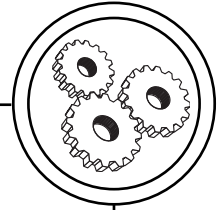


## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



УДК 621.83:621.9.06

### ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕМАТИКИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС МЕТОДОМ КОНТУРНОЇ ОБРОБКИ

© С. І. Пастернак, М. В. Іщенко, І. О. Рябека,  
НТУУ «КПІ», Київ, Україна

**Для процесса контурной обработки зубчатых колес эксцентрически расположенной дисковой фрезой теоретически установлен характер зависимости формы полученных профилей зубов от параметров установки фрезы и ее геометрических размеров. На базе зубофрезерного станка мод. 5В312 с использованием фрезерной оправки со смещенным центром оси вращения фрезы экспериментально доказана возможность использования такой схемы для черновой обработки эвольвентных зубчатых колес.**

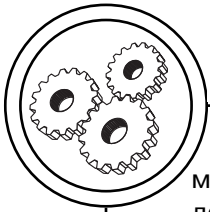
**For process of gears' contour machining by the eccentric placed disk-shaped milling cutter, dependence's nature of obtained teeth' form from parameters of milling cutter's placement and its geometrical sizes was determined theoretically. By using a special tooling with eccentric axis of milling cutter rotation on the base of gear-hobbing machine 5В312, a possibility of using of this type of machining for involute gears' roughing was proved experimentally.**

#### **Постановка проблеми**

Обробка зубчастих коліс, зазвичай, здійснюється за методом обкату на спеціально призначених для цього універсальних зубообробних верстатах із застосуванням інструментів складної форми. Застосування методу контурної обробки при виготовленні зубчастих коліс має ряд переваг, які насамперед полягають у підвищенні універсальності самого процесу обробки та можливості його інтенсифікації за рахунок використання сучасних інструментальних матеріалів, що робить дослідження в цьому напрямку актуальними.

#### **Аналіз попередніх досліджень**

Принципова можливість контурної обробки зубчастих коліс, як різновиду деталей з фасонним, періодично повторюваним профілем, не викликає сумніву, але способи реалізації такої обробки можуть бути різними [1]. На сучасних фрезерних верстатах таку обробку можна здійснити із використанням кінцевих фрез [2], але її точність і продуктивність значною мірою визначається жорсткістю і діаметром цих фрез, обмеженнями шириною западин зубчастого колеса. Перспективність контурної обробки зубчастих коліс дискови-



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

ми фрезами вперше була доведена І. Когановим [3]. На даний час такий вид обробки використовується при виготовленні зубчастих коліс із циклоїдальним [4] і синусоїдальним [5] профілями. Але інформація щодо можливості використання цих схем обробки для отримання зубчастих коліс з евольвентним профілем або наближеним до нього — відсутня.

Перші спроби практичного використання методу контурної обробки зубчастих коліс дисковою ексцентрично розташованою фрезою для виготовлення зубчастих коліс з профілями відмінними від синусоїдальних були здійснені в лабораторії Інституту надтвердих матеріалів ім. Бакуля НАН України [6]. Аналіз оброблених зубчастих коліс засвідчив суттєву залежність форми отриманих профілів зубів від параметрів установки фрези, але характер цієї залежності так і не було встановлено.

Таким чином, актуальним стає питання теоретичного обґрунту-

вання можливості використання методу контурної обробки зубчастих коліс ексцентрично-розміщеною дисковою фрезою для чорнової обробки евольвентних зубчастих коліс, а також проведення відповідного експерименту. Саме таким дослідженням і присвячується ця стаття.

### Мета роботи

Метою цієї роботи є встановлення характеру залежності форми отриманих профілів зубів від параметрів установки фрези і її геометричних розмірів та доведення можливості використання такої схеми для чорнової обробки евольвентних зубчастих коліс.

