

## ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ПРОЦЕСУ РАДІАЛЬНО-КОЛОВОГО НАРІЗАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС З ДИНАМІЧНОЮ ЗМІНОЮ ШВИДКОСТІ РІЗАННЯ

© Литвиняк Я.М., 2012

**Наведено результати моделювання операції нарізання евольвентних зубчастих коліс середніх та великих модулів дисковими фрезами завдяки комплексному поєднанню процесів копіювання та радіально-колового зубонарізання з безперервним діленням. Це дає змогу підвищити продуктивність зубонарізання з одночасним забезпеченням необхідної точності евольвентного профілю зубців колеса з застосуванням дискової фрези, різальні зубці якої сprofilьовані по евольвенті.**

**The results of the technological providing cutting operations of involutes the middle and large modules gear-wheels. Are resulted by disk milling cutters to due to complex combination of processes of copying and radial and rotating cutting with a continuously division.**

**Постановка проблеми.** Експлуатаційні показники циліндричних зубчастих передач, що безпосередньо залежать від показників точності, закладаються на етапі їх виготовлення. Забезпечення показників точності досягається реалізацією двох традиційних методів зубонарізання – копіюванням та обкатом. Метод обкату, незважаючи на те, що здійснюється за допомогою доволі дорогих зуборізальних інструментів, таких як черв'ячні фрези, належить до найзастосованішого на підприємствах для усіх типів виробництв та виготовлення зубчастих коліс фактично всіх типорозмірів. Однак процесу зубонарізання за методом обкату властиві певні недоліки, які сьогодні повністю не усунені. Вони пов'язані передусім із так званим верстатним зачепленням між черв'ячною фрезою та нарізуваним зубчастим вінцем колеса, що створюється ланцюгом ділення зубофрезерного верстата. Внаслідок цього фактично відсутня можливість підвищення продуктивності зубонарізання за рахунок збільшення швидкості різання, а також застосування сучасних твердосплавних інструментальних матеріалів для підвищення стійкості черв'ячних фрез. Згадані недоліки все більшою мірою проявляються із збільшенням модуля нарізуваного зубчастого колеса, наприклад, за одночасного нарізання черв'ячною фрезою двох косозубих зубчастих коліс приводу електровоза ВЛ-40 (модуль 10 мм, кількість зубців – 17, загальна довжина обробки – 220 мм, матеріал – сталь 20ХНЗА, число переходів – три) основний час становить 1569, хв (26,15 год). Інший метод зубонарізання – метод копіювання, на відміну від методу обкату черв'ячними фрезами, дає змогу здійснювати зубонарізання за значно більших швидкостей різання з використанням здебільшого модульних (фасонних) дискових фрез, оснащених твердосплавними різальними зубцями. Однак, незважаючи на це, продуктивність зубонарізання набагато нижча, ніж для черв'ячних фрез, оскільки прорізання кожної міжзубцевої западини здійснюють дискретно за почергового повороту заготовки зубчастого колеса, що істотно збільшує допоміжний час. Отже, наведені міркування дають змогу стверджувати, що виконання досліджень, пов'язаних із розробленням та впровадженням у виробництво нових процесів зубонарізання, які забезпечать підвищення техніко-економічних показників технологічних процесів виготовлення із одночасним забезпеченням необхідних показників точності зубчастих коліс середніх та великих модулів, належить до актуальних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Доволі перспективним з точки зору підвищення продуктивності на операціях зубонарізання, зокрема великомодульних коліс, є процес радіально-колового зубонарізання дисковою фрезою (ДФ) з безперервним обертанням заготовки (безпе-

