

УДК 621.992.04

*Н. С. РАВСЬКА, В. В. ВОВК, С. П. ВОРОБИЙОВ, Є.В. БАСОВА***ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РІЗЦІВ ГОЛОВКИ ПРИ НАРІЗАННІ ТОЧНИХ АРОЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС**

Розроблена методика визначення геометричних параметрів різцевої головки при нарізанні точних циліндричних арочних зубчастих коліс на верстатах з числовим програмним керуванням. Отримані залежності для розрахунку та аналізу передніх та задніх кутів інструменту в процесі нарізання та вздовж його різальних кромки. Запропоновано конструктивне забезпечення доцільних кутів на різальних кромках.

Ключові слова: геометричні параметри, різцева головка, зубонарізання, точні, арочні, зубчасті колеса.

Разработана методика определения геометрических параметров режущей головки при нарезании точных цилиндрических арочных зубчатых колес на станках с числовым программным управлением. Получены зависимости для расчета и анализа передних и задних углов инструмента в процессе резания и вдоль его режущих кромок. Предложено конструктивное обеспечение целесообразных углов на режущих кромках.

Ключевые слова: геометрические параметры, режущая головка, зубонарезание, точные, арочные, зубчатые колеса.

The use of precise cylindrical arched gears in machine mechanisms will increase their performance due to increased load capacity, wear resistance, noise reduction, vibration, increased durability. Cutting of such arched wheels can be carried out by with face cutters heads on machines with numerical control. With additional shaping movements, for cutting precise involute gear wheels, the geometry of the cutting element in the cutting process will differ from the original tool set in the drawing. Depending on the parameters of the gear and the cutter head value kinematic angles may acquire unsatisfactory value and adversely affect the gear cutting process. Therefore, the study and determination of the geometry of the tool blade during the cutting process is a topical problem that needs to be solved.

To solve this problem, a technique was developed to analytically determine the front and rear angles of a tool shaped blade. Depending obtained can determine kinematic angles along the cutting blades and at different positions of the tool and the workpiece.

Studies have shown that when cutting arched wheels with bilateral cutters that simultaneously cut the convex and concave sides of the tooth cavity, it is quite difficult and sometimes impossible to obtain satisfactory kinematic rear corners at the tip of the tool. Therefore, a scheme was proposed for separate cutting of the convex and concave sides of the tooth cavity, which makes it possible to apply angular occlusion, in which it is possible to obtain the necessary kinematic rear corners on the lateral and apical cutting edges of the tool.

Keywords: geometric parameters, tool head, gear cutting, precise, arched, wheels.

Вступ. Застосування циліндричних арочних зубчастих коліс на заміну прямозубих дає можливість збільшити навантажувальну здатність в 1,25–1,5 рази та довговічність у 2–3 рази, знизити вібрацію, шумові характеристики, металоємність та собівартість [1, 2]. Крім того, в арочних колесах легко досягається необхідна локалізація плями контакту, що знижує їх чутливість до перекосу осей, похибок монтажу [3, 4]. Вони забезпечують плавну передачу руху і можуть використовуватись як у тихохідних так і в швидкісних високонавантажених передачах [5,6].

Характерним для арочних зубчастих коліс, як і для косозубих, є наявність кута нахилу лінії зуба, який в свою чергу залежить від радіуса кривизни арки зуба і впливає на коефіцієнт осьового перекриття [7]. Проте на відміну від косозубих, в арочних передачах відсутні осьові зусилля, оскільки вони компенсуються протилежними кутами нахилу напіварок зуба, як і у шевронних зубчастих колесах, тому арочні зубчасті колеса можуть самовстановлюватись під навантаженням, якщо одному з них надати можливість осьового переміщення. Ця властивість особливо актуальна для високонавантажених передач. Так використання арочних зубчастих коліс в коробках швидкостей повітряних турбін дозволить підвищити їх надійність та довговічність [8].

Також застосування арочних зубчастих коліс в роторах гідравлічних шестеренних насосів дозволяє зменшити віброшумову характеристику насосів, отримати порівняно більший коефіцієнт перекриття зубів, в порівнянні з прямозубими, забезпечити локалізацію зони контакту зубів, що компенсує похибки напрямку

зубів і відносного розташування осей роторів, зменшити пульсацію перекачуваної рідини [9].

Однак, не зважаючи на всі переваги циліндричних арочних зубчастих коліс, широкого розповсюдження у галузях промисловості вони не знайшли. Основною причиною цього, до недавнього часу, була відсутність способів їх зубонарізання, які б поєднували у собі такі характеристики, як технологічність, працездатність, простота, універсальність, точність, з яких більша кількість залишаються малодослідженими.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Класифікація способів зубонарізання та характеристики отримуваних зубчастих коліс показана у роботах [10, 11]. Автор розділяє існуючі способи зубообробки на два типи: способи, що дозволяють отримати зубчасті колеса зі змінним кутом тиску в поперечних перерізах зубчастого колеса та способи, що дають змогу отримати постійний кут тиску.

На даний час особлива увага приділяється циліндричним арочним колесам, що мають постійний контакт вздовж лінії зуба та незмінний кут тиску. Як показують дослідження, проведені у роботах [12, 13], саме такі зубчасті колеса характеризуються високою навантажувальною здатністю та можливістю самовстановлюватись під навантаженням. Нарізання таких зубчастих коліс здійснюється інструментом з нульовим та ненульовим кутом профілю.

Перші з них виконуються кінцевою фрезою [14, 15] або різцевою головкою [16] на верстатах з ЧПК. Вони характеризуються невисокою працездатністю, оскільки нарізання випуклої та ввігнутої частин западини зуба колеса здійснюється окремо, та

© Н. С. Равська, В. В. Вовк, С. П. Воробійов, Є.В. Басова, 2017

обмеженням на розміри інструменту, що нарізає западину зуба колеса.