Для реалізації цієї мети було поставлено задачі:

1. Розрахувати координати обробленої поверхні залежно від параметрів установки фрези та її геометричних розмірів.

2. Провести обробку і аналіз результатів теоретичних розрахунків з встановленням характеру залежності форми отриманих

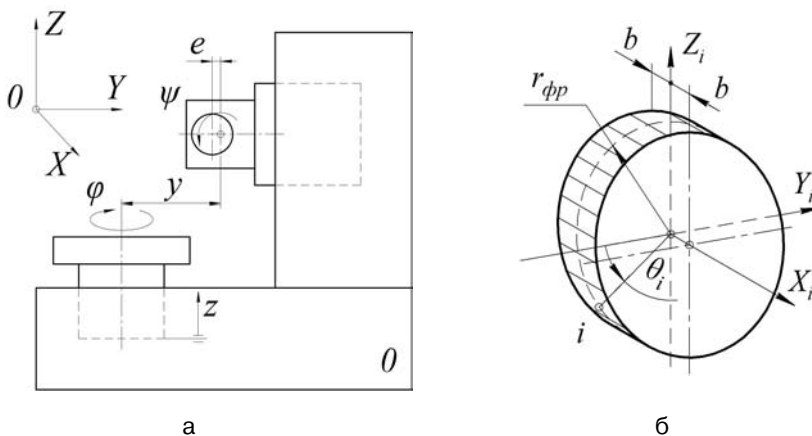
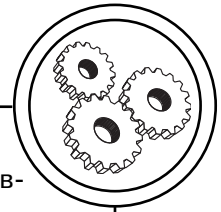


Рис. 1. Компонівка зубофрезерного верстата (а) і геометрична модель інструмента (б)

## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ



профілів зубів від параметрів установки фрези і її геометричних розмірів.

3. Практично здійснити чорнову обробку евольвентного зубчастого колеса ексцентрично розташованою дисковою фрезою при раціональних параметрах установки і розмірах фрези.

### Результати проведених досліджень

Спочатку розглянемо кінематику процесу обробки циліндричних прямозубих коліс ексцентрично розташованою дисковою фрезою на зубофрезерному верстаті, що працює за методом обкату (рис. 1).

У матричному вигляді математична модель формоутворюючої системи верстата запишеться [7]:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_0 = & A_{0,1}^6(\varphi) \cdot A_{1,2}^3(-z) \cdot \\ & \cdot A_{2,3}^2(y) \cdot A_{3,4}^4(\psi) \cdot A_{4,5}^2(-e) \cdot \\ \rightarrow & \cdot A_{5,6}^4(\theta_i) \cdot A_{6,7}^2(-r_{фр}) \cdot \\ & \cdot A_{7,8}^1(\pm b) \cdot \mathbf{e}^4, \end{aligned} \quad (1)$$

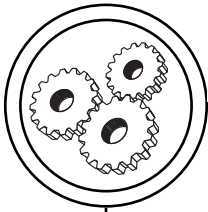
де  $\mathbf{r}_0$  — радіус-вектор точки на оброблюваній поверхні;  $A_{i,j}^k$  — матриці перетворення координат,  $k = 1 \dots 6$ ;  $\varphi$  — кут повороту заготовки;  $z$  — висота розміщення заготовки відносно шпинделя;  $y$  — відстань між осями обертання фрезерного шпинделя та заготовки;  $\psi$  — кут повороту фрези;  $e$  — ексцентриситет розміщення фрези на оправці;  $\theta_i$  — кутове положення  $i$ -го леза;  $r_{фр}$  — радіус фрези;  $b$  — половина ширини фрези, знак « $\pm$ » відповідає правій та лівій ріжучим кромкам фрези.

