



## ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМБІНОВАНОГО НАРІЗАННЯ ЗУБЦІВ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СПОСОБУ РАДІАЛЬНО-КОЛОВОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ ДИСКОВОЮ ФРЕЗОЮ

**Литвиняк Я.М., к.т.н., доцент, Махоркін Є.М., к.т.н., доцент,  
Юрчишин І.І., к.т.н., доцент**  
*Національний університет «Львівська політехніка»*

Циліндричні зубчасті колеса належать до технологічно найбільш складних деталей, тому їх виготовлення супроводжується великими витратами, значна частина які зосереджена на операціях формоутворення зубців коліс зокрема на найбільш поширених - зубофрезерних операціях завдяки високій вартості використовуваних зубофрезерних верстатів, точних та вартісних металорізальних інструментів – черв'ячних фрез, значною тривалістю процесу обробки. Вказані чинники базуються на реалізації традиційного методу формоутворення – методі обкату, який накладає суттєві обмеження на підвищення продуктивності процесу нарізання зубців.

Удосконалення операцій зубофрезерування можливе за допомогою нового технологічний способу - радіально-колового нарізання зубців зубчастих коліс при безперервному діленні дисковим інструментом (РКБД). Особливість способу РКБД полягає у застосуванні дискової фрези (ДФ) із змінними твердосплавними зубцями, що встановлена з ексцентриситетом на шпindelній оправці зубофрезерного верстату (замість черв'ячної фрези). Даний спосіб передбачає також застосування додаткового інструментального пристрою, що надає ДФ додаткового обертального руху, який забезпечує усунення зв'язку між рухом обертання інструмента та рухом ділення у технологічному налагодженні зубофрезерного верстату. Все це забезпечує підвищення ефективності зубофрезерної операції під час нарізання зубчастих коліс великих модулів.

Застосування способу РКБД передбачає вирішення низки технологічних та пов'язаних із ними конструктивних задач: забезпечення профілю зубців колеса та прогнозування силових показників процесу зубонарізання ДФ.

Евольвентний профіль зубців великомодульних зубчастих коліс запропоновано отримати шляхом реалізації зубофрезерної операції за два переходи, які здійснюються на одному зубофрезерному верстаті без зняття заготовки зубчастого колеса. Перший (чорновий) перехід виконують оснащеною змінними твердосплавними зубцями ДФ способом РКБД з отриманням синусоподібного профілю зубців. Другий (чистовий) перехід виконують черв'ячною фрезою, яка забезпечує отримання евольвентного профілю зубців із необхідними параметрами точності колеса. Таке комплексне застосування нового способу РКБД та традиційного методу гарантованого отримання евольвентного профілю зубців на великомодульних зубчастих колесах, дозволяє: виконати зубофрезерну операцію лише за два переходи (три переходи у базовому варіанті технологічного маршруту); майже удвічі



підвищити продуктивність; майже втричі зменшити віднесені до одного зубчастого колеса витрати на зуборізальні інструменти.

Аналіз результатів застосування способу РКБД показав, що до найбільш вагомому фактору, що визначає зусилля різання яке спричинює пружні деформації елементів інструментального технологічного оснащення, належить розмір поперечного перетину зрізуваних окремими зубцями ДФ шарів металу. Формоутворення ДФ зубців циліндричного колеса відрізняється від інших способів фрезерування ДФ складнішою схемою зрізування матеріалу. Застосовувані у ДФ змінні твердосплавні різальні зубці мають форму передньої поверхні у вигляді рівнобедреної трапеції (довжина переднього різального ребра та головний кут в плані відповідно рівні  $\delta$  та  $\varepsilon_h$ ). Положення ДФ відносно осі обертання інструментальної оправки визначається ексцентриситетом  $e$ , величина якого залежить від модуля зубчастого колеса -  $m$  та кута профілю  $\alpha_0$  зубців колеса (прийнято  $\alpha_0 = 20^\circ$ ).

Під час нарізання зубців циліндричних зубчастих коліс способом РКБД шари металу із западини між зубцями зрізуються завдяки суміщенню колового руху заготовки та осьового переміщення ДФ з величиною осьової подачі  $S_0$  вздовж осі оброблюваного зубчастого колеса. Внаслідок чого, кожна западина частково формується за кожний оберт заготовки. Зубці ДФ врізаються в западину сформовану на попередньому оберті заготовки колеса. Форма та розміри шарів металу, які зрізуються одним і тим самим різальним зубцем ДФ залишаються постійними. Геометричні параметри зрізуваних шарів металу (перетинів зрізу) визначають силове навантаження на інструмент та заготовку, величину тепловиділення в зоні обробки, стійкість різальних зубців ДФ, точність зубчастих коліс, продуктивність і собівартість технологічної операції зубонарізання.