Методи, що виконуються зуборізним інструментом з ненульовим кутом профілю, характеризуються більш високою продуктивністю, оскільки нарізання здійснюється одночасно випуклої та ввігнутої частини западини зуба колеса. Характерним для цих способів є формоутворення евольвенти в усіх торцевих перерізах та постійної товщини зуба колеса вздовж лінії зуба, шляхом збереження вихідного положення різальної частини інструменту при його русі по дузі кола або по іншій кривій лінії зуба. Це може досягатися за рахунок повороту різця навколо своєї осі в протилежному напрямку обертання різальної головки або наданням різцю коливального, паралельного собі, дугopodobного руху в площині, дотичній до діляльного кола шестерні [10]. У першому випадку, такий рух різця можна здійснити за рахунок різцевої головки у вигляді планетарного механізму [17], де різці встановлюються на сателітах, а водило є нерухомим. Проте даний механізм є досить складним і не універсальним, оскільки для нарізання зубів, виконаних по дузі кола, необхідне виготовлення відповідного радіуса різцевої головки. У другому випадку, автором [10] розглядається застосування верстата, що зможе забезпечити відповідні стругальні рухи при нарізанні циліндричних арокних зубчастих коліс. Однак, у роботі [18] показано, що незмінний рух різця можна забезпечити не лише планетарним механізмом та виготовленням стругального верстата, а за рахунок додаткових зміщень зубчастого колеса при нарізанні різцевими головками на пятикоординатних верстатах з числовим програмним керуванням.

В свою чергу, при способах зубонарізання розглянутих вище, коли різець не змінює свого положення відносно торцевого перерізу колеса, геометрія різальної частини буде змінюватись в процесі різання. Для забезпечення працездатності різального інструменту необхідно створити на різальній кромці величини геометричних параметрів, рекомендовані для оброблення даного матеріалу. Тому для оцінки величин цих кутів та прогнозування працездатного такого інструменту, що нарізає зуби циліндричного арокного зубчастого колеса при незмінному положенні його різального леза відносно торцевого перерізу колеса, необхідно розробити методику їх визначення, що є актуальною науковою та практичною задачею при проектуванні таких зуборізних інструментів.

Метою роботи є розробка методики визначення геометричних параметрів різців головки при нарізанні точних арокних зубчастих коліс на верстатах з числовим програмним керуванням та конструктивне забезпечення їх доцільних значень.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- розробити методику визначення геометричних параметрів різальної частини інструменту в процесі нарізання циліндричних арокних зубчастих коліс;
- визначити зміну геометричних параметрів в процесі нарізання коліс вздовж різальної кромки;
- конструктивно забезпечити доцільні значення параметрів різців при нарізанні арокних зубчастих коліс.

Методика визначення геометричних параметрів різцевих головок при нарізанні точних арокних зубчастих коліс. Згідно ДСТУ 22498-93 регламентуються інструментальна, статична та кінематична системи координат, в яких визначаються відповідні геометричні параметри.

Визначення кутів в кінематичній системі координат, орієнтованій відносно результуючого руху, в найбільшій мірі відповідає процесу різання. Загальна методика їх визначення наведена у роботі [19]. Згідно цієї методики кінематичні передні $\gamma_{нк}$ та задні $\alpha_{нк}$ кути в нормальному до різальної кромки визначаються через інструментальні нормальні передні γ_n та задні α_n кути та кутом τ_n між кінематичною $P_{нк}$ та інструментальною $P_{ні}$ площинами різання.

Значення нормальних кутів γ_n та α_n вважаються заданими на вершинній кромці інструмента, а на бокових різальних кромках їх значення є невідомим. Тому виникає задача їх визначення.

Геометричні параметри різальної частини інструменту в інструментальній системі координат на бокових різальних кромках. Геометрія різальної частини торцевої головки для нарізання циліндричних арокних зубчастих коліс фасонним різцем в інструментальній системі координат $x_i y_i z_i$ зображена на рис. 1.

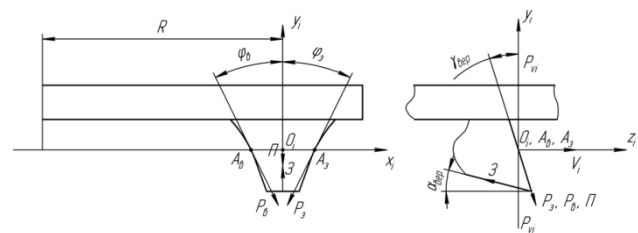


Рис. 1 - Геометрія різальної частини інструменту

Положення інструментальної системи координат $x_i y_i z_i$ вибираємо таким чином, щоб її початок (т. O_i) знаходився на осі симетрії зуба, точки внутрішньої A_B та зовнішньої A_3 різальних кромки, через які проходить вісь x_i , лежали на діляльному колі зубчастого колеса, координатна площина $x_i y_i$ лежала в інструментальній основній площині P_{vi} , а координатна площина $x_i z_i$ проходила через точки A_B та A_3 .

Розглянемо інструментальні геометричні параметри різальної кромки різця:

$\gamma_{вер}$ та $\alpha_{вер}$ – вершинні передній кут та задній кут, які визначені у ДСТУ 22498-93.

Кутами в плані φ_3 зовнішньої та φ_B внутрішньої бокових різальних кромки для евольвентної частини профілю при радіальній подачі буде кут між дотичною до евольвенти та напрямком подачі і визначається за формулою:

$$\varphi = \varphi_x + \varphi_0, \quad (1)$$

де φ_x – кут розгорнутості евольвенти у досліджуваній точці;

φ_0 – кут повороту евольвентного профілю, між віссю симетрії западини зуба та початковою точкою евольвенти на основному колі.