У розширеному вигляді рівняння (1) буде таким:

$$\mathbf{r}_0 = \begin{bmatrix} r_{фр} \cos(\psi + \theta_i) \sin \varphi \pm b \cos \varphi - \\ -e \sin \varphi \cos \psi - y \sin \varphi \\ -r_{фр} \cos(\psi + \theta_i) \cos \varphi \pm b \sin \varphi - \\ -e \cos \varphi \cos \psi - y \cos \varphi \\ -r_{фр} \sin(\psi + \theta_i) - e \sin \psi - z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Використовуючи математичну модель (2), в системі MathCAD було розроблено програму для розрахунку профілів оброблених заготовин залежно від діаметру фрези  $D_{фр} = 2r_{фр}$  ширини фрези  $B = 2b$ , величини ексцентриситету  $e$  її розміщення на оправці і відстані між осями обертання фрезерного шпинделя та заготовки (рис. 2). Також ця програма дозволяє візуально оцінити подібність отриманих профілів до необхідного евольвентного профілю заданого модуля  $m$  і числа зубів  $z$ .

Проаналізувавши отримані результати, було встановлено, що зміна діаметра фрези  $D_{фр}$  впливає на профіль обробленої заготовки лише в площині YOZ (рис. 2, а), у той час як в площині XOY профіль залишається незмінним. Причому збільшення діаметра фрези призводить до збільшення довжини лінії контакту інструмента і заготовки під час обробки, що в свою чергу викличе зростання сили різання. Збільшення ширини фрези  $B$  негативно впливає на профіль, що формоутворюється, тому що збільшується ширина обробленої заготовки (рис. 2, б) і водночас ускладнюється обробка зуба біля його ніжки (рис. 2, е). Але, з іншого боку, практичні експерименти засвідчили, що використання при даному методі



