УДК 621.9.025.1 : 621.833.1

Я. М. Литвиняк, І. І. Юрчишин, Є. В. Гвоздик
Національний університет “Львівська політехніка”

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАРІЗАННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС СЕРЕДНІХ І ВЕЛИКИХ МОДУЛІВ ЧЕРВ’ЯЧНИМИ ФРЕЗАМИ, ОСНАЩЕНИХ ВСТАВНИМИ ТВЕРДОСПЛАВНИМИ ЗУБЦЯМИ ІЗ ЗМЕНШЕНИМ КУТОМ ПРОФІЛЮ

© Литвиняк Я. М., Юрчишин І. І., Гвоздик Є. В., 2019

Розроблено заходи із технологічного підвищення ефективності виробництва циліндричних зубчастих коліс середніх та великих модулів науково обґрунтованим удосконаленням процесу нарізання евольвентних зубців стандартного профілю із застосуванням збірних черв’ячних фрез із вставними твердосплавними зубцями, що мають зменшений кут профілю та забезпечують зниження технологічної собівартості виготовлення зубчастих коліс завдяки зростанню продуктивності зубофрезерних операцій, зменшенню витрат на експлуатацію та підтримання в працездатному стані черв’ячних фрез. Запропоновано для вставних зубців черв’ячних фрез використовувати стандартні трапецієподібні твердосплавні токарні твердосплавні пластини, що переважно призначені для точіння канавок або нарізання трапецієподібних різей. Співвідношення для розрахунку інструментальних та технологічних параметрів отримано на основі аналізу процесу формоутворення евольвентних зубців за допомогою вихідного інструментального контуру із зменшеним кутом профілю. Використання видозміненого відносно стандартного вихідного інструментального контуру супроводжується зменшенням початкового кола, зменшенням кроку зубців на вихідній рейці, зменшенням міжосьової відстані між віссю черв’ячної фрези та віссю нарізуваного циліндричного зубчастого колеса та іншим полюсом профілювання. Встановлено, що права та ліва евольвентні поверхні зубців профілюються окремо правою та лівою частинами вихідної інструментальної рейки. Розташування відносно площини симетрії зубця колеса правої та лівої частин вихідної інструментальної рейки розраховують за відповідною запропонованою залежністю. Показано, що перехідні криві зубців колеса та коло западин зубчастого колеса доцільно формувати окремим вставним твердосплавним трапецієподібним зубцем або групою зубців з отриманими заздалегідь фасками, розміщеними симетрично між правою і лівою частинами вихідної інструментальної рейки на витку черв’ячної фрези. Контроль точності зубчастих коліс запропоновано виконувати за товщиною зуба по хорді, яка знаходиться на відповідній висоті зуба від кола вершин зубців колеса. Номінальні значення цих параметрів розраховують за величиною зменшеного кута профілю. Показано, що товщина зуба по хорді прямо пропорційна до ширини зуба по дузі початкового кола та квадрата косинуса кута профілю на початковому колі зубчатого колеса.

Ключові слова : циліндричні зубчасті колеса, моделювання нарізання зубців, евольвентний профіль зубця, черв’ячні фрези збірні, вставні зубці з твердого сплаву.

There were proposed science-based cutting process of involute teeth of the standard section on the cylindrical gearwheels of big and middle modules. For these actions were proposed to use compound hobbing cutters with hard-alloy inserts. These teeth have

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

trapezoidal contour with diminished corner of profile. The realization of these propositions ensures the decrease of technological cost price of manufacture of gear-wheels at the expense of increase productivity on gear cuttings, the decrease expenses on exploitation and support of hobbing cutters in capable conditions. There were proposed, for hard-alloy inserts, to use standard trapezoidal turner's plates of hard alloy that meant for turning operation grooves or threads. The use of initial instrumental contour with diminished corner of profile provides for decrease of step and decrease of axle spacing between axis of hobbing cutter and axis of cutting cylindrical gear-wheel. The lateral involute surface of teeth is liable to profiling separately right and left parts of initial rack-type tool. The arrangement of initial rack-type tool relatively medium plane of gear-wheel of right and left parts are calculated in accordance with introduced formula. The forming of fillet curve and circle of deepening of gear-wheel is used by separate inserted trapezoidal tooth of hard alloy, which is located symmetrically between right and left part of initial rack-type tool on turn of hobbing cutter. The accuracy control of gear-wheels was proposed by tooth thickness along the chord, which is located at the corresponding height of tooth from headcircle of gear tooth. Nominal values of these parameters are calculated by value of diminished corner of profile. There were shown that tooth thickness along the chord is proportionate to tooth width along the arc of initial circle and squared cosine corner of profile on initial circle of gear-wheel.