При проектуванні фрез з кутами $\gamma_{вер} = 0$, коли передня площина проходить через вісь фрези, форма різальної кромки і профіль зуба фрези в осьовому пе-

перізі будуть тотожні профілю вихідної інструментальної поверхні. В інших випадках профіль зуба фрези необхідно профілювати.

Для визначення інструментальних кутів на бокових різальних кромках необхідно визначити взаємне розташування передньої площини, задньої площини та площини різання в розглядуваній точці бокових різальних кромок.

Положення передньої площини визначається векторами дотичними до зовнішньої P_3 та внутрішньої P_6 бокових різальних кромок та вектором Π , що лежить на лінії перетину передньої площини з координатною площиною y_1z_1 . Довжину векторів P_3 та P_6 вибираємо такою, щоб їх проекція на інструментальну площину P_{vi} дорівнювала одиниці, а проекція вектора Π на вісь y_1 також була рівна одиниці. Тоді вектори можна записати так:

$$\begin{aligned} \vec{P}_3 &= -\vec{i} \sin \varphi_3 - \vec{j} \cos \varphi_3 + \vec{k} \cos \varphi_3 \tan \gamma_{вер} \\ \vec{P}_6 &= \vec{i} \sin \varphi_6 - \vec{j} \cos \varphi_6 + \vec{k} \cos \varphi_6 \tan \gamma_{вер} \\ \vec{\Pi} &= -\cos \gamma_{вер} \vec{i} + \sin \gamma_{вер} \vec{k} \end{aligned} \quad (2)$$

Положення задніх бокових площин визначається векторами P_3 та P_6 і вектором Z , розташованим на задній поверхні вершинної різальної кромки. Довжину вектора Z вибираємо такою, щоб його проекція на вісь y_1 дорівнювала одиниці, тоді запишемо:

$$\vec{Z} = \vec{j} - \frac{\vec{k}}{\tan \alpha_{вер}} \quad (3)$$

Вектор швидкості V_i в інструментальній системі координат перпендикулярний до основної площини P_{vi} і направлений вздовж осі z_1 і його проекція на цю вісь дорівнює одиниці, тому:

$$\vec{V}_i = \vec{k} \quad (4)$$

Шляхом знаходження нормалей до передньої, задньої та поверхні різання за методикою [19] визначаються нормальні інструментальні передні $\gamma_{нб}$ та задні $\alpha_{нб}$ кути на бокових різальних кромках.

Для знаходження кута τ_n між кінематичною $P_{нк}$ та інструментальною $P_{ни}$ площинами різання необхідно визначити положення векторів P_3 та P_6 дотичних до бокових різальних кромок в будь-який момент повороту різцевої головки та вектора швидкості V_e результуючого руху різання, як суму всіх рухів, що здійснює інструмент відносно заготовки.

Визначення швидкості результуючого руху та положення різця в процесі нарізання. Для визначення положення поверхонь різця в процесі нарізання необхідно визначити положення інструментальної системи координат в залежності від кута повороту заготовки. Для цього розглянемо формоутворюючі рухи при нарізанні арокних зубчастих коліс торцевими різцевими головками з додатковим зміщенням заготовки [18] (рис. 2).

Зв'яжемо систему координат $x_1y_1z_1$ з заготовкою наступним чином: вісь z_1 направимо вздовж осі обертання зубчастого колеса, площина x_1z_1 лежатиме у середньому (вихідному) торцевому перерізі зубчастого колеса, площина z_1y_1 ділитиме западину зуба порівну

і лежатиме відносно осі обертання різцевої головки на відстані R .

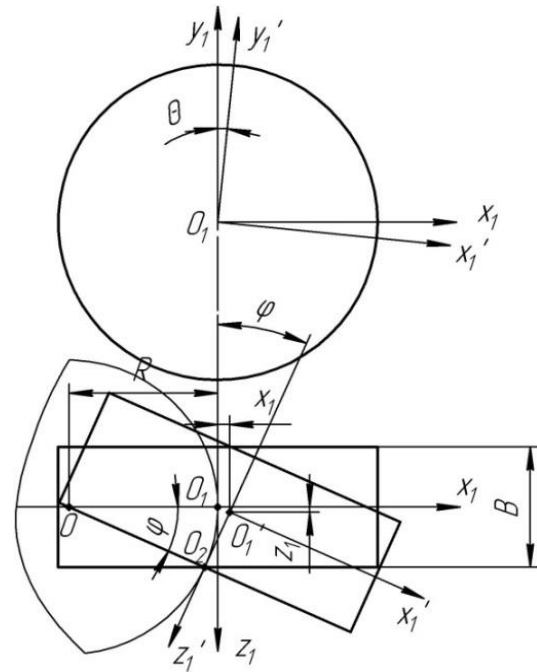


Рис. 2 - Схема формоутворення

В результаті повороту різцевої головки на кут φ , який визначено у роботі [18], система координат пов'язана з зубчастим колесом повернеться на кут φ навколо точки O_2 таким чином, що система координат заготовки займе нове положення, де її центр O_1' переміститься відносно початкового положення O_1 на величину x_1 та z_1 .

Для утворення лінії зміщення вихідного контуру [16] необхідно, щоб заготовка повернулася навколо своєї осі обертання O_1Z_1 на кут θ , який визначається:

$$\theta = \frac{R - R \cos \varphi}{r} \quad (5)$$

де r – дільний діаметр.

Наведений аналіз формоутворюючих рухів заготовки та різцевої головки дозволяють визначити положення інструментальної системи координат та площин різального леза у будь-який момент повороту різцевої головки та переміщень заготовки. Для цього зупинимо заготовку, а всі формоутворюючі рухи надамо різцю торцевої головки (рис. 3). Введемо нерухому систему координат $x_0y_0z_0$ таким чином, що вісь y_0 співпадатиме з віссю обертання різцевої головки. Вісь x_0 співпадатиме з положенням осі заготовки x_0 у вихідному положенні (кут $\varphi = 0$), а площина x_0z_0 проходить через вісь обертання зубчастого колеса. Вісь z_0 буде лежати паралельно осі обертання зубчастого колеса z_1 у вихідному положенні при $\varphi = 0$ на відстані R .