Найбільша сумарна площа зрізів спостерігається у випадку, коли кут повороту ДФ разом з інструментальною оправкою рівний  $\theta = \pi$ . В цьому випадку спостерігається найбільше заглиблення інструмента в міжзубцеву западину колеса. Завдяки цьому, у різанні приймають участь найбільша кількість активних зубців ДФ. В площині ДФ в кожний момент часу проекції траєкторій точок різальних ребер утворюють навколо осі обертання інструментальної оправки концентричні кола з радіусами  $R_{K_j}$ , які визначаються за виразом:

$$R_{K_j} = \sqrt{r^2 + R_1^2 + 2 \cdot e \cdot R_1 \cdot \cos(\beta_{ct1} + (Z_{ctj} - 1) \cdot \beta_{ct0})}$$

де  $R_1$  - радіус вершин зубців дискового інструмента;  $\beta_{ct1}$  - кутова координата першого зубця  $K_1$  дискового інструмента;  $\beta_{ct0}$  - центральний кут між сусідніми зубцями дискового інструмента;  $Z_{ctj}$  - порядковий номер зубця дискового інструмента вершина якого відповідає позначенню  $K_j$ .

Для пари сусідніх зубців ДФ, наприклад  $Z_{ctj}$  та  $Z_{ctj+1}$  різниця між радіусами, що відповідають цим зубцям, наприклад,  $R_{K_j}$ ,  $R_{K_{j+1}}$  є постійною для всього часу тривалості операції зубонарізання, тобто глибина різання на кожному зубці визначається згідно залежності:  $t_j = R_{K_j} - R_{K_{j+1}} = \text{idem}$ . Отже,



ексцентричне розташування ДФ спричинює розміщення її зубців в процесі різання каскадом, що аналогічно розташуванню зубців у протяжок.

Загальна сумарна миттєва площа зрізу  $f_{\Sigma m}$  на всіх активних зубцях ДФ, які перебувають у міжзубцевій западині нарізованого колеса, залежить лише від кількості активних зубців і для випадку повороту ДФ разом з інструментальною оправкою на кут  $\theta = \pi$ , становить:

$$f_{\Sigma m} = (R_1 - R_{K1}) \cdot \left( \delta + S_0 \cdot \sin \left( \frac{\varepsilon_h}{2} \right) \cdot \sin \theta_1 \right) + (R_{K1} - R_{K_{m-1}}) \cdot \left( \delta + S_0 \cdot \sin \left( \frac{\varepsilon_h}{2} \right) \cdot \sin \theta_{K1} \right) + \\ + (R_{K_{m-1}} - R_{K_m}) \cdot \left( \delta + S_0 \cdot \sin \left( \frac{\varepsilon_h}{2} \right) \cdot \sin \theta_{K_{m-1}} \right) + (R_{K_m} - R_{K_{m+1}}) \cdot \left( \delta + S_0 \cdot \sin \left( \frac{\varepsilon_h}{2} \right) \cdot \sin \theta_{K_m} \right)$$

При збільшенні радіуса ДФ, а відтак зростання числа її зубців, відповідні величини  $f_{\Sigma m}$  практично стають однаковими, а дискретна кількість активних зубців ДФ, які приймають участь у різанні, не перевищує 5. Абсолютна величина  $f_{\Sigma m}$  достатньо мала, що свідчить про плавність процесу різання в процесі формоутворення зубців колеса. В діапазоні використовуваних для однопрохідного чорнового зубофрезерування осьових подач, бокові ребра зубців дискової фрези сприймають різне навантаження. Про це свідчать миттєві площі зрізу на вхідних та вихідних лезах зубців інструмента, що в свою чергу спричинює їх різне зношування. Миттєві складові сили різання, що діють на всіх активних зубцях ДФ по відношенню до заготовки зубчастого колеса, можуть бути розкладені на змінну радіальну складову, яка спричинює виникнення похибок кроку і профілю зубців зубчастого колеса, та змінну тангенціальну складову, яка спричинює виникнення кінематичних похибок зубчастого колеса.

Формування міжзубцевої западини зубчастого колеса при круговому русі осі ДФ здійснюється відмінними один від одного слідами різання, які залишають активні різальні зубці ДФ у міжзубцевій западині заготовки зубчастого колеса в радіальному та коловому напрямку, а стружки, які зрізуються вхідними лезами зубців дискового інструмента мають більшу довжину, яка в цілому визначається величиною осьової подачі, на відміну від довжини стружок, які зрізуються вихідними лезами згаданих зубців і залежать від різниці радіусів вершин зубців відносно осі обертання верстатної оправки.