

Вихідна інструментальна поверхня модульних пальцевих фрез на базі однополосного гіперболоїда для виготовлення зубчастих евольвентних коліс

О.О. Клочко¹ • О.А. Охріменко² • М.В. Шаповалов³

Received: 3 November 2021 / Accepted: 24 November 2021

Анотація. В даній роботі запропоновано методику визначення параметрів однополосного гіперболоїду в якості вихідних інструментальних поверхонь пальцевих модульних фрез призначених для обробки крупномодульних зубчастих коліс та розрахункові залежності для визначення параметрів гіперболоїду при яких відхилення його криволінійного осьового профілю буде мінімальне від кривої евольвенти, що є важливо при проектуванні таких інструментів. Розраховано та досліджено вплив модуля зубчастого колеса та числа зубів і теоретичні відхилення від евольвентного профілю, яких можна досягти при такому способі заміни вихідної інструментальної поверхні. Наведено рекомендації з проектування та запропоновано конструкцію схем різання та різальної частини пальцевої фрези на базі гіперболоїду при їх реалізації непереточуваними твердосплавними пластинами прямокутної форми, що значно покращує технологічність виготовлення таких фрез і знижує їх вартість. Визначені переваги та недоліки для таких інструментів, що виконані на базі гіперболоїду в порівнянні з інструментами типових конструкцій.

Ключові слова: різальний інструмент, зубчасті колеса, виготовлення зубчастих коліс, пальцеві модульні фрези.

Вступ

Зубчасті циліндричні колеса на даний час є найпоширенішими елементами машин і механізмів при передачі обертального руху. Значне поширення отримали евольвентні зубчасті колеса в механізмах гірничодобувного й переробного устаткування, транспортних, енергетичних систем і інших великогабаритних машин, приводи яких містять у собі крупномодульні зубчасті передачі, модулем $m = 12...65$ мм, діаметри зубчастого вінця до 12000 мм, ширина зубчастого вінця 1200 мм [1].

Так як, виготовлення таких крупногабаритних зубчастих вінців є доволі затратним і коли в процесі експлуатації ці колеса зношуються то широко застосовуються операції відновлення робочої поверхні, ремонту таких зубчастих коліс. Найбільш поширеним є процес наплавлення зношеної частини з подальшою його обробкою різанням і відновленням геометричних

параметрів западини зубчастого колеса. Однією з трудомістких операцій є зубофрезерування після наплавлення шару матеріалу, при якому інструмент знімає шар матеріалу, який характеризується неоднорідністю твердості та різними неметалічними вклученнями на поверхні, які є результатом операції наплавлення. За звичай при таких операціях використовують модульні пальцеві чи дискові фрези у яких криволінійна різальна кромка, яка належить вихідній інструментальній поверхні, що утворена обертанням евольвентної кривої навколо відповідної осі заміняється прямолінійною. Це значно спрощує конструкцію такого інструменту і дозволяє використовувати нетереточувани твердосплавні пластини. Проте нерівномірний припуск, що формується на поверхні таких зубчастих вінців значно ускладнює подальшу чистову обробку, а використання спеціально спрофільованого інструменту значно збільшує витрати на операцію відновлення таких зубчастих коліс. Тому виникає задача створення такого інструменту, який був би технологічний у своєму виготовленні, допускав виконання профілюючої частини різальної кромки на базі стандартних форм непереточуваних твердосплавних пластин прямолінійної форми і при цьому формував рівномірний припуск під подальшу обробку.