При пороті різцевої головки на кут φ зубчасте колесо повернеться на кут θ (5). Відносний рух різця здійснює в осьовій площині різцевої головки навколо додаткової системи координат $x_2y_2z_2$, яка у середньому положенні при $\varphi = 0$ буде співпадати з інструментальною системою координат різального зуба.

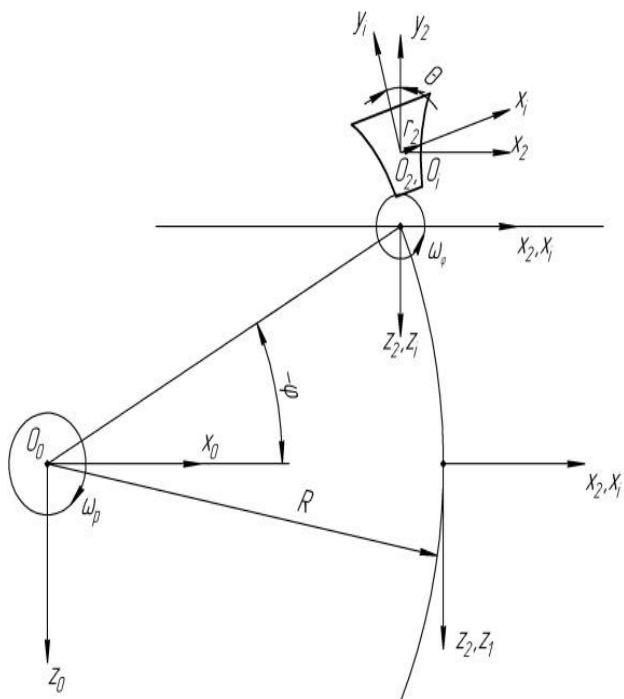


Рис. 3 - Відносний рух різця в нерухомій системі координат

Поворот різального зуба виконується навколо точки O_2 , яка співпадає з точкою O_1 інструментальної системи координат. Відповідно отримуємо формули переходу систем координат:

$$\begin{aligned} x_2 &= x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta \\ y_2 &= y_1 \cos \theta + x_1 \sin \theta \\ z_2 &= z_1 \end{aligned} \quad (6)$$

Окрім того при повороті різцевої головки система координат $x_2y_2z_2$, з якою пов'язана і система координат різця, повернеться на кут φ , відносно нерухомої системи координат $x_0y_0z_0$, таким чином, що вихідна інструментальна площина різця, завжди буде паралельною до середнього перерізу заготовки і відповідно отримуємо формули переходу систем координат:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_2 + R \cos \varphi \\ y_0 &= y_2 \\ z_0 &= R \sin \varphi + z_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Підставляючи формули (24) в (25) отримуємо:

$$\begin{aligned} x_0 &= x_1 \cos \theta - y_1 \sin \theta + R \cos \varphi \\ y_0 &= y_1 \cos \theta + x_1 \sin \theta \\ z_0 &= R \sin \varphi + z_1 \end{aligned} \quad (8)$$

За формулами переходу знайдемо положення векторів дотичних до зовнішньої, внутрішньої та верхньої різальних кромки, в залежності від кута повороту різцевої головки.

Для знаходження результуючого вектора швидкості різального леза розглянемо усі формоутворюючі рухи, які здійснює різець та заготовка (рис. 4).

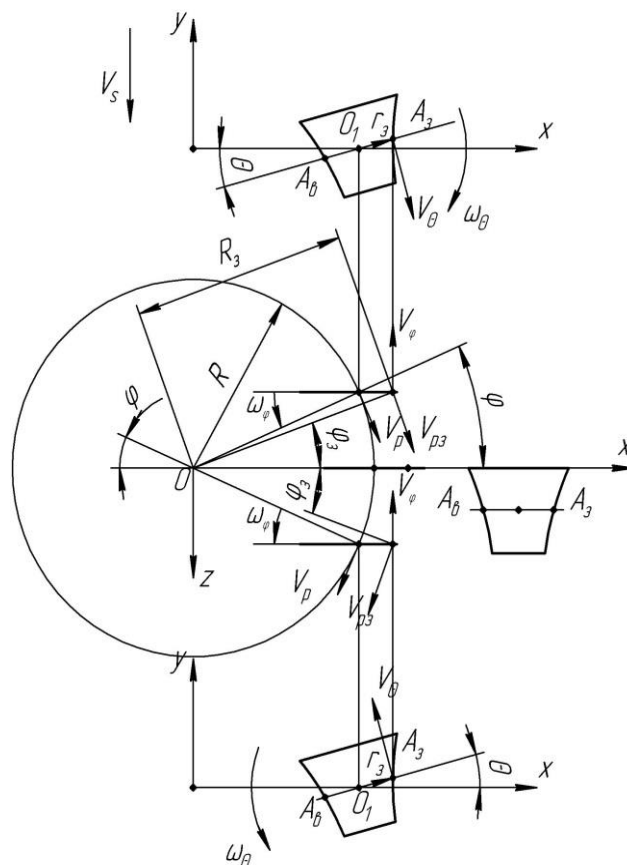


Рис. 4 - Відносні формоутворюючі рухи

Оскільки різець рухається по дузі кола радіуса R з кутовою швидкістю ω_p , то вектор швидкості різання в нерухомій системі координат точки A_3 зовнішньої різальної кромки буде дорівнювати:

$$\vec{V}_{p3} = \vec{\omega}_p \times \vec{R}_3 = \vec{i}(-\omega_p R_{3z}) + \vec{k}(\omega_p R_{3x}), \quad (9)$$

де R_3 – радіус обертання точки A_3 .