рервним діленням) (РКБД), що виконується на універсальних зубофрезерних верстатах з додатковим нескладним їх дооснащенням [1, 2]. Основна особливість процесу РКБД полягає у застосуванні ДФ, ексцентрично встановленої на інструментальній оправці зубофрезерного верстата. Це забезпечує періодичне заглиблення ДФ у міжзубцеву западину колеса та подальше обминання зубця колеса. Такий обертовий, гармонійний рух ДФ разом із узгодженим із ним безперервним обертотворним рухом заготовки зубчастого колеса (ЗК) спричиняє кінематичне формоутворення бокових поверхонь зубців ЗК та надання їм такого профілю, який може бути зарахований до синусоподібних. Процес РКБД набагато продуктивніший та економічно доцільніший від методу зубонарізання за допомогою черв'ячних чи модульних фрез – уможлиблює потенційно збільшити продуктивність зубонарізання за рахунок відсутності жорсткого кінематичного зв'язку між частотами обертання ДФ та заготовки зубчастого колеса, а також відсутності складової допоміжного часу, що витрачається на дискретний поворот заготовки. Застосування у зубчастих передачах циліндричних коліс із зубцями синусоподібного профілю, якщо кут профілю на ділільному колі дорівнює  $20^{\circ}$ , обмежується певними геометричними особливостями синусоподібного профілю зубців, а також неможливістю застосування у зубчастих передачах, наприклад, транспортних засобів, коліс з профілем зубців, що відмінний від евольвентного, якщо застосування останнього регламентовано відповідними технічними умовами. Встановлено, що процес РКБД, за рівномірного обертотворного руху ексцентрикової інструментальної оправки, унеможлиблює отримати профіль зубців колеса, який був би наближеним до евольвентного профілю. Тому у попередніх дослідженнях було запропоновано поєднати процес РКБД з методом копіювання [2]. Внаслідок цього попереднє та кінцеве формоутворення однієї міжзубцевої западини колеса здійснюється однією ДФ за один робочий оберт інструментальної оправки, а евольвентного профілю зубцям колеса надають у відповідний спосіб спрофільовані (фасонні) різальні зубці ДФ, які, своєю чергою, можуть бути споряджені твердосплавними пластинами постійними або змінними, залежно від конструкції ДФ. Однак під час застосування ДФ із різальними зубцями, головне різальне ребро яких має певну ширину  $2\delta$ , спостерігається інтерференція периферійних крайок різальних зубців ДФ з зубцями зубчастого колеса. Для уникнення цього було запропоновано збільшити величину ексцентриситету  $e$ , з яким встановлюється ДФ на ексцентрикову інструментальну оправку, що певною мірою виправдано для зубчастих коліс середніх модулів [2]. Для зубчастих коліс великих модулів необхідне збільшення ексцентриситету  $e$  виявилось доволі значним і технологічно важко виконуваним, внаслідок обмеженості робочого простору верстата (наприклад, для зубофрезерного верстата моделі 5К32 віддаль між віссю інструментальної оправки і корпусом супорта не перевищує 105 мм.). Отже, в проаналізованих літературних джерелах відсутні обґрунтовані, універсальні рекомендації щодо повного усунення інтерференції фасонних різальних зубців ДФ з евольвентними зубцями нарізаного циліндричного колеса під час застосування нового, перспективного процесу РКБД, що потребує проведення додаткових досліджень.

**Формулювання мети досліджень.** Розроблення науково-технічних засад технологічного забезпечення операцій нарізання евольвентних зубчастих коліс середніх та великих модулів дисковими фрезами під час поєднання процесу радіально-колового зубонарізання з безперервним діленням та копіюванням профілю зубців колеса (РКБДК).

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Комбіноване застосування процесу РКБД та методу копіювання полягає у тому, що ексцентрично встановлена ДФ здійснює стосовно заготовки зубчастого колеса безперервний, складний рух, завдяки якому ДФ, прорізаючи міжзубцеву западину, у певному своєму положенні здійснює почергове формування евольвентного профілю на правому та лівому боці зубців колеса фасонними евольвентними боковими різальними лезами зубців ДФ. Тобто у міжзубцевій западині основна частина процесу різання відбувається вздовж синусоподібної траєкторії відносного руху ДФ, а формування евольвенти здійснюється у доволі короткий проміжок часу перебування ДФ на згаданій траєкторії тільки боковими фасонними лезами різальних зубців. Аналіз процесу РКБД дав змогу встановити, що, незважаючи на рівномірний