✉ О.О. Клочко
alexhobs77@gmail.com

¹ НТУ "ХПІ", м. Харків, Україна

² КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

³ Донбаська державна машинобудівна академія,
м. Краматорськ, Україна

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відповідно до класифікації твердосплавних модульних фрез наведено в [2], де форма робочої частини повинна відповідати вихідній інструментальній поверхні фасонної поверхні обертання, що утворена евольвентною кривою. Проте виготовлення такого криволінійного профілю викликає складнощі і його виконують у вигляді ломаної лінії. Така заміна дещо змінює припуск під подальшу обробку таких зубчастих коліс, проте робить такі фрези більш технологічніші у своєму виготовленні. До недоліків слід віднести, що такі фрези виготовляються напаяними без використання непереточуваних твердосплавних пластин. Фірма Ingersoll Werke GmbH [3] пропонує гострозаточені модульні пальцеві фрези, що виготовлені, як твердосплавні змінні насадки з криволінійною формою різальної кромки зуба (Schlichtfräser Modul 12; $z = 128$ Gear finish end mill module) [3]. Фірма Sandvik Coromant [4] пропонує конструкції дискових модульних фрез зі спеціальними пластинами криволінійної форми CoroMill 172, та спеціальні обкатні фрези з непереточуваними твердосплавними пластинами прямолінійної форми CoroMill 170, про те за рахунок використання рухів обкату при обробці однієї западини колеса і подальшим рухом поділу на один зуб для обробки іншої западини такий інструмент малопродуктивний. Тому розробка конструкцій таких пальцевих фрез, які використовують стандартні непереточувані твердосплавні пластини прямолінійної форми для обробки зубчастих вінців крупномодульних коліс є актуальною задачею. Цю задачу можна вирішити спробувавши в якості вихідної інструментальної поверхні таких фрез використовувати лінійчасті поверхні твірні, яких є прямою лінією і може бути утворена різальною кромкою непереточуваною твердосплавною пластиною прямолінійної форми і в осьову перерізі такі поверхні мають криволінійну форму, яка наближається до евольвентної кривої, одним із таких є поверхня однополосного гіперboloїда (рис. 1).

Метою роботи є розробка методика та визначення параметрів однополосного гіперboloїда осьовий переріз якого мав би мінімальні відхилення від еволь-

венти в межах робочої частини цієї ділянки. На базі даної методики створення конструкцій пальцевих модульних фрез з непереточуваними твердосплавними пластинами прямолінійного профілю.

Методика реалізації

Вирішення даної задачі полягає в наступному, що потрібно так розмістити уявний гіперboloїд, який реалізує вихідну інструментальну поверхню пальцевої модульної фрези таким чином, що криволінійний осьовий профіль цієї фігури мав мінімальне відхилення від евольвентного профілю колеса в межах робочої ділянки цього колеса. Для цього пропонується наступна розрахункова схема визначення параметрів вихідної інструментальної поверхні пальцевої модульної фрези зі змінними параметрами, які потрібно визначити (рис. 2), де гіперboloїд 1 розташовується так щоб його вісь співпала з віссю западини зубчастого колеса 2.

Відповідно до схеми наведеної на рис. 2 основними вхідними параметрами є: параметри зубчастого колеса: m – модуль, Z – кількість зубів колеса, a_n – кут вихідного контуру зубчастого колеса, x – коефіцієнт зміщення, ΔS – величина зменшення товщини зуба колеса на ділільному діаметрі, звідки розрахунковими параметрами профілю зуба колеса є: r_a – діаметр вершин зубів колеса, r_{akt} – значення радіуса кінцевої точки евольвенти, що потім переходить в перехідну криву зуба, r_d – ділільний радіус колеса, S_n – товщина зуба на ділільному колі, r_d , r_f – радіус западин колеса. Розрахункові параметри ВІП пальцевої фрези є (рис. 2): a – радіус горловини гіперboloїда, η – кут нахилу твірної гіперboloїда до його осі, c_y – величина зміщення площини розташування кола горловини гіперboloїда від осі зубчастого колеса.

Основна задача полягає у визначенні таких оптимальних параметрів ВІП фрези: a , η , c_y для яких відхилення кривої осьового перерізу ВІП фрези було би мінімальне на ділянці профілю зуба, що обмежена значеннями радіусів $r_{akt} \dots r_a$, які визначають профіль евольвентної ділянки колеса.