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

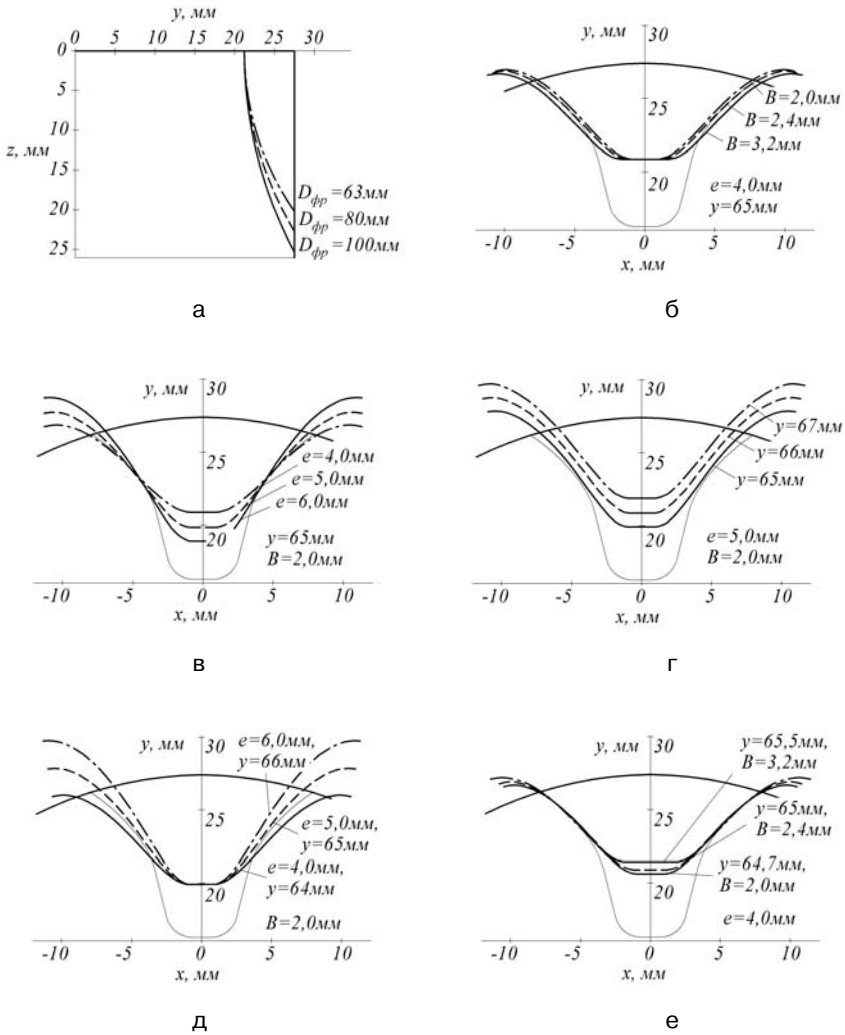


Рис. 2. Профілі оброблених западин в площинах  $YOZ$  (а) і  $XOY$  (б, в, г, д, е) залежно від параметрів установки фрези і її геометричних розмірів (тонкою лінією позначено профіль западини евольвентного зубчастого колеса  $m = 5$  мм,  $z = 9$ )

обробки фрез шириною  $B < 2,4$  мм є недопустимим через їх часті поломки. Зміна величини ексцентриситету розміщення фрези на оправці найбільш явно впливає на форму отриманого профілю (рис. 2, в, д) та дозволяє максимально наблизити його до евольвентного, і забезпечити рівномірний припуск на чи-

стову обробку по всій робочій поверхні зуба. Зміна відстані  $y$  між осями обертання фрезерного шпинделя та заготовки дозволяє регулювати величину припуску на чистову обробку (рис. 2, г).

Використовуючи результати розрахунку, для чорнової обробки евольвентного зубчато-

## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

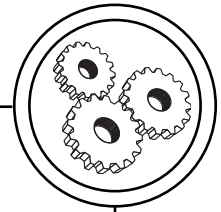
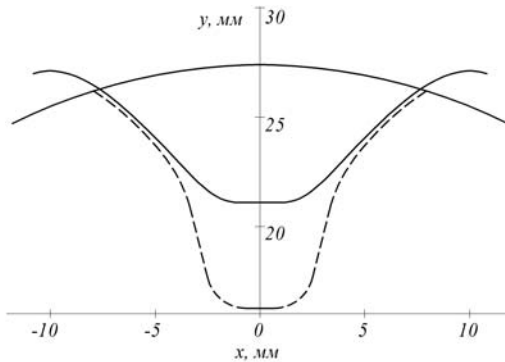


Рис. 3. Профіль обробленої западини (суцільною) максимально наближений до евольвентного (штриховою) при:  $D_{фр} = 63$  мм,  
 $B = 2,4$  мм,  $e = 4$  мм,  
 $y = 57$  мм



го колеса ( $m = 5$  мм,  $z = 9$ ) вибрали дискову відрізну фрезу діаметром  $D_{фр} = 63$  мм, шириною  $B = 2,4$  мм і числом зубів  $z = 32$ , а за раціональні параметри установки було прийнято ексцентриситет установки фрези на оправці  $e = 4$  мм і відстань між осями обертання фрезерного шпинделя та заготовки  $y = 57$  мм.

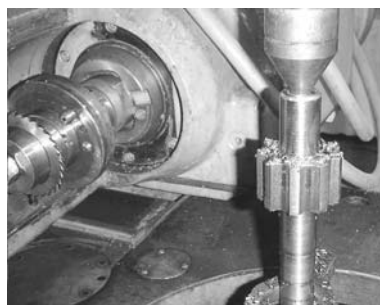
Фреза з такими розмірами вирізняється високою міцністю і жорсткістю, а вибрані параметри її установки максимально наближать профіль обробленої западини до необхідного евольвентного профілю (рис. 3).