Так як при повороті різцевої головки на кут φ , заготовка також повертається на цей кут, то відповідно відносна кутова швидкість повороту різця буде дорівнювати по величині кутовій швидкості повороту різцевої головки, але протилежною за знаком, тому вектор лінійної швидкості цього повороту знайдемо як векторний добуток вектора кутової швидкості та радіус-вектора r_3 , проведеного від осі обертання O_1 до розглядуваної точки A_3 зовнішньої різальної кромки:

$$\vec{V}_{\varphi 3} = \vec{\omega}_p \times \vec{r}_3 = \vec{i}(\omega_p r_{3z}) + \vec{k}(-\omega_p r_{3x}). \quad (10)$$

При повороті різця навколо точки O_1 на кут θ , вектор лінійної швидкості також знайдемо як векторний добуток кутової швидкості повороту ω_θ та радіус-вектора r_3 за формулою:

$$\vec{V}_\theta = \vec{\omega}_\theta \times \vec{r}_3 = \vec{i}(\pm \omega_\theta r_{3z}) + \vec{j}(\mp \omega_\theta r_{3x}). \quad (11)$$

Величину вектора кутової швидкості повороту на кут θ можна знайти диференціюванням рівняння (5):

$$\omega_{\theta} = \frac{d\theta}{d\varphi} = \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{R - R \cos \varphi}{r} \right) = \frac{R}{r} \sin \varphi \omega_p. \quad (12)$$

Слід відмітити, що вектор кутової швидкості ω_{θ} буде змінювати свій знак в залежності від положення різця відносно заготовки. При врізанні різця вектор кутової швидкості буде направлений протилежно осі z_0 , а його величина буде зменшуватись при наближенні до середнього перерізу. В середньому перерізі він дорівнює нулю і при переміщенні різця від середнього перерізу до його виходу із заготовки величина вектора кутової швидкості ω_{θ} буде збільшуватись, а його напрямком буде співпадати з напрямком осі z_0 .

Вектор швидкості радіальної подачі V_s буде дорівнювати:

$$\vec{V}_s = -\vec{j}(Sn), \quad (13)$$

де S – подача на оберт, мм/об;
 n – частота обертання, об/хв.

Вектор швидкості результуючого руху буде дорівнювати сумі всіх векторів швидкостей формують рухів різця відносно заготовки, тому для зовнішньої різальної кромки він визначається за формулою:

$$\vec{V}_{e3} = \begin{Bmatrix} -\omega_p R_{z_z} + \omega_p r_{z_z} \pm \omega_{\theta} r_{z_z} \\ \mp \omega_{\theta} r_{z_x} - Sn \\ \omega_p R_{z_x} - \omega_p r_{z_x} \end{Bmatrix} \quad (14)$$

Остаточо, підставляючи у рівняння складові кутових швидкостей та проєкцій радіус векторів на відповідні осі координат отримуємо вектор результуючої швидкості для точки на зовнішній різальній кромці:

$$\vec{V}_{e3} = \begin{Bmatrix} -\omega_p z_{03} + \omega_p z_{23} \pm \frac{R}{r} \sin \varphi \omega_p z_{23} \\ \mp \frac{R}{r} \sin \varphi \omega_p x_{23} - 2\pi S \omega_p \\ \omega_p x_{03} - \omega_p x_{23} \end{Bmatrix}. \quad (15)$$

Для внутрішньої різальної кромки вектор результуючої швидкості знаходиться аналогічно зовнішньому, але проєкції радіус-векторів на осі координат та радіус обертання точки A_b матимуть інші значення.

Отримавши значення інструментальних нормальних кутів різальних кромки інструменту та визначивши кут τ_n між інструментальною та кінематичною площинами різання, можна знайти величини кінематичних нормальних передніх і задніх кутів вздовж різальних кромки інструменту та при різних його положеннях.

Результати досліджень геометричних параметрів різальної частини в процесі нарізання. Оброблюючи аромні зубчасті колеса на верстатах з ЧПК (рис. 4), нарізують колеса евольвентного профілю в будь-якому торцевому перерізі. При цьому в залежності від положення інструмента (від врізання до виходу різця) та вздовж різальної кромки для випуклої та ввігнутої поверхонь зуба змінюються кінематичні параметри інструмента.

Перш за все ця зміна залежить від кута τ_n між інструментальною та кінематичною площинами різан-

ня, який в процесі нарізання зубчастого колеса по різні сторони від середнього торцевого перерізу колеса та для випуклої та ввігнутої сторін нарізаного зуба приймає протилежні значення (плюс–мінус). В середньому перерізі інструментальна і кінематична площини різання співпадають, тому кут $\tau_n = 0$ і відповідно кінематичні нормальні кути будуть дорівнювати інструментальним.

По-друге зміна кутів вздовж різальної кромки для фасонного профілю інструмента залежить від кута в плані та радіуса обертання розглядуваної точки на різальній кромці.

Для прикладу, за виведеними залежностями визначимо зміну переднього та заднього кутів вздовж зовнішньої, внутрішньої та вершинної різальних кромки в процесі нарізання торцевою різцевою головкою радіуса $R = 120$ мм зубчастого колеса модулем $m = 4$ мм, кількості зубів $z = 22$, ширина $B = 20$ мм, значення інструментальних кутів становлять: передній вершинний кут $\gamma_{\text{вер}} = 0$ та задній вершинний $\alpha_{\text{вер}} = 12^\circ$.

На рис. 5 показано зміну передніх та задніх кутів (в градусах) під час різання для трьох положень різця - в момент врізання (а), в середньому перерізі (б) та при виході його із заготовки (в).

Як показали розрахунки (рис. 5, б), кінематичні передні та задні кути в середньому перерізі відповідають інструментальним, заданими на вершинній різальній кромці, оскільки кут $\tau_n = 0$. Задні кути на бокових різальних кромках в середньому положенні інструмента не відповідають вершинному $\alpha_{\text{вер}} = 12^\circ$, оскільки залежать від кута в плані і біля вершинної різальної кромки мають невеликі значення.