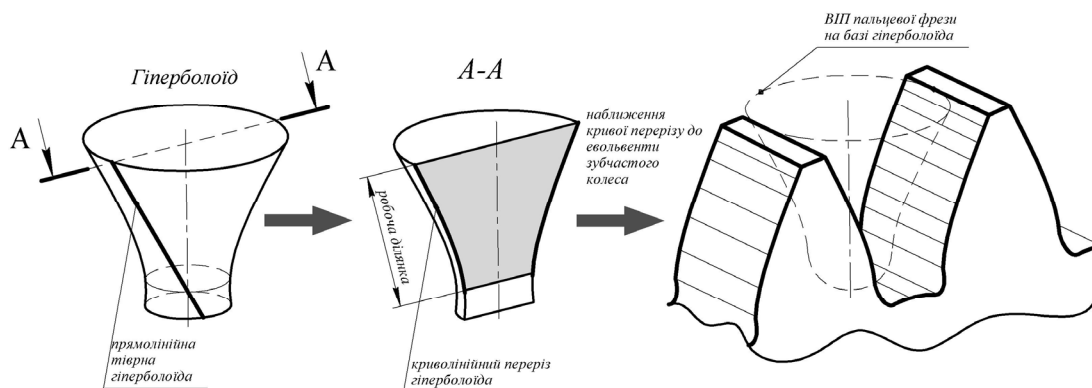


Рис. 1. Утворення ВІП пальцевої модульної фрези на базі гіперboloїда

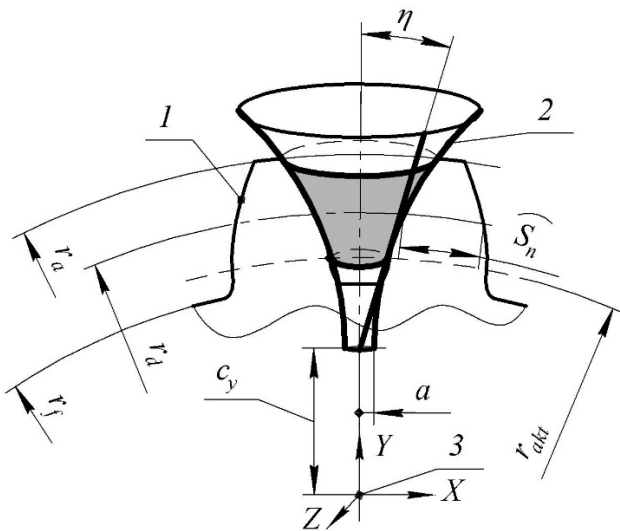


Рис. 2. Розрахункова схема визначення параметрів ВІП пальцевої фрези на базі гіперболоїда: 1 – зубчасте колесо, 2 – поверхня гіперболоїда, 3 – вісь колеса

Для визначення заданих параметрів спочатку необхідно записати рівняння евольвентної кривої та рівняння перехідної кривої зуба колеса, що обмежує евольвентну криву для цього використовуємо залежності описані в [5, 6]:

– евольвентна крива;

$$\begin{aligned} w &= (0,5\pi m - 2mxtg\alpha_n + \Delta S)/(2r_d); \\ \Theta &= tg\alpha_n - \alpha_n; w_0 = w - \Theta; \\ w_y &= w_0 + tg(\arccos(r_b / r_i)) - \arccos(r_b / r_i); \\ x_e &= r_i \sin(w_y); y_e = r_i \cos(w_y); \end{aligned} \quad (1)$$

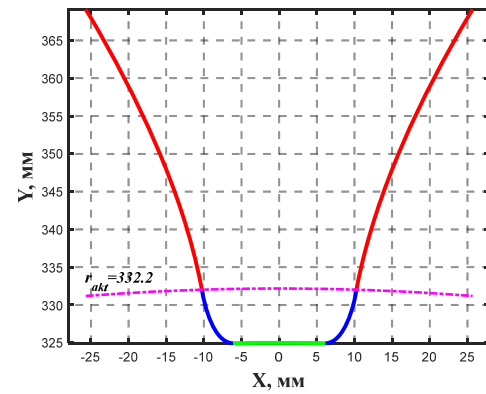
де: x_e, y_e – координати точок кривої евольвенти зуба колеса, r_b – радіус основного кола колеса, r_i – радіус точки, що розглядається, який змінюється в межах $r_{akt} \dots r_a$.