Практичний експеримент чорнової обробки евольвентного

зубчастого колеса ( $m = 5$  мм,  $z = 9$ ) ексцентрично-розташованою на оправці дисковою фрезою зі швидкорізальної сталі Р6М5 з вибраними розмірами і параметрами установки проводився в лабораторії Інституту надтвердих матеріалів НАНУ на зубофрезерному верстаті 5В312 (рис. 4). У якості заготовок використовувались заготовки шестерень гідронасосів «Вінницького заводу тракторних агрегатів» зі сталі 45, твердість НВ195. Дослідження проводились на таких режимах обробки: частота обертання фрезерної оправки  $n = 100$  об/хв ( $v_p \approx 32$  м/хв); колова подача  $s_{кол} = 11,1$  об/хв, осьова подача  $s_o = 0,25$  мм/хв.

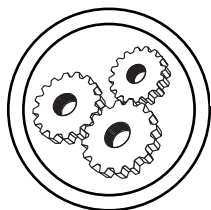


а



б

Рис. 4. Експеримент чорнової обробки евольвентного зубчастого колеса: заготовка перед процесом обробки (а) і оброблена шестерня (б)



## МАШИНИ І АВТОМАТИЗОВАНІ КОМПЛЕКСИ

### Висновки

1. Використання розробленої для процесу контурної обробки зубчастих коліс ексцентрично-розташованою дисковою фрезою розрахункової програми дозволяє визначити раціональні параметри установки фрези та її геометричні розміри, які максимально наближують оброблений профіль до наперед заданого, необхідного профілю. А це у свою чергу дозволить здійснювати за цією схемою чорнову обробку не лише евольвентних, синусоїдальних і циклоїдальних зубчастих коліс, але й інших деталей з періодичними профілями.

2. Встановлений характер залежності форми отриманих профілів зубів від параметрів установки фрези і її геометричних розмірів вказує на те, що

вибір їх раціональних значень потрібно проводити не лише залежно від ступеня подібності профілю, що формоутворюється, до заданого профілю зуба, але й з врахуванням необхідної міцності і жорсткості інструмента.

3. На базі зубофрезерного верстата мод. 5ВЗ12 із використанням фрезерної оправки із зміщеним центром осі обертання фрези практично доведено можливість використання такої схеми обробки при чорновому нарізанні циліндричних евольвентних зубчастих коліс з наступною їх чистовою обробкою на зубодовбальних чи зубофрезерних верстатах. Це дозволяє зробити висновок про можливість практичної реалізації чорнкової обробки за цим способом також і інших деталей з періодичними профілями.

1. Лашнев С. И., Юликов М. И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. — М.: Машиностроение, 1975. — 392 с. 2. Пангелов И. Н., Метев Х. Ц., Куманов И. В., Динев С. Д. Нарязване на зъби на зъбни колела върху обработващи центри // Известия на ТУ-Габрово. — 2004. — т. 30. — С. 121—134. 3. Коганов И. А. Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей. — Тула: Приокское книжн. из-во, 1970. — 180 с. 4. Формообразование рабочего профиля сателлита трохлоидной передачи // Dr. Eng. Jankevich M., Ass. Dziatkovich V., National Academy of Science. — Minsk, Belarus. Опубликовано в Интернет: <http://www.gears.ru/transmis/zaprogramata/2.139.pdf>. 5. Грицай І. Є., Благут Е. М., Яворський В. З. Синусоїдальні зубчасті колеса та новий ефективний метод їх виготовлення // УИЦ «Наука. Техника. Технологія». — К., 2004. — С. 47—50. 6. Кривошея А. В., Данильченко Ю. М., Мельник В. Е., Благут Э. М. Перспективы применения твердосплавных отрезных дисковых фрез при обработке цилиндрических зубчатых колес // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. — Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. — Вып. 69. — С. 115—120. 7. Данильченко Ю. М., Кривошея А. В., Пастернак С. І., Короткий Є. В. Кінематика формоутворення циліндричних зубчастих коліс з заданим профілем дисковим інструментом // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт», сер. Машиностроение. — 2005. — № 46. — С. 104—108.

Рецензент — Ю. М. Данильченко, д.т.н.,  
професор, НТУУ «КПІ»

Надійшла до редакції 09.04.08