Передні кінематичні кути зовнішньої бокової різальної кромки приймають протилежні значення: при врізанні – позитивні (див. рис. 5, а), а при виході із заготовки – негативні (див. рис. 5, в). Для внутрішньої різальної кромки характер зміни передніх кутів протилежний. Вздовж різальних кромки передні кути змінюються лише за рахунок різниці радіусів обертання точок профілю інструмента. На вершинній різальній кромці передній кут змінює своє значення з плюса на мінус.

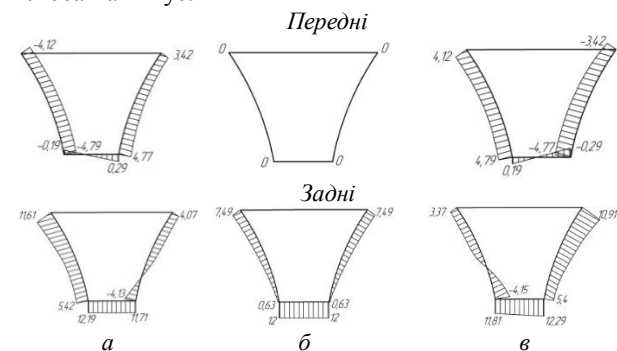


Рис. 5 - Характер зміни передніх та задніх кутів в процесі різання вздовж різальних кромки (а – в момент врізання; б – в центральному перерізі; в – при виході із заготовки)

Характер зміни задніх кінематичних кутів аналогічний переднім, проте, оскільки вершинний задній інструментальний кут не дорівнює нулю, на бокових різальних кромках його значення загалом позитивне. Однак при вершині різця кінематичний задній кут

приймає негативні значення для зовнішньої різальної кромки в процесі врізання, а для внутрішньої - при виході різця із заготовки.

Це пояснюється тим, що задній боковий інструментальний кут при вершині різця становить невелике значення, а при повороті різцевої головки та відхиленні кінематичної площини різання від інструментальної на кут τ_n , задній кінематичний кут на бокових різальних кромках при вершині різця може приймати негативне значення. При таких значення задніх кінематичних кутів інструмент буде непрацездатним. Тому для проектування та створення працездатного інструменту з кращими геометричними параметрами різальної частини необхідно внести конструктивні особливості при проектуванні такого інструменту.

Конструктивне забезпечення працездатного інструменту. Так як при конструкції різця з зовнішніми та внутрішніми фасонними різальними кромками та способом тангенційного затилування отримати задовільні задні кути на різальних кромках інструменту в процесі різання інколи неможливо при такій схемі обробки, тому необхідно розділити формування зовнішньої та внутрішньої западини зуба на два окремих різця, які матимуть бокову фасонну різальну кромку та вершинну. Ця конструкція інструменту дає змогу застосувати для створення задніх поверхонь різців затилування під кутом [20], при якому поступальний рух різальної кромки здійснюється під деяким кутом τ . Цей спосіб затилування дозволяє отримати в двох точках різальних кромки, в нашому випадку на вершинній та боковій різальних кромках, заданих значень інструментальних нормальних кутів при відповідному значенню кута затилування, який визначається за формулою [19]:

$$\tan \tau = \frac{R_1 \tan \alpha_{1N} \sin \varphi_2 - R_2 \tan \alpha_{2N} \sin \varphi_1}{R_2 \tan \alpha_{2N} \cos \varphi_1 - R_1 \tan \alpha_{1N} \cos \varphi_2}, \quad (16)$$

де α_{1N} і α_{2N} – нормальні інструментальні кути у вибраних точках різальної кромки;

R_1 та R_2 – радіуси обергання вибраних точок;

φ_1 та φ_2 – кути в плані в точках на різальній кромці.

Оскільки при даному способі нарізання арокних коліс кут τ_n між інструментальною та кінематичною площинами різання буде змінювати своє значення від негативного до позитивного в залежності від кута повороту різцевої головки при формуванні кожної сторони западини зуба, а мінімальне допустиме значення задніх кутів в процесі різання має становити 2-3°, тому при виборі інструментальних кутів у вибраних точках різальної кромки слід керуватись наступною формулою:

$$\alpha_{Ni} = 2 \div 3^\circ + |\tau_n|.$$

Для розглядуваного прикладу для зовнішньої різальної кромки значення кута між інструментальною та кінематичною площинами різання становить $\tau_{n3} = 4,77^\circ$, а для внутрішньої різальної кромки - $\tau_{n3} = 4,79^\circ$. Тому для забезпечення задовільних значень кутів 2-3° в процесі різання слід прийняти наступні значення бокових інструментальних нормальних кутів для зовнішньої та внутрішньої різальних кромки: $\alpha_{N3} = \alpha_{N6} =$

7° . На вершинній різальній кромці при $\tau_{n6} = 0,29^\circ$ приймаємо $\alpha_{N6} = 8^\circ$.

За формулою (16) для точки вершинної різальної кромки при $\alpha_{N6} = 8^\circ$, $R_1 = 120$ мм, $\varphi_1 = 90^\circ$ та для точки на боковій зовнішній різальній кромці при вершині різця при $\alpha_{N3} = 7^\circ$, $R_2 = 122,15$ мм, $\varphi_2 = 2,98^\circ$ кут затилування буде дорівнювати $\tau = 71^\circ$.

Висновки. Розроблена методика визначення кінематичних геометричних параметрів різців головки при нарізанні точних арокних зубчастих коліс з додатковими зміненнями заготовки та різцевої головки на верстатах з ЧПК, яка дозволяє розрахувати та проаналізувати геометричні параметри такого інструменту в процесі роботи і оцінити його працездатність. Як приклад, наведено застосування цієї методики для гострозаточених ножів фрези з нульовим переднім кутом. Забезпечення більш стабільних кутів на різальній кромці може бути забезпечено створенням інших форм передніх та задніх поверхонь, та їх розташування під визначеними в відповідності до отриманих залежностей інструментальними кутами.