обертовий рух інструментальної оправки, встановлена на якій з ексцентриситетом ДФ здійснює нерівномірний рух стосовно заготовки зубчастого колеса у його радіальному напрямку. Характеристики відносного руху ДФ є такими, що отримуваний профіль зубців колеса може бути тільки синусоподібним. Найбільша товщина синусоподібних зубців колеса спостерігається за умови здійснення процесу формоутворення колом, тобто ширина різального ребра зубця ДФ дорівнює  $2\delta = 0$ . Для реального процесу нарізання застосовувати таку ДФ недоцільно через низьку її стійкість. Із збільшенням ширини  $2\delta$  різальних ребер зубців ДФ товщина зубця колеса синусоподібного профілю зменшується настільки, що стає неможливим забезпечити отримання евольвентного профілю фасонними різальними зубцями ДФ. Збільшення ексцентриситету  $e$  спричиняє збільшення швидкості заглиблення ДФ у міжзубцеву западину колеса, і крім того, збільшує час непродуктивного (неробочого) обертання ДФ разом з інструментальною оправкою.

Наведені міркування уможливили виокремити технологічний напрямок нарізання евольвентних зубчастих коліс із застосуванням процесу РКБД разом із копіюванням профілю зубця (РКБДК). Він полягає у наданні ДФ разом з ексцентриковою частиною інструментальної оправки періодного, нерівномірного обертового руху за час прорізання однієї западини між зубцями циліндричного зубчастого колеса. У цьому випадку зберігається встановлювана ланцюгом ділення зубофрезерного верстата кількість обертів інструментальної оправки, які вона здійснює за один повний оберт стола верстата для нарізання  $Z$  зубців зубчастого колеса, а необхідне певне кутове сповільнення та рівне йому кутове пришвидшення отримує разом із ДФ ексцентрикова частина інструментальної оправки у межах одного із  $Z$  циклів прорізання. Забезпечити потрібні кутові сповільнення та пришвидшення можна за допомогою нескладного додаткового пристрою, встановлюваного разом із інструментальною оправкою на супорт зубофрезерного верстата. Усе це в комплексі дасть змогу уникнути інтерференції зубців ДФ із зубцями колеса. Структурну схему процесу РКБДК показано на рис. 1.

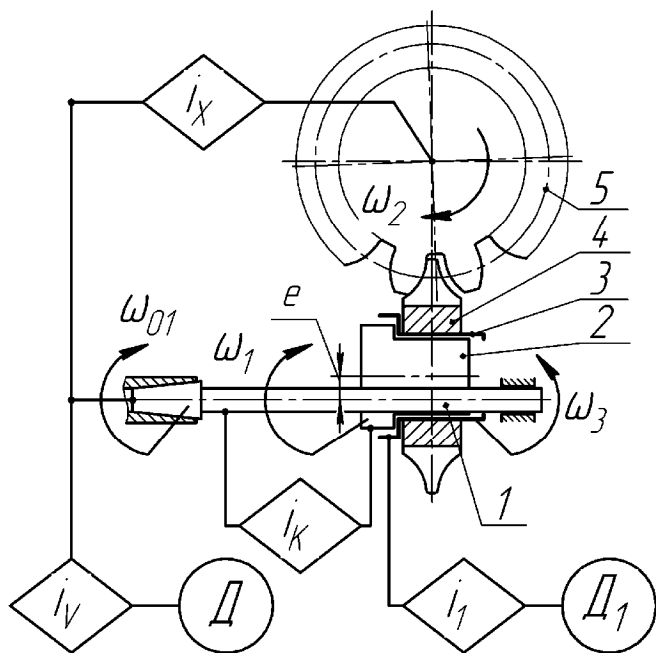


Рис. 1. Схема реалізації процесу РКБДК

Втулка 3 може вільно обертатися з кутовою швидкістю  $\omega_3$  на ексцентриковій частині 2. Обертовий рух втулки 3 отримує від окремого двигуна  $D_1$  за допомогою передачі  $i_1$ , яка може змінюватись  $\omega_3$  у певних межах (встановлюють згідно зі швидкістю різання).