Key words : spur gear, designs of teeth cutting, involutes profile of tooth, compound hobbing cutter, hard-alloy inserts

Постановка проблеми. Циліндричні зубчасті колеса належать до найпоширеніших елементів приводів машин і механізмів, що застосовуються для передавання руху обертання. Циліндричні зубчасті колеса виготовляють здебільшого із евольвентним профілем зубців, який дуже поширений завдяки суттєвим геометричним, кінематичним, експлуатаційним, виробничим особливостям, що забезпечили його тривале практичне застосування. Виробництво циліндричних зубчастих коліс ґрунтується на використанні в операціях формоутворення зубців процесу зубофрезерування, що реалізується на зубофрезерних верстатах за допомогою черв'ячних фрез. Процес нарізання черв'ячними фрезами циліндричних зубчастих коліс великих та середніх модулів супроводжується недостатньою для сучасних потреб продуктивністю, високою вартістю, відносно низькою стійкістю інструмента та значними експлуатаційними витратами на утримання його в працездатному стані. Вказані основні особливості процесу зубофрезерування фактично не впливають на його поширення при виготовленні циліндричних зубчастих коліс великих та середніх модулів, тому задачі обґрунтованого удосконалення черв'ячних фрез і процесу зубофрезерування належать до актуальних та важливих.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес зубонарізання черв'ячними фрезами завдяки точності, універсальності, відносно високій продуктивності, незважаючи на високу вартість інструментів, достатньо поширені в обробці прямозубих та косозубих зубчастих коліс. Зубофрезеруванням обробляють колеса великих та середніх модулів для досягнення 8–9 ступеня точності. Технологічну операцію зубофрезерування здебільшого здійснюють за 2–3 робочі проходи. Дослідженню процесу обробки черв'ячними фрезами присвячено значну кількість наукових робіт, в яких відображено вплив на нього геометричних, конструктивних параметрів інструментів, кінематичних параметрів процесу зубонарізання та режимів різання, матеріалів оброблюваної заготовки нарізуваного зубчастого колеса [1, 2].

Результати виконаних наукових досліджень використано у конструкціях сучасних черв'ячних фрез насамперед у суцільних черв'ячних фрезах, що мають найбільше практичне застосування. Удосконалення конструкції черв'ячних фрез загалом відображається у підвищенні їх точності до класів АА та ААА, у збільшенні кількості стружкових канавок (кількості різальних рейок), у модифікації профілю зубців, що дає змогу покращити шумові характеристики зубчастих передач, а також забезпечити раціональний розподіл припуску на бокових поверхнях зубців коліс для їх

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

фінішної обробки. Для виготовлення суцільних черв'ячних фрез застосовують високолеговані швидкорізальні сталі (HSS), які мають високу твердість, теплостійкість і зносотривкість, що забезпечує їх застосування при значних швидкостях різання [3, 4, 5].

Під час реалізації зубофрезерної операції з використанням сучасних суцільних черв'ячних фрез намагаються виконати дві вимоги : отримати потрібну якість обробки та досягти якнайдовшого періоду стійкості фрези. Період стійкості суцільної черв'ячної фрези визначає частину вартості обробки, яка належить до ціни інструмента, тому висока ціна інструмента повинна обов'язково відображатися у великому періоді стійкості, що, як наслідок, спричиняє зменшення собівартості обробки. Основними параметрами, що впливають на величину періоду стійкості суцільної черв'ячної фрези, є швидкість різання, марка інструментального матеріалу, наявність зносотривкого покриття, матеріал та твердість заготовки оброблюваного колеса, застосування змащувально-охолоджувальних середовищ. За рекомендаціями закордонних виробників суцільних черв'ячних фрез із швидкорізальних сталей із покриттям TiN для виготовлення зубчастих коліс модулем 10 – 12 мм швидкість різання повинна знаходитись у межах від 28 м/хв до 70 м/хв залежно від групи матеріалу заготовки. Практичне застосування суцільних черв'ячних фрез обов'язково супроводжується експлуатаційними витратами, що складаються переважно із витрат на відновлення різальних властивостей черв'ячних фрез. До них належать витрати на загострення зубців та витрати на зняття старого і нанесення нового зносотривкого покриття. В багатьох випадках на підприємствах зносотривке покриття на передній загостреній поверхні черв'ячної фрези не відновлюється, тому для забезпечення потрібної стійкості необхідно зменшити швидкість різання в середньому на 15 % від початкової швидкості різання, прийнятої для нової черв'ячної фрези із зносотривким покриттям на передніх поверхнях різальних зубців, що спричиняє зниження продуктивності, збільшення тривалості і собівартості обробки [4, 5].