– перехідна крива визначається, як крива лінія що утворена рєсчним інструментом по схемі формоутворення кочення початкової прямої по початковому колу і визначається, як траєкторія руху вершини рейки, що формоутворює задане зубчасте колесо [5, 6]:

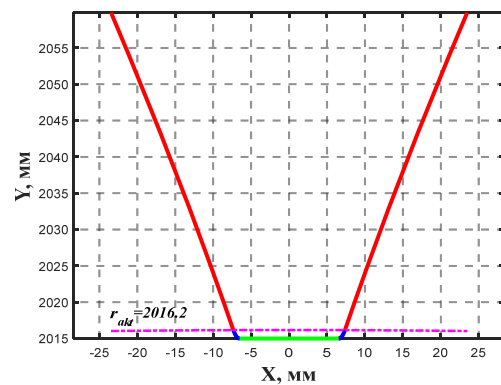
$$\begin{aligned} Y_A &= -1.25m + xm; \\ X_A &= (0,5\pi m - 2mxtg\alpha_n + \Delta S) / 2 - (1.25m - xm)tg\alpha_n; \\ x_p &= (X_A + r_d t) \cos t - (Y_A + r_d) \sin t; \\ y_p &= (X_A + r_d t) \sin t + (Y_A + r_d) \cos t; \end{aligned} \quad (2)$$

де: x_p, y_p – координати перехідної кривої зуба колеса, t – кут повороту зубчастого колеса при формуванні перехідної кривої рєсчним інструментом.

Сумісне вирішення рівнянь (1) та (2) дає змогу визначити точку перетину кривої евольвенти (1) та перехідної кривої (2) і значення r_{akt} радіус кінцевої точки евольвенти (рис. 3).



a



б

Рис. 3. Профіль западини зубчастого колеса з радіусом кінцевої точки евольвенти $m = 20$, $\alpha_n = 20^\circ$, $x = 0$, $\Delta S = 0$: *a*) $Z = 35$, *б*) $Z = 204$

Рівняння гіперболоїда запишеться наступним чином відповідно до схеми рис. 2:

$$\begin{aligned} x_G &= a \cos t_1 + a \cdot u \sin t_1; \\ y_G &= c \cdot u + c_y; \\ z_G &= -a \sin t_1 + a \cdot u \cos t_1; \\ a / c &= tg\eta; \end{aligned} \quad (3)$$

де: x_G, y_G, z_G – координати точок поверхні гіперболоїда, u – параметр, що відповідає за положення точки на твірній гіперболоїда, t_1 – параметр, що відповідає за кутове положення твірної відносно осі гіперболоїда.

Для знаходження відхилень від евольвентного профілю необхідно записати рівняння осьового перерізу гіперболоїда, що описується рівнянням (3):

$$\begin{aligned} x_{G0} &= -a \sin(2arctg(u - \sqrt{u^2 + 1})) + \\ &+ a \cdot u \cos(2arctg(u - \sqrt{u^2 + 1})); \\ y_{G0} &= c \cdot u + c_y; \end{aligned} \quad (4)$$

де: x_{G0}, y_{G0} – координати точок кривої осьового перерізу гіперболоїда.

Задача зводиться до порівняння відхилень між точками x_e, y_e координати точок кривої евольвенти зуба колеса та x_{G0}, y_{G0} координатами точок кривої осевого перерізу гіперboloїда в межах робочої ділянки зуба колеса, яка описується радіусами $r_{akt} \dots r_a$ і знаходження таких параметрів поверхні гіперboloїду a, η, c_y – при яких відхилення двох кривих будуть мінімальні. При порівнянні двох профілів необхідно координати точок, що порівнюються приводити до положення коли вони знаходяться на одному радіусі для цього координати точок осевого перерізу гіперboloїду, що описуються рівнянням (4) і залежать від параметру u приводяться до радіуса розташування за наступною залежністю:

$$u = \frac{-2c \cdot c_y + \sqrt{4c^2 \cdot c_y^2 - 4(a^2 + c^2)(a^2 + c_y^2 + r_i^2)}}{2(a^2 + c^2)} \quad (5)$$

З використання програми автоматизації математичних розрахунків *MATLAB* та пакету прикладних програм *Optimization Toolbox* була вирішена задача знаходження таких параметрів поверхні гіперboloїду для яких максимальні значення відхилення точок кривої осевого перерізу гіперboloїду від евольвентної ділянки в межах робочої частини були б мінімальні, результати чисельних розрахунків наведено на рис. 4.