Вузол динамічної зміни кутової швидкості  $i_k$  (ДЗКШ) отримує рівномірний обертовий рух від інструментальної оправки 1, а потім внаслідок дії певного простого механізму перетворює його у

Структурна схема, показана на рис. 1, частково відтворює кінематичні елементи зубофрезерного верстата (не відображені кінематичні ланцюги диференціала та подач). Рівномірний обертовий рух ротора двигуна  $D$  зубофрезерного верстата розподіляється на два рівномірні обертові рухи – шпинделя  $\omega_{01}$  та стола (заготовки колеса) –  $\omega_{01}$ . Під час налагодження зубофрезерного верстата за допомогою коробки швидкостей  $i_v$  забезпечують шпинделю та інструментальній оправці 1 кутову швидкість  $\omega_{01}$ , а за допомогою механізму ділення  $i_x$  узгоджують частоти обертання шпинделя та стола верстата залежно від кількості зубців  $Z$  нарізаного циліндричного колеса, надаючи заготовці колеса 5 кутову швидкість  $\omega_2$  ( $\omega_2 = Z \cdot \omega_{01}$ ). На інструментальній оправці 1, з можливістю кутового повороту стосовно її осі, встановлюють ексцентрикову частину 2, на якій завчасно розташована втулка 3 разом із закріпленою ДФ 4.

змінний періодичний обертовий рух, який за допомогою, наприклад, циліндричної зубчастої передачі, що складається із двох шестерень, передається ексцентриковій частини 2, кутова швидкість якої дорівнює  $\omega_1$ . Необхідно зауважити, що середнє значення періодичної змінної кутової швидкості  $\omega_1$  дорівнює  $\omega_{01}$ , тобто  $\bar{\omega}_1 = \omega_{01}$ .

Функціонування вузла ДЗКШ доцільно забезпечити за допомогою тільки простих одно- і дволанкових механізмів, що загалом відповідає принципам проектування інструментального чи технологічного оснащення. Виконані пошукування із усього різноманіття відомих механізмів дали змогу виокремити такі прості механізми: універсальний шарнір (УШ) [3], двокривошипний механізм (ДКР) [5], передача із зубчастими колесами із радіально зміщеними вінцями (КЗВ) [4].

Застосування ДЗКШ з УШ передбачає використання двох УШ. Для встановлення величини кута, що визначає величину випередження чи запізнення вихідної осі веденого (другого) УШ 1 стосовно вхідної осі ведучого (першого) УШ 2, доцільно два УШ замінити одним еквівалентним УШ для якого, своєю чергою, розрахувати такі параметри [3, 5]:

$$\theta = \left( \theta_1^4 + \theta_2^4 - 2 \cdot \theta_1^2 \cdot \theta_2^2 \cdot \cos(2\alpha) \right)^{1/4}; \quad A_\theta = \arctg \left( \frac{1}{\cos \theta} \right)^{1/2} - \arctg(\cos \theta)^{1/2};$$

$$D_\varphi = -A_\theta \cdot \sin(2\varphi_{01}); \quad \frac{\omega_1}{\omega_{01}} = \frac{\cos \theta}{\sin^2 \varphi_{01} + \cos^2 \varphi_{01} \cdot \cos^2 \theta},$$

де  $\theta$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  – кут між вхідною та вихідною віссю відповідно еквівалентного, ведучого та веденого УШ, рад.;  $\alpha$  – фазовий кут – кут між площинами, в яких розташовані вихідна вилка ведучого УШ 1 та вхідна вилка веденого УШ 2, рад.;  $A_\theta$  – амплітуда коливань відповідного кута еквівалентного УШ під час його обертання;  $D_\varphi$  – кут запізнення або випередження вихідної осі стосовно вхідного кута  $\varphi_{01}$ , еквівалентного УШ.

Для часткового випадку, в якому потрібно сподіватися на найбільшу нерівномірність обертання вихідної осі веденого УШ 2, фазовий кут  $\alpha$  набуває такого значення:  $\alpha = \pi/2$ . Використовуючи співвідношення  $\theta_1 = \theta_2$  та  $\theta_1 = 15^\circ$ , отримаємо:  $\theta = \theta_1 \cdot \sqrt{2}$ ;  $\theta = 0,37024$  рад. =  $21,213^\circ$ ;  $A_\theta = 0,0035$  рад. =  $2,00965^\circ$ ;  $D_{\varphi_{\max}} = 0,002984$  рад. =  $1,71^\circ$ ;  $0,932 \leq \omega_1 / \omega_{01} \leq 1,073$ .