Перераховані особливості практичного застосування суцільних черв'ячних фрез цілком виправдані для виготовлення зубчастих коліс малих та, в деяких випадках середніх модулів. Нарізання циліндричних зубчастих коліс великих модулів, твердість яких становить НВ 320, за необхідності отримання 8–9 ступеня точності, належить до складної технологічної задачі, яку можна розв'язати застосуванням удосконалених конструкцій черв'ячних фрез, що забезпечують високу продуктивність нарізання зубців коліс, підвищену стійкість інструментів, високу точність обробки, низький розхід інструментальних матеріалів. Цим вимогам задовольняють збірні твердосплавні черв'ячні фрези. Так, наприклад, черв'ячними фрезами, оснащеними твердосплавними пластинами, можна нарізати зубчасті колеса, залежно від їх матеріалу, приймаючи швидкість різання в межах від 140 м/хв до 250 м/хв. Тобто, рекомендована швидкість різання майже в 3,5 разу більша за швидкість різання для черв'ячних фрез із швидкорізальної сталі, що, очевидно, помагає суттєво підвищити продуктивність операцій зубонарізання [5]. Збірні черв'ячні фрези конструктивно можна поділити на дві групи: черв'ячні фрези із змінними твердосплавними пластинами трапецієподібної форми (наприклад, Sandvik CoroMill 176, Ingersoll Finish Hobs BPII 75X8Z) та черв'ячні фрези із змінними твердосплавними тангенційними пластинами (наприклад, Sandvik CoroMill 177, Ingersoll Hobs BP II 77X8Z) [6, 7, 8]. Збірні черв'ячні фрези першої групи складаються із суцільного корпусу, в якому за допомогою певних елементів фіксації закріплено змінні, трапецієподібні твердосплавні пластини (зовнішній діаметр фрез у середньому становить 240 мм, рекомендований діапазон модулів нарізуваних зубчастих коліс 4–10 мм, клас точності В за DIN 3968, кількість змінних пластин – 86 шт. для фрези модуля 10 мм, діаметра 240 мм). Збірні черв'ячні фрези другої групи складаються із скріплених разом декількох (здебільшого до 7), кільцевих одновиткових фрез, на бокових поверхнях витків яких тангенційно закріплено змінні твердосплавні пластини (зовнішній діаметр фрез 170–400 мм, діапазон модулів зубчастих коліс 7–18 мм, клас точності В за DIN 3968, кількість змінних пластин – 108 шт. для фрези модуля 10 мм, діаметра 240 мм). В описаних збірних черв'ячних фрезах використовують трапецієподібні твердосплавні пластини або тангенційні пластини, які забезпечують отримання стандартного кута профілю зубця колеса 20^0. Збірні черв'ячні фрези із змінними твердосплавними пластинами конструктивно складні, а відтак –

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

надзвичайно вартісні. Застосування таких фрез економічно виправдане для виготовлення зубчастих коліс великих або середніх модулів за умов серійного чи великосерійного типу виробництва. Під час практичної експлуатації фрез потрібно враховувати необхідність постійного безальтернативного придбання тільки у певного виробника твердосплавних пластів, які також мають високу вартість. В Україні спеціальні збірні черв'ячні фрези із вставними твердосплавними зубцями, що належать до першої групи черв'ячних фрез, розроблено в Інституті надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України для відновлювальної (реноваційної) обробки великогабаритних зубчастих коліс, що використовуються у породоруйнівних млинах гірничозбагачувальних комбінатів [9]. Характерною особливістю таких фрез є застосування у суцільному корпусі змінних твердосплавних зубців стандартного вихідного профілю із кутом профілю 20^0 або зубців з випукло-ввігнутим вихідним профілем для отримання зубчастих коліс із зубцями з профілем Новікова. Змінні твердосплавні зубці не належать до стандартних, а збірні черв'ячні фрези, які використовували для дослідно-промислового випробування, серійно не виготовляються.