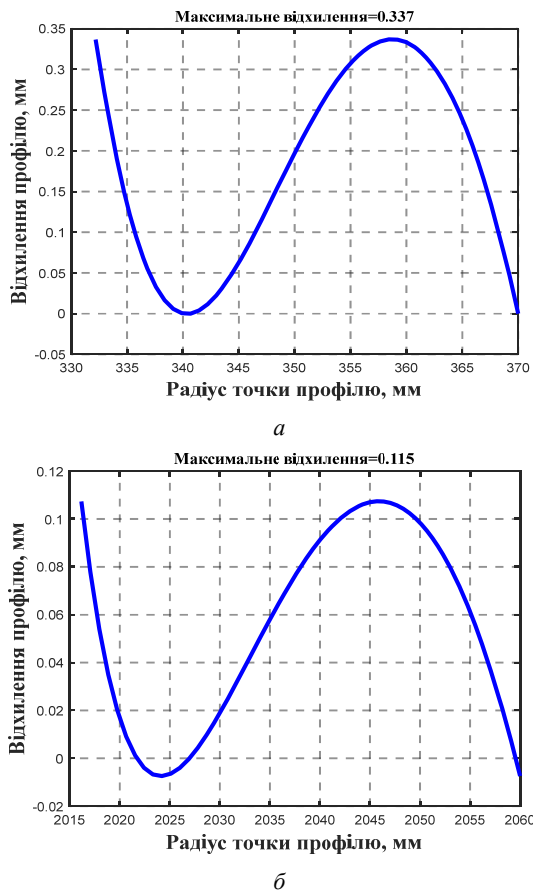


Рис. 4. Графік відхилення профілю осевого перерізу гіперboloїду від евольвенти зубчастого колеса з параметрами евольвенти $m = 20, a_n = 20^0, x = 0, \Delta S = 0$: а) $Z = 35$, б) $Z = 204$

Результати

З аналізу результатів чисельних розрахунків можна зробити висновок, що вихідна інструментальна поверхня таких фрез мають чисельні значення відхилень, які можуть бути придатні для використання такого інструменту для попереднього зубофрезерування, для $Z = 35$ максимальне відхилення від евольвенти становить $f_f = 0,337$ мм, для $Z = 204$ $f_f = 0,115$ мм і відповідно до [7] ця розрахункова точність може бути рекомендована для зубчастих коліс 8–9 ст. точності, що допустимо для попереднього зубонарізання зубчастих коліс, відхилення на графіках (рис. 4) з додатнім знаком направлено в тіло зуба колеса. Відповідні оптимальні значення параметрів поверхні гіперboloїда за даними розрахунків становили для $Z = 35$: $a = 10.492$, $\eta = 30.567^0$, $c_y = 329.413$, для $Z = 204$: $a = 5.01$, $\eta = 21.736^0$, $c_y = 2002.509$. Також були досліджені мінімальні відхилення від евольвентного профілю при такому способі заміни вихідної інструментальної поверхні на поверхню гіперboloїда, які можна досягнути при оптимізації параметрів гіперboloїда a, η, c_y (рис. 5) в залежності від модуля колеса m та кількості зубів Z .

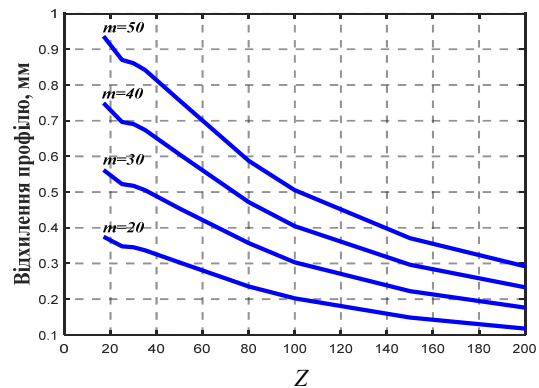
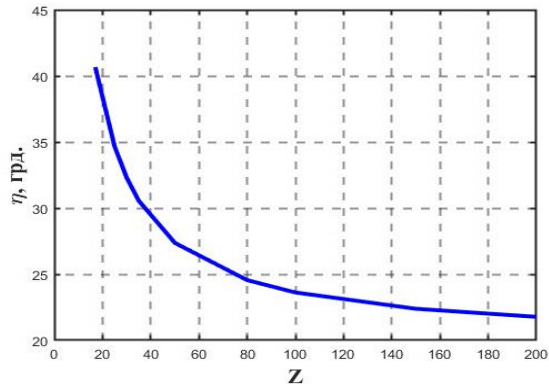