Необхідно зауважити, що зміна кута  $D_\varphi$  описується періодичною синусоїдною кривою. Максимальні значення кута запізнення або випередження  $D_\varphi$  спостерігаються для кутів повороту ведучої осі, що дорівнюють  $\varphi_{01} = \frac{\pi}{4} + k \cdot \frac{\pi}{2}$ , де  $k$  – ціле число, що дорівнює  $k = 0; 1; 2; 3 \dots$ , а кути повороту ведучої осі УШ 1 та веденої осі УШ 2 дорівнюватимуть тільки  $\varphi_{01} = \frac{\pi}{2} + k \cdot \frac{\pi}{2}$ , тобто  $D_\varphi = 0$ .

Отже, один період (півперіод) зміни кутів запізнення та випередження  $D_\varphi$  починається кутом  $\varphi_{01} = 0^\circ$ , а завершується кутом  $\varphi_{01} = \pi = 180^\circ$  ( $\varphi_{01} = \pi/2 = 90^\circ$ ). Однак для практичного застосування ДЗКШ з УШ потрібно забезпечити стосовно ЗК таке радіальне переміщення ДФ, за якого повний цикл формування однієї міжзубцевої западини ЗК відбувається в напрямку до осі заготовки ЗК із сповільненням, а в напрямку від осі заготовки ЗК з аналогічним пришвидшенням, якщо кут повороту ексцентрикової частини інструментальної оправки дорівнює  $\varphi_1 = 2\pi = 360^\circ$ . Тому вихідна передача ДЗКШ складена, наприклад, коли вихідні шестерні ДЗКШ повинні забезпечити збільшення середнього значення кутової швидкості  $\bar{\omega}_1$  ексцентрикової частини стосовно  $\omega_{01}$  вдвічі, тобто  $\bar{\omega}_1 = 2 \cdot \omega_{01}$ . Внаслідок цього налагодження ланцюга ділення зубофрезерного верстата потрібно виконувати за співвідношенням  $\omega_{01} = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot \omega_2$ .

Використовуючи вузол ДЗКШ з ДКР або з КЗВ, потрібно врахувати те, що середнє значення кутової швидкості  $\bar{\omega}_1$  ексцентрикової частини інструментальної оправки щодо  $\omega_{01}$  відповідає співвідношенню  $\bar{\omega}_1 = \omega_{01}$ . Тому ланцюг ділення зубофрезерного верстата налагоджується згідно зі співвідношенням  $\omega_{01} = Z \cdot \omega_2$ . Для конструктивного виконання вузла ДЗКШ з ДКР основні співвідношення набувають такого вигляду [5]:

$$\varphi_1 = \mu_1 + \delta_1 - \psi_1; \quad \mu_1 = \arccos \frac{l_1^2 + b_1^2 - \Delta_1^2}{2 \cdot l_1 \cdot b_1}; \quad \delta_1 = \arccos \frac{l_1^2 + \Delta_1^2 - b_1^2}{2 \cdot l_1 \cdot \Delta_1}; \quad \psi_1 = \arcsin \frac{r_1 \cdot \sin \varphi_{01}}{\Delta_1};$$

$$\Delta_1 = \sqrt{r_1^2 + a_1^2 - 2r_1 \cdot a_1 \cdot \cos \varphi_{01}}; \quad \frac{\omega_1}{\omega_{01}} = \frac{\frac{a_1}{b_1} \cdot (l_1 - b_1) - r_1 \cdot \sin(\varphi_{01} - \varphi_1)}{a_1 - r_1 \cdot \sin(\varphi_{01} - \varphi_1)},$$

де  $r_1$  та  $b_1$  – радіус кривошипа відповідно ведучого та веденого;  $l_1$  – довжина шатуна;  $a_1$  – віддаль між осями інструментальної оправки та допоміжного паралельного вала вузла ДЗКШ з ДКР.

Особливість вузла ДЗКШ з ДКР полягає у тому, що напрямки обертання ведучого та веденого кривошипів – співнапрямлені, а шатун цього механізму перетинає осі обертання двох валів, на яких встановлені відповідно ведучий та ведений кривошипи (знижується жорсткість вузла, зростає конструктивна складність).