Практика вітчизняного технологічного забезпечення виготовлення деталей циліндричної форми із канавками або з трапецієподібними різями засвідчує використання для різців стандартних твердосплавних пластин трапецієподібної форми різних типорозмірів, які мають задні кути : 6^0, 10^0, 12^0, а кут між боковими лезами пластини становить 34^0 (тип 32) або 15^0 (тип 51), тобто половина кута відповідно дорівнює 17^0 та $7{,}5^0$. Згадані твердосплавні пластини виготовляють із твердих сплавів марок ВК6М, ВК6-ОМ, ВК10-ОМ, Т5К10, ТТ20К9, що надає пластинам таких корисних експлуатаційних характеристик, як опірність до викришування, високу стійкість під час різання з ударами та вібраціями [10]. Трапецієподібна форма твердосплавних пластин, що застосовуються у збірних черв'ячних фрезах, розглянутих раніше, подібна до геометричної форми стандартних твердосплавних пластин типів 32 та 51, які доступні за ціною, можливістю отримання із різних марок твердих сплавів з покриттям чи без покриття. Все це наводить на думку про доцільність застосування згаданих стандартних твердосплавних пластин у збірних черв'ячних фрезах для чорнового та чистового нарізання зубців великих та середніх модулів на циліндричних зубчастих колесах із конструкційних та легованих сталей завдяки реалізації удосконаленого способу зубонарізання черв'ячними фрезами.

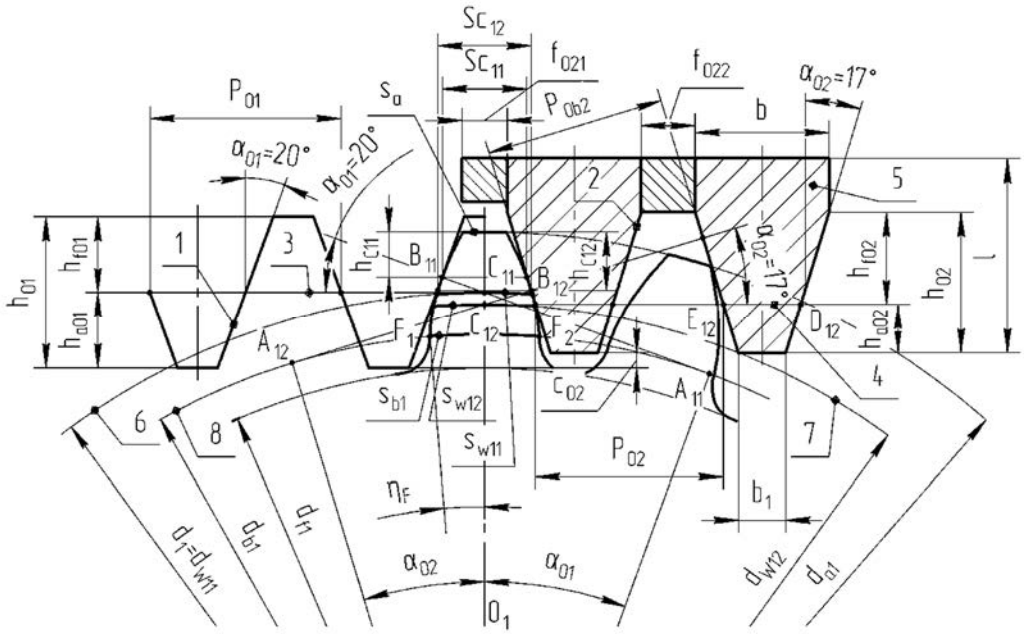
Формулювання мети дослідження. Розроблення науково обгрунтованих рекомендацій щодо удосконалення процесу нарізання евольвентних зубців стандартного профілю на циліндричних зубчастих колесах великих та середніх модулів збірними черв'ячними фрезами із вставними твердосплавними зубцями із зменшеним кутом профілю.

Викладення основного матеріалу. Черв'ячні фрези належать до групи обкочувальних інструментів, у яких різальні леза зубців розташовані на гвинтовій поверхні. Утворення бокових поверхонь зубців у процесі оброблення циліндричних зубчастих коліс відбувається профілюванням методом огинання. Гвинтова поверхня із розташованими на ній лезами різальних зубців утворює інструментальну гвинтову поверхню (основного черв'яка архімедового), яка є спряженою із боковою поверхнею нарізаних на зубчастому колесі зубців та поверхнею зубців інструментальної рейки. Остаточне утворення профілю зубців колеса (профілювання) відбувається в точках, в яких нормаль (лінія профілювання) до профілю різального леза проходить через полюс профілювання (верстатного зачеплення) у площині профілювання, утвореній у площинному торцевому перетині, перпендикулярному до осі заготовки колеса [10].