Рис. 5. Мінімальні відхилення від евольвентного профілю в від модуля колеса m та кількості зубів Z при формоутворення гіперboloїчною частиною фрези

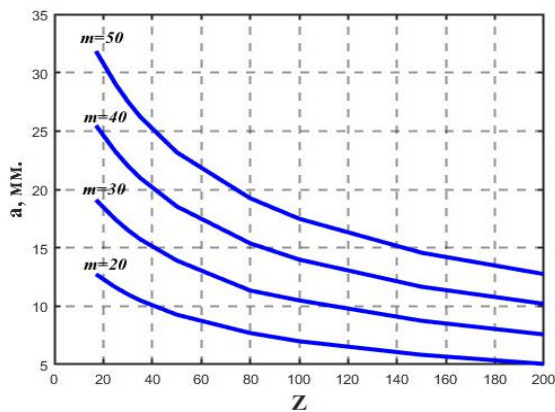
Відповідно до проведених розрахунків на рис. 5 було проаналізовано значення параметрів заміняючого гіперboloїда (рис. 6): a, η, c_y . Аналіз отриманих даних показав, що кут нахилу твірної η не змінюється від значень модулів для яких велось дослідження (рис.6, а), а інші значення параметрів a, c_y в залежності від модуля можуть бути отримані шляхом множення на лінійний масштабуючий коефіцієнт, що прямо пропорційний модулю зубчастого колеса (рис.6, б, в), що може бути пояснено тим, що значення модуля зубчастого колеса, це як раз і є масштабуючий коефіцієнт.

Відповідно до розрахунків було запропоновано конструкцію робочої частини пальцевих фрез на базі гіперboloїда, схема розташування різальних пластин показана на рис. 7 для коліс з кількістю зубів до 50 пропонується схема рис.7 а, де поверхня гіперboloїда реалізується пластинами прямокутної форми а перехідну

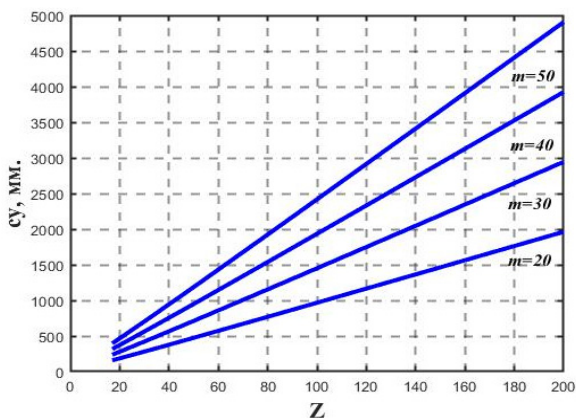
криву у ніжки зуба формує пластина округлої форми, для більшої кількості зубів колеса (рис.7, б) достатньо використання тільки пластин прямокутної форми, так як перехідна крива у ніжки зуба мала за своїми розмірами (рис.3, б) і для її формування достатньо використовувати тільки радіус округлення форми при вершині таких пластин.



a



б



в

Рис. 6. Параметри вихідної інструментальної поверхні гіперболоїда в залежності від модуля і кількості зубів колеса: а) кут нахилу твірної гіперболоїда, б) радіус горловини гіперболоїда, в) величина зміщення площини розташування кола горловини гіперболоїд