Використання КЗВ у вузлі ДЗКШ дає змогу отримати нерівномірну кутову швидкість найпростішим способом, а саме – з застосуванням найменшої кількості деталей: двох зубчастих коліс з однаковою кількістю зубців та однаковим радіальним зміщенням  $e_r$  зубчастих вінців. Розрахункову схему механізму з КЗВ зображено на рис. 2.

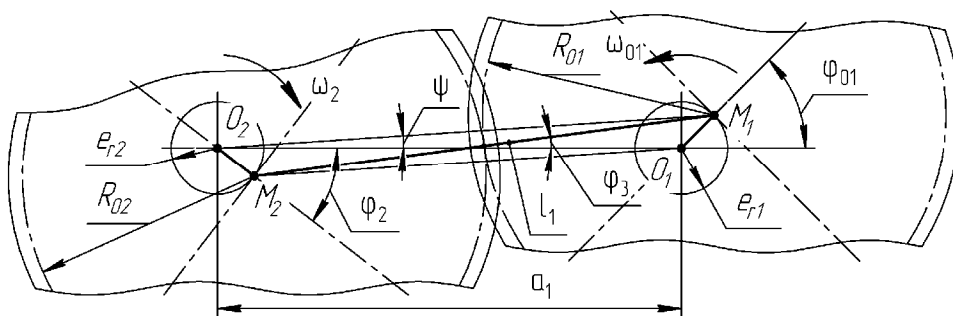


Рис. 2. Схема механізму складеного з коліс із радіально зміщеними зубчастими вінцями

Двоколісний механізм складається із ведучого (кутова швидкість  $\omega_{01}$  – постійна) та веденого (кутова швидкістю  $\omega_2$  – змінна) зубчастих коліс, які мають однакові радіуси початкових кіл –  $R_{01} = R_{02}$ . Зубчасті вінці коліс зміщені стосовно відповідних осей обертання  $O_1 = O_2$  на відстань –  $e_r = e_{r1} = e_{r2}$ . Цей механізм може бути замінений на еквівалентний двокривошипний механізм. Довжина кривошипів дорівнює величині радіального зміщення –  $e_r = e_{r1} = e_{r2}$ , відстань між осями кривошипів (коліс)  $a_1$  та довжина шатуна  $l_1$  однакові –  $a_1 = l_1$ , а довжина шатуна пов'язана із радіусами початкових кіл таким співвідношенням:  $l_1 = R_{01} + R_{02}$ . Двокривошипний механізм утворює рівнобічну трапецію  $O_1M_1O_2M_2$ , у якій відрізок  $M_1O_2$  паралельний до відрізка  $M_2O_1$ , відрізки  $M_1O_1$  та  $M_2O_2$  – рівні, а між відповідними кутами справджуються такі співвідношення:

$$\varphi_3 = 2 \cdot \psi; \quad \psi = \frac{1}{2} \cdot (\varphi_{01} - \varphi_2); \quad \varphi_3 = \varphi_{01} - \varphi_2.$$

Визначаючи проекції кривошипів та шатуна на горизонтальну та вертикальну осі координат, отримаємо відповідні вирази:

$$a_1 + e_{r1} \cdot \cos \varphi_{01} - e_{r2} \cdot \cos \varphi_2 = l_1 \cdot \cos \varphi_3; \quad e_{r1} \cdot \sin \varphi_{01} + e_{r2} \cdot \sin \varphi_2 = l_1 \cdot \sin \varphi_3.$$

Використовуючи останній вираз і враховуючи попередні співвідношення, маємо:

$$e_r \cdot \sin \varphi_{01} + e_r \cdot \sin \varphi_2 = l_1 \cdot \sin(\varphi_{01} - \varphi_2).$$

Застосовуючи такі еквівалентні перетворення

$$e_r \cdot \left( \sin \frac{\varphi_{01} + \varphi_2}{2} \cdot \cos \frac{\varphi_{01} - \varphi_2}{2} \right) = l_1 \cdot \left( \sin \frac{\varphi_{01} - \varphi_2}{2} \cdot \cos \frac{\varphi_{01} - \varphi_2}{2} \right); \quad e_r \cdot \sin \frac{\varphi_{01} + \varphi_2}{2} = l_1 \cdot \sin \frac{\varphi_{01} - \varphi_2}{2};$$

$$(l_1 - e_r) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{01}}{2} = (l_1 + e_r) \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_2}{2}, \text{ отримаємо, } \varphi_2 = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{l_1 - e_r}{l_1 + e_r} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{01}}{2} \right).$$