Список літератури

1. Равская Н. С. Технологические особенности изготовления арокных зубчатых передач / Н. С. Равская, А. А. Клочко, С. П. Воробьев // Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», серія Машинобудування. – 2015. - № 72. - С. 181-189.
2. Беляев А. И. Результаты испытаний арокных зубьев колес на износ и сопротивление усталости при изгибе / А. И. Беляев, А. И. Сирицын, Д. А. Сирицын. // Вестник машиностроения. – 1997. – № 1. – С. 6-8.
3. Dai Y. Study on a Cylindrical Gear with Curved Tooth Traces / Y. Dai, Y. Ariga, S. Nagata // Proceedings of the Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms. – 1999. - V. 6. - P. 2337-2342.
4. Tseng R.-T. Contact Characteristics of Cylindrical Gears With Curvilinear Shaped Teeth / R.-T. Tseng, C.-B. Tsay // Mech. Mach. Theory. – 2004. – V. 39. - P. 905-919.
5. Беляев А. И. Особенности изготовления и применения высокоточных арокных тяговых зубчатых передач / А. И. Беляев, А. И. Сирицын, Д. А. Сирицын. // Вестник машиностроения. – 1997. – № 1. – С. 3-6.
6. Добротворский С. С. Перспективы применения передовых технологий в зубообработке конических колес с круговыми зубьями / С. С. Добротворский, А. А. Клочко, Е. В. Басова и др. // Автоматизированные технологии и производства. – Магнитогорск: МГТУ им. Г. И. Носова, 2016. – №2 (12) – С. 10-14
7. Равська Н. С. Радіус кривизни зуба циліндричного арокного зубчастого колеса / Н. С. Равська, О. О. Клочко, С. П. Воробійов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. – 2016. - № 38. – С. 55-60.
8. Arafa H. A. C-Gears: a Novel Design Paradigm for Rotorcraft Transmissions / H. A. Arafa, M. Bedewy // Presented at AHS/AIAA/SAE/RAeS 2010 International Powered Lift Conference (IPLC), Philadelphia, PA, USA, 2010.
9. Маликов А. А. Конструктивно-технологические преимущества цилиндрических колес с арокными зубьями // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2008. – № 1. - С. 198-205.
10. Arafa H. A. C-Gears: Geometry and Machining // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. – 2005. - V. 219. - P. 709-726.
11. Arafa H. A. Manufacturability and viability of different c-gear types: a comparative study / H. A. Arafa, M Bedewy // Presented at Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. Chicago, IL, USA, 2012.
12. Aiping S. Involute arc cylindrical gear and its mesh characteristics / S. Aiping, Y. Hong, T. Wencheng, N. Zhonghua, L. Luyang // China Mechanical Engineering. – 2006. – V. 9 (18). - P. 1888-1892.
13. Xuegang Z. Desing, meshing characteristics and stress analysis of cylindrical gears with curvilinear tooth profile / Z. Xuegang, X. Yongchun, T. Xingqiang // Transactions of FAMENA. – 2016. - Vol. 40. – P. 27-44.