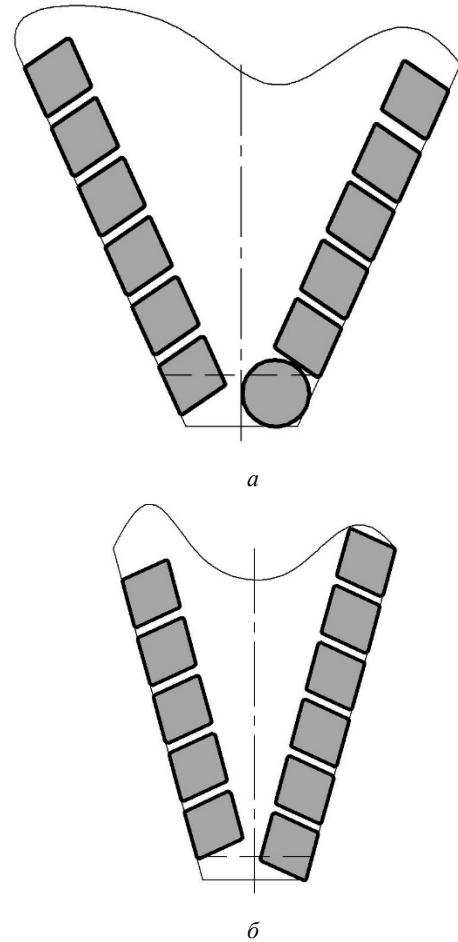


Рис. 7. Схеми розташування НТП при реалізації схеми різання пальцевої фрези на базі ВІП гіперболоїда: а) $Z \leq 50$; б) $Z > 50$

Можлива конструкція різальної частини інструменту при реалізації такого підходу проектування показана на рис. 8 де реалізовані запропоновані положення, а саме, різальні пластини розташовані у корпусі фрези, наступним чином, щоб їхні робочі різальні кромки лежали на твірній гіперболоїду 1 (рис. 8), що дає змогу реалізувати потрібне їх розташування.

До недоліків таких конструкцій слід зазначити, що для малозубих зубчастих коліс необхідно реалізувати індивідуальне розміщення пластин у корпусі опорні площини пластин не будуть співпадати, це пов'язано з тим що за рахунок більших значень кута нахилу твірної гіперболоїда η на яких розташовані різальні кромки пластини значно змінюється геометрія різальної частини вздовж різальної кромки і тому кожену пластину потрібно розміщувати індивідуально для великої кількості зубів нарізаємого колеса кут нахилу η має невеликі значення і тому корпуси таких фрез більш технологічніші у своєму виготовленні за рахунок того, що пластини можна розташовувати на одній опорній площині. Про те схема різання, параметри геометрії різальної частини, та навантаження для такого інструменту потребує подальших досліджень.

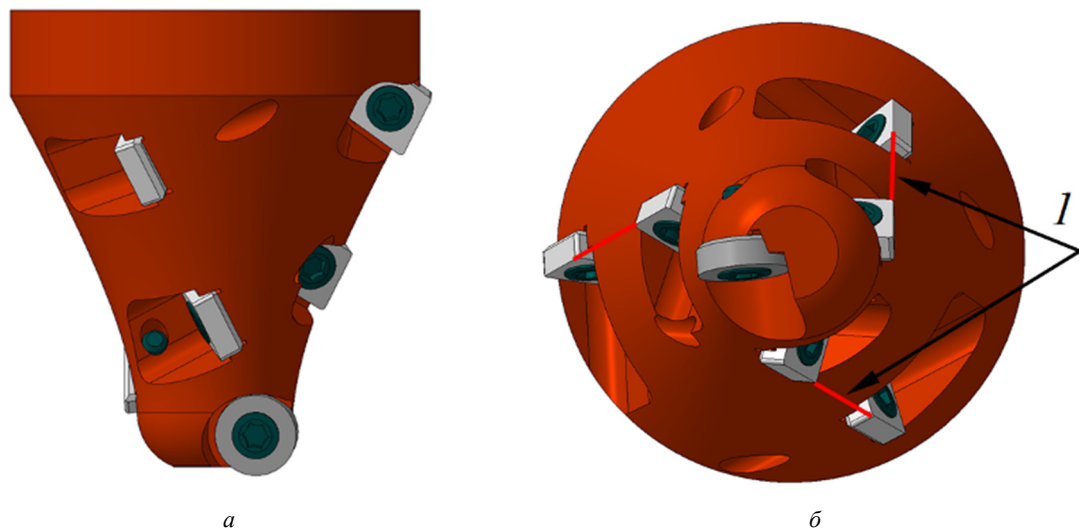


Рис. 8. Запропонована конструкція різальної частини пальцевої фрези на базі гіперболоїду для обробки зубчастого колеса з параметрами $m = 20$, $Z = 35$: 1 – твірні гіперболоїда