Диференціюючи за узагальненою координатою  $\varphi_{01}$  вираз проекцій елементів двокривошипного механізму на горизонтальну вісь, маємо  $-e_{r1} \cdot \sin \varphi_{01} + e_{r2} \cdot \frac{d\varphi_2}{d\varphi_{01}} \cdot \sin \varphi_2 = -l_1 \cdot \frac{d\varphi_3}{d\varphi_{01}} \cdot \sin \varphi_3$ , а виконуючи послідовне віднімання кутів  $\varphi_2$  та  $\varphi_3$ , отримемо відповідно вирази

$$e_{r1} \cdot \sin(\varphi_{01} - \varphi_2) = l_1 \cdot \frac{d\varphi_3}{d\varphi_{01}} \cdot \sin(\varphi_3 - \varphi_2), \quad e_{r2} \cdot \frac{d\varphi_2}{d\varphi_{01}} \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi_3) = e_{r1} \cdot \sin(\varphi_{01} - \varphi_3), \text{ які дають}$$

зможу знайти аналоги кутових швидкостей ланок  $\frac{d\varphi_3}{d\varphi_{01}} = \frac{e_{r1}}{l_1} \cdot \frac{\sin(\varphi_{01} - \varphi_2)}{\sin(\varphi_3 - \varphi_2)}$ ;  $\frac{d\varphi_2}{d\varphi_{01}} = \frac{\sin(\varphi_{01} - \varphi_3)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}$ , а

згодом і кутові швидкості шатуна  $\omega_3 = \omega_{01} \cdot \frac{d\varphi_3}{d\varphi_{01}} = \omega_{01} \cdot \frac{e_r}{l_1} \cdot \frac{\sin(\varphi_{01} - \varphi_2)}{\sin(\varphi_3 - \varphi_2)} = \omega_{01} \cdot \frac{e_r}{l_1} \cdot \frac{\sin(\varphi_{01} - \varphi_2)}{\sin(\varphi_{01} - 2\varphi_2)}$

та веденого кривошипа  $\omega_2 = \omega_{01} \cdot \frac{d\varphi_2}{d\varphi_{01}} = \omega_{01} \cdot \frac{\sin(\varphi_{01} - \varphi_3)}{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)} = \omega_{01} \cdot \frac{\sin \varphi_2}{\sin(2\varphi_2 - \varphi_{01})}$ .

Для розглянутого механізму, складеного із двох зубчастих коліс із радіально зміщеними вінцями (двокривошипного механізму) за умови передачі на ексцентрикову частину інструментальної оправки (див. рис. 1) обертального руху з параметрами  $\omega_1 = \omega_2$ ,  $\varphi_1 = \varphi_2$ , отримаємо для вузла ДЗКШ з КЗВ таке передавальне відношення та кут повороту:

$$\frac{\omega_1}{\omega_{01}} = \frac{\sin \varphi_1}{\sin(2\varphi_1 - \varphi_{01})}; \quad \varphi_1 = 2 \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{l_1 - e_r}{l_1 + e_r} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi_{01}}{2} \right).$$

Необхідно зауважити, що застосування додаткових ДЗКШ, приєднаних до інструментальної оправки зубофрезерного верстата, дає змогу встановити величину ексцентриситету  $e$ , близьку до величини висоти ніжки евольвентного зубця оброблюваного колеса, тобто  $e = 1,25m$ , де  $m$  – модуль зубчастого колеса, внаслідок чого знижується величина неробочого ходу ексцентрикової частини інструментальної оправки, тобто зростає частка в основному часі безпосереднього різання у циклі прорізання міжзубцевої западини колеса.

