радіус, який проходить по міжцентровій відстані між осями колеса і інструмента, збігався з віссю  $Y$ .

Тоді вісь  $X$  також буде збігатися з радіусом ідеального зубчастого колеса, але розміститься перпендикулярно осям  $Z$  і  $Y$ . Направлення вздовж осі  $Z$  будемо називати осьовим, вздовж осі  $Y$  – радіальним, вздовж осі  $X$  – тангенціальним.

Своєю чергою надлишкові переміщення та повороти технологічної системи зумовлюють прирощення профілю (правого або лівого) зубця колеса по лінії дії, тобто по лінії,

яка проходить через точку взаємодії зубців, по якій проходить передача робочого зусилля, тобто до зміни показників точності зубчастого колеса, згідно з ГОСТ 1643-81. Враховуючи значення сумарних надлишкових переміщень та повороти технологічної системи, а також основні положення теорії зачеплення зубчастих передач, були визначені основні показники точності зубчастого колеса.

Найбільша кінематична похибка зубчастого колеса, мм

$$F'_{ir} = (d/2)\Delta\varphi_z, \quad (1)$$

де  $d$  – діаметр ділительного кола колеса, мм;  $d = m \cdot z$ ;  $m$  – модуль, мм;  $z$  – кількість зубців колеса.

Накопичена похибка  $k$  кроків зубчастого колеса, мм:

$$F_{pkr} = (dk/2z)\Delta\varphi_z, \quad (2)$$

де  $k$  – кількість цілих кутових кроків в межах від 2 до  $z/2$ .

Коливання довжини загальної нормалі зубчастого колеса, мм:

$$V_{W_r} = \frac{[d(n-1)/2z]\cos\beta\cos\alpha}{\cos\alpha_t}\Delta\varphi_z, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість зубців, що охоплюється відрізком загальної нормалі;  $\beta$  – кут нахилу зубців колеса;  $\alpha$  – кут зачеплення;  $\alpha_t$  – кут вихідного контуру у торцевому перерізі зубчастого колеса:

$$\alpha_t = \arcsin(\sin\alpha/\cos\arcsin\alpha\sin\beta).$$

Відхилення кроку, мм:

$$f_{ptr} = (d/2z)\Delta\varphi_z. \quad (4)$$

Відхилення кроку зачеплення, мм:

$$f_{pbr} = \sqrt{(\cos\alpha_t\cos\beta\Delta x)^2 + (\sin\alpha_t\cos\beta\Delta y)^2}. \quad (5)$$

Похибка профілю зубця, мм:

$$f_{fr} = \sqrt{\cos^2\alpha_t\Delta x^2 + \sin^2\alpha_t\Delta y^2 + b^2\sin^2\alpha_t\Delta\varphi_x^2 + b^2\cos^2\alpha_t\Delta\varphi_y^2}, \quad (6)$$

де  $b$  – ширина зубчастого вінця, мм.

Відхилення осьових кроків по нормалі, мм:

$$F_{pxnr} = \sin\beta \cdot \Delta z. \quad (7)$$

Відхилення товщини зубця, мм:

$$E_{cr} = \sqrt{4(\Delta x^2 + \operatorname{tg}^2\alpha\Delta y^2) + (4b^2/\operatorname{tg}^2\alpha)\Delta\varphi_x^2}. \quad (8)$$

Визначені показники точності зубчастого колеса (1)–(8) дають можливість встановити його відповідність нормам кінематичної точності, плавності роботи та контакту зубців у передачі, а також встановити боковий зазор.

Закони розподілу випадкових надлишкових переміщень залежать від багатьох технологічних факторів, які є супутниками зубооброблення (дефекти термообробки, неоднорідність фізико-механічних властивостей матеріалу заготовки тощо). Але, як показали результати досліджень, вони в більшості підпорядковуються розподіленню Гаусса, трохи менше – законам рівної імовірності і Сімпсона. Випадкові надлишкові переміщення не мають функційного характеру зміни і, за даними автора, становлять 3–5 % від сумарних надлишкових переміщень технологічної системи.

Функційні надлишкові переміщення технологічної системи домінуючі. Вони включають значні елементарні гармонічні надлишкові переміщення, джерелами яких є кінематичні ланцюги

верстатів, похибки встановлення оброблювального колеса і інструмента, похибки виготовлення інструмента, непостійність сили різання, тобто деформації технологічної системи та інші. Ці надлишкові переміщення переважно змінюються за синусоїдальним законом. Головне надлишкове переміщення має найбільший період коливання, який дорівнює періоду функції в межах одного або декількох обертів колеса.

Всі інші періоди коливань менші від головного і порівняно з ним зменшуються за законом гармонічного ряду, який можна записати:  $1, 1/2, 1/3, 1/4$  і так далі [2].

Постійні надлишкові переміщення переважно виникають внаслідок геометричної неточності верстата (наприклад, перекис інструментального шпинделя), похибка налагоджування, вимірювання, виготовлення інструмента тощо.

Експериментальна перевірка вказаних залежностей в умовах ВАТ “ЛАЗ” при зубошліфуванні (зубошліфувальний верстат мод. 5В836) коліс модуля 4,5 мм з кількістю зубців  $z = 19...37$ , кутом їх нахилу  $\beta = 17...32^\circ$ , які виготовлялися зі сталі 12ХНЗА та термічно оброблювалися до твердості HRC 58...62 (третя група зубооброблюваних операцій) показала, що розраховані значення показників точності зубчастих коліс адекватні дійсним. Розрахункові результати відрізняються від дійсних значень в межах 4,6–12,9 %, що може бути рекомендовано для практичного використання, тобто для прогнозування точності оброблення та довговічності зубчастих коліс.

Отже, проведена класифікація зубооброблюваних операцій та отримані залежності для визначення основних показників точності зубчастих коліс дали можливість зробити такі висновки.

1. Проведена класифікація дає підставу систематизувати та визначати надлишкові переміщення та повороти технологічної системи під час виконання певних зубооброблювальних операцій.

2. Отримані залежності для визначення основних показників точності (ГОСТ 1643-81) зубчастого колеса під час зубооброблення дозволяють на практиці прогнозувати точність зубооброблення і використовувати їх для проектування оптимальних технологічних процесів.

3. Результати роботи є основою для розроблення оптимізаційних технологічних задач, що створює передумови для підвищення продуктивності праці та зменшення собівартості продукції.

*1. Гуліда Е. Моделирование сумарних надлишкових переміщень зубооброблювальної технологічної системи // Машинознавство. – 1999. – № 1. – С. 31–35. 2. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колес. – М., 1972. – 368 с.*