Висновки

В даній роботі розроблено методику визначення параметрів однополосного гіперболоїду осьовий переріз якого мав би мінімальні відхилення від евольвенти, що дає змогу його використовувати в якості вихідної інструментальної поверхні пальцевих модульних фрез

для крупномодульних зубчастих коліс. Досліджено вплив модуля зубчастого колеса та числа зубів на мінімальні відхилення які можна досягти при такому способі заміни вихідної інструментальної поверхні. Наведено рекомендації та запропоновано конструкцію схем різання та різальної частини пальцевої фрези на базі гіперболоїду при їх реалізації непереточуваних твердосплавних пластин прямокутної форми, що значно покращує технологічність виготовлення таких фрез.

References

- [1] O.O. Klochko, Tekhnologichni osnovi zabezpechennya produktivnosti, tochnosti ta yakosti zubofrezervuvannya krupnomodul'nikh kolis, shcho zagartovani. Disertatsiya na zdob. nauk. stup. d.t.n. 05.02.08, Kharkiv, 2014.
- [2] O.I. Moiseenko, L.E. Pavlov, S.I. Didenko, *Tverdospлавnye zuboreznye instrumenty*, Moscow: Mashinostroenie, 1977.
- [3] Ingersoll Werkzeuge GmbH. Rezhim dostupu <https://www.ingersoll-imc.de/produkte/kataloge/>
- [4] Sandvik Coromant Gear Milling Solutions. Rezhim dostupu <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/products/pages/tools.aspx>.
- [5] N.S. Rav'ska et al., *Osnovi formoutvorennya poverkhon' pri mekhanichnii obrobtsi*, Kyiv: Vid. SKD-Druk, 2013.
- [6] S.P. Radzevich, (Ed.). (2021). *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003126881>.
- [7] GOST 1643-81 Peredachi zubchatye tsilindricheskie. Dopuski.

Initial instrumental surface of modular millings on the basis of one-band hyperboloid for the manufacture of gear wheeled wheels

O. Klochko, O. Okhrimenko, M. Shapovalov

Abstract. This paper proposes a method for determining the parameters of a single-lane hyperboloid as the initial tool surfaces of finger modular mills for large-modular gears and design dependences for determining the parameters of a hyperboloid in which the deviation of its curvilinear axial profile will be minimal from the involute curve. The influence of the gear module and the number of teeth and the theoretical deviations from the involute profile that can be achieved with this method of replacing the original tool surface are calculated and studied. Recommendations for design are given and the design of schemes of cutting and cutting part of a finger mill on the basis of a hyperboloid at their realization by non-grinding carbide plates of rectangular form is offered that considerably improves manufacturability of production of such mills and reduces their cost. The advantages and disadvantages of such tools, which are made on the basis of hyperboloid in comparison with the tools of standard designs, are determined.

Keywords: cutting tools, gears, production of gears, the end milling cutter of gears.

Исходная инструментальная поверхность модульных пальцевых на базе однополосного гиперboloида для изготовления зубчатых эвольвентных колес

А.А. Клочко, А.А. Охрименко, М.В. Шаповалов

***Аннотация.** В данной работе предложена методика определения параметров однополосного гиперboloида в качестве исходных инструментальных поверхностей пальцевых модульных фрез предназначенных для обработки крупномодульных зубчатых колес и расчетные зависимости для определения параметров гиперboloида, при которых отклонение его криволинейного осевого профиля будет минимально от кривой эвольвенты, что важно при проектировании таких инструментов. Рассчитано и исследовано влияние модуля зубчатого колеса и числа зубов и теоретические отклонения от эвольвентного профиля, которые можно достичь при таком способе замены исходной инструментальной поверхности. Приведены рекомендации по проектированию и предложена конструкция схем резания и режущей части пальцевой фрезы на базе гиперboloида при их реализации неплетачиваемыми твердосплавными пластинами прямоугольной формы, что значительно улучшает технологичность изготовления таких фрез и снижает их стоимость. Определены преимущества и недостатки таких инструментов, которые выполнены на базе гиперboloида по сравнению с инструментами типовых конструкций.*

***Ключевые слова:** режущий инструмент, зубчатые колеса, производство зубчатых колес, пальцевые модульные фрезы.*