14. Sonoda K. Design and Manufacture of New Circular-Arc Tooth-Trace Gears / K. Sonoda, K. Takenouchi, S. Hashimura // Presented at The 3rd International Conference on Design Engineering and Science. Pilsen, Czech Republic, 2014.
15. Плахтин В. Д. Параметры пальцевой фрезы и станочного зацепления при изготовлении зубчатых колес с арочными зубьями / В. Д. Плахтин, А. П. Давыдов, А. Н. Паршин // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 95-102.
16. Виноградов А. Н. Эвольвентные арочные передачи / А. Н. Виноградов, А. П. Давыдов, С. И. Липатов и [др.] // Межотраслевой альманах ДСР. - 2011. – № 31. – С. 42–45.
17. Пат. 103983 Україна, МПК В23F 21/22 (2006.01), В23F 9/00 Різцева головка для нарізання циліндричних зубчастих коліс з криволінійними по довжині зубцями / Польовий В.І. - Заяв. 05.03.2013; Опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12.
18. Воробйов С. П. Формоутворення циліндричних арочних зубчастих коліс з евольвентним профілем різними способами // Вісник кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2016. – Вип. 2 (97), ч.1. – С. 52–56.
19. Равська Н. С. Методика аналітичного визначення геометричних параметрів різальної частини інструменту / Н. С. Равська, Т. П. Ніколасенко, Д. О. Сільчин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2009. – Вип. 6 (154). – С. 118–129.
20. Родін П. Р. Основы проектирования режущих инструментов: учеб. – К.: Выща шк., 1990. – 424 с.
- Nadjnist' instrumentu ta optimizacija tehnologichnih system [Reliability of the instrument and optimization of technological systems]. Kramators'k, 2016, no. 38, pp. 55–60.
8. Arafa, H. A., Bedewy, M. C-Gears: a Novel Design Paradigm for Rotorcraft Transmissions. *International Powered Lift Conference (IPLC)*. Philadelphia, PA, USA, 2010, vol. 1, pp. 93-100.
9. Malikov, A. A. Konstruktivno-tehnologicheskie preimushhestva cilindricheskikh koles s arochnymi zub'jami [Structural and technological advantages of cylindrical wheels with arched teeth]. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki*. 2008, no. 1, pp. 198-205.
10. Arafa, H. A. (2005) C-Gears: Geometry and Machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering*. 2005, vol. 219, pp. 709-726.
11. Arafa, H. A., Bedewy, M. Manufacturability and viability of different c-gear types: a comparative study. *Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*. Chicago, IL, USA, 2012, vol. 5, pp. 381-391.
12. Aiping, S., Hong, Y., Wencheng, T., Zhonghua, N., Luyang, L. Involute arc cylindrical gear and its mesh characteristics. *China Mechanical Engineering*. 2006, vol. 9 (18), pp. 1888-1892.
13. Xuegang, Z., Yongchun, X., Xingqiang, T. Desing, meshing characteristics and stress analysis of cylindrical gears with curvilinear tooth profile. *Transactions of FAMENA*. 2016, vol. 40, pp. 27-44.
14. Sonoda, K., Takenouchi, K., Hashimura, S. Design and Manufacture of New Circular-Arc Tooth-Trace Gears. *The 3rd International Conference on Design Engineering and Science*. Pilsen, Czech Republic, 2014, vol. 1, pp. 49-52.
15. Plahin, V. D., Davydov, A. P., Parshin, A. N. Parametry pal'cevoj frezy i stanochnoho zaceplenija pri izgotovlenii zubchatyh koles s arochnymi zub'jami [Parameters of the pin mill and machine engagement in the manufacture of gears with arched teeth]. *Problemy mashinostroenija i avtomatizacii*. 2007, no. 4, pp. 95-102.
16. Vinogradov, A. N., Davydov, A. P., Lipatov, S. I., Margolit, R. B., Pankov, I. G., Parshin, A. N. Jevol'ventnye arochnye peredachi. *Mezhotraslevoj al'manah DSR*. 2011, no. 31, pp. 42-45.
17. Pol'ovij, V.I. Rізцева головка длja нарізання циліндричних зубчастих коліс з криволінійними по довжині зубцями [Cutting head for cutting cylindrical gears with crown-lengthened teeth], Patent UA no. 103983, 2013.
18. Vorobjov, S. P. Formoutvorennja cilindrichnih arochnih zubchastih kolis z evol'ventnim profilem rіznimi sposobami [Formation of cylindrical arched gears with an engraving profile in various ways.]. *Vіsник kremenčuc'kogo nacional'nogo universitetu imeni Mihajla Oстроgrads'kogo*. 2016, no. 2 (97), pp. 52-56.
19. Rav's'ka, N. S., Nikolacenko, T. P., Sil'chin, D. O. Metodika analitichnoho viznachennja geometrichnih parametriv rіzal'noї chastini instrumentu [Method of analytical determination of geometrical parameters of the cutting part of the instrument]. *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnichnoho universitetu. Serija: Mashinobuduvannja i mashinoznavstvo* [Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Machine Building and Machine Science]. Donetsk, 2009, no. 6 (154), pp. 118-129.
20. Rodin, P. R. (1990) *Osnovy proektirovanija rezhushchih instrumentov* [Basics of cutting tools design]. Kiev, Vyshha shk. Publ., 1990. 424 p..

Поступила (received) 18.05.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Визначення геометричних параметрів різців головки при нарізанні точних арочних зубчастих коліс / Н. С. Равська, В. В. Вовк, С. П. Воробйов, Є.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Х. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 26 (1248). – С. 31–38. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-004X.

Определение геометрических параметров резцов головки при нарезании точных арочных зубчатых колес / Н. С. Равская, В. В. Вовк, С. П. Воробьев, Е.В. Басова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – №26 (1248). – С. 31–38. – Библиогр.: 20 назв. – ISSN 2079-0023.

Research precision parameters for generating gear grinding bobbin wheel profile of gerotor / N. Ravskaya, V. Vovk, S. Vorobiev, E. Basova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 26 (1248). – P. 31–38. – Bibliogr.: 20. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Равська Наталія Сергіївна - доктор технічних наук, професор кафедри «Інтегровані технології машинобудування» Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, тел.: (067) 127-6198, (066) 228-1798; e-mail: nravska@ukr.net;

Равская Наталья Сергеевна - доктор технических наук, профессор кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, тел.: (067)127-6198, (066)228-1798; e-mail: nravska@ukr.net;

Ravskaya Natalia Sergeevna - Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Integrated Manufacturing Engineering" National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, tel.: (067) 127-6198, (066) 228-1798; E-mail: nravska@ukr.net;

Вовк В'ячеслав Володимирович - кандидат технічних наук, доцент кафедри «Інтегровані технології машинобудування» Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, тел.: (067)9767154; e-mail: 010479@ukr.net;

Вовк Вячеслав Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, тел.: (067)9767154; e-mail: 010479@ukr.net;

Vovk Vyacheslav Vladimirovich - Candidate of Technical Sciences., Assistant professor of the chair "Integrated Manufacturing Engineering" National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, tel. : (067) 9767154; E-mail: 010479@ukr.net;

Воробйов Сергій Петрович - аспірант кафедри «Інтегровані технології машинобудування» Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, тел. : (093) 742-6389; e-mail: vorobyov_sp@ukr.net;

Воробьев Сергей Петрович – аспирант кафедры «Интегрированные технологии машиностроения» Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, тел.: (093)742-6389; e-mail: vorobyov_sp@ukr.net;

Vorobiev Sergey Petrovich - post-graduate student of the chair "Integrated Manufacturing Engineering" National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, tel. : (093) 742-6389; E-mail: vorobyov_sp@ukr.net;

Басова Євгенія Володимирівна – канд. технічних наук, доцент кафедри технологія машинобудування і металорізальні верстати Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет», м. Харків; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivashchenko@mail.ru;

Басова Евгения Владимировна – канд. технических наук, доцент кафедры технология машиностроения и металлорежущие станки Национального технического университета «Харьковский политехнический университет», г. Харьков; тел.: (057) 707-66-25; e-mail: : evgeniya.ivashchenko@mail.ru;

Basova Evgenia Vladimirovna- Candidate of Technical Sciences, Docent of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», tel.: (057)-720-66-25; e-mail: evgeniya.ivashchenko@mail.ru.