**Висновки.** Розроблені технологічні заходи для комплексного поєднання під час зубонарізання циліндричних коліс процесів копіювання та радіально-колового формоутворення дисковим інструментом за умови безперервного ділення. Запропоновані принципові конструктивні схеми додаткових верстатних пристроїв динамічної зміни кутової швидкості, які в межах одного циклу прорізання міжзубцевої западини оброблюваного циліндричного колеса забезпечують сповільнення та пришвидшення кутової швидкості обертання, встановленої з ексцентриситетом дискової фрези. Наведені відповідні залежності для розроблення відповідного технологічного оснащення.

1. Литвинок Я.М. Нарізка зубців зубчастих коліс заданого профілю дисковим інструментом за допомогою копіювального пристрою способом радіально-колового формоутворення // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 701: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів. – С. 61–69. 2. Литвинок Я.М. Розрахунок параметрів дискових інструментів для радіально-колового нарізання зубчастих вінців циліндричних зубчастих коліс // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – № 702: Оптимізація

виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – С. 24–31. 3. Проектирование универсальных шарниров и ведущих валов / А.Х. Беркер, И.Р. Вагнер, Н.В. Вебстер и др. – Л.: Машиностроение, 1984. – 463 с. 4. Зубчатые и червячные передачи. Некоторые вопросы геометрии, кинематики, расчета и производства / под. ред. Н.И. Колчина. – Л.: Машиностроение, 1968. – 363 с. 5. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин. – К.: Наук. думка, 2002. – 660 с.

УДК 621.9(075.8)

**В.В. Ступницький**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра технології машинобудування

## **МЕХАНІКА ДИСЛОКАЦІЙ ПІД ЧАС РІЗАННЯ ТА ЇЇ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДАМИ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

© Ступницький В.В., 2012

**Проаналізовано основні положення теорії дислокацій з точки зору використання у реологічних моделях різання. Наведено результати імітаційного моделювання критерію Бюргерса. Наведено математичну модель, яка описує поведінку термопружнопластичної заготовки у процесі її нарізання.**

**In the article the analysed bases of theory of distributions are from the point of view of the use in the reological models of cutting. Given results over of imitation design of Burgers criterion. Described mathematical model over that describes behavior of the thermal and tense state of plastic purveyance in the cutting process.**

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень.** Теорія пластичної деформації знаходиться у менш задовільному становищі, ніж теорія пружності або термодинаміка, через свою нелінійність, складність описання динамічних процесів, що відбуваються у складно деформованому середовищі під дією локального руйнівного напруження, впливу великої кількості чинників на отримання адекватного результату моделювання. Пластична деформація, що передує руйнуванню, визначається рухом дислокацій у кристалі. Сучасній науці досі не вдалося знайти однозначне аналітичне розв'язання рівнянь квантової механіки, що визначали б розташування атомів біля дислокації, і для сил, необхідних для деформаційних дислокацій. Найефективнішим методом аналітичних досліджень є розповсюдження механіки суцільних середовищ на області майже атомних розмірів і її корегування шляхом введення відповідної нелінійної поправки для області найвищих деформацій у ядрі дислокації замість квантово-механічного аналізу [1]. Проте отримання квантово-механічного рішення навіть для одиначної дислокації не так вже й складно, оскільки велика частина енергії дислокації зосереджена не в ядрі цієї недосконалості, а в пружно-деформованій області, розміри якої дають змогу з впевненістю використати континуальну теорію пружності [2, 4].

У зв'язку з цим, використавши незначні припущення, вдалося розвинути теорію дислокацій у процесах різання, яка пояснює їх рух, взаємодію і розвиток під дією прикладеної ззовні силової взаємодії інструмента та заготовки. Отримані рішення допомагають з'ясувати природу процесів деформації і руйнування матеріалів. Завдяки вдосконаленню металографічних методик і використанню електронної мікроскопії стало можливим спостереження окремих дислокацій, і тепер відомостей, отриманих експериментально, набагато більше, ніж тих, що отримані внаслідок теоретичних досліджень. На макроскопічному рівні механіка різання використовує рівняння, що пов'язують напруження і деформацію (ці рівняння або отримані емпірично, або впливають з даних про структуру матеріалу [1]), і, враховуючи умови рівноваги і геометричної спільності, передбачає поведінку областей матеріалу, розміри яких настільки великі, що можна вважати їх однорідними.