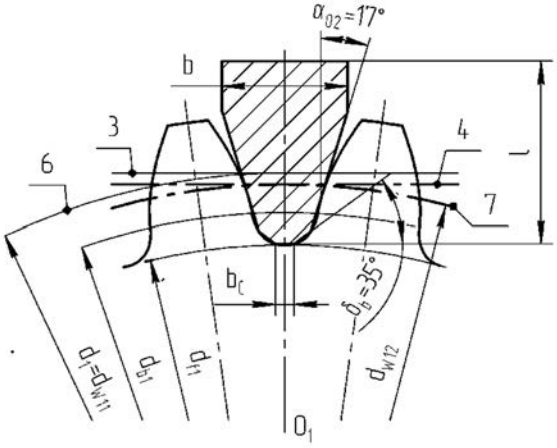
Отримуємо математичну модель формоутворення зубців евольвентного профілю у циліндричних зубчатих колесах на основі аналізу площинної системи виробничого (верстатного) зачеплення, приймаючи, що профіль черв'ячної фрези відповідає профілю вихідної інструментальної рейки із вихідним контуром інструментальної рейки (ВКІР) або вихідним формоутворювальним контуром (ВФК), який є контршаблоном вихідного контуру зубчастої рейки [9, 10]. Схему формоутворення зубців на циліндричному зубчатому колесі за допомогою вихідних формоутворювальних контурів зображено на рис. 1.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Профілювання зубців циліндричних коліс із стандартним евольвентним профілем здійснюється стандартним ВКІР 1 з кутом профілю 20^0 (рис. 1, *а*) при коченні без проковзування початкової прямої 3 вихідної інструментальної рейки по початковому колу 6 циліндричного зубчатого колеса (розглядаємо утворення зубців прямозубого колеса без зміщення).



а



б

Рис. 1. Формоутворення зубців циліндричного колеса вихідними контурами інструментальних рейок: а – профілю бокових поверхонь зубців; б – профілю міжзубцевої западини

Стандартний ВКІР та отримуваний ним евольвентний профіль зубців колеса характеризуються такими основними параметрами: кут профілю рейки – α_{01} ; модуль – m ; крок рейки – P_{01} ($P_{01} = \pi \cdot m$); висота головки та ніжки зуба рейки – h_{a1} , h_{f1} ($h_{a1} = h_{f1} = 1{,}25 \cdot m$); полюс профілювання – C_{11}; число нарізуваних зубців колеса – Z_1; діаметр ділильного кола 6 – d_1 ($d_1 = m \cdot Z_1$); діаметр початкового кола – d_{W1} (для коліс без зміщення $d_1 = d_{W1}$); діаметр основного кола 8 – d_{b1} ($d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_{01}$); кут зачеплення – α_{tW1} ($\alpha_{tW1} = \alpha_{01}$); товщина зуба колеса на початковому колі – S_{W1} ($S_{W1} = \pi \cdot d_{W1} / Z_1 = P_{01}/2$).

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Виготовлення циліндричних зубчастих коліс супроводжується обов'язковим контролем за розміром нарізаних зубців. Найпоширенішим параметром для контролю є товщина зуба на постійній хорді $S_{C_{11}}$ ($S_{C_{11}} = 2\cdot(1/4\cdot P_{01}\cdot\cos\alpha_{01})\cdot\cos\alpha_{01}$), вимірювана на висоті зуба до постійної хорди $h_{C_{11}}$ ($h_{C_{11}} = 1/2\cdot(d_{a1} - d_{W11} - S_{C_{11}}\cdot\mathrm{tg}\,\alpha_{01})$). Ці параметри визначають за такими залежностями:

$$S_{C_{11}} = \frac{1}{2}\cdot p\cdot m\cdot\cos^2 a_{01}; \qquad h_{C_{11}} = m\cdot(1-\frac{1}{8}\cdot p\cdot\sin 2a_{01}). \tag{1}$$

Евольвентний профіль зубця колеса має різний за висотою зубця кут профілю α. Загалом форма евольвенти визначається тільки діаметром d_{b1} основного кола, з якого вона отримана. Тут необхідно зауважити, що у системі синтезу зубчастих зачеплень евольвентний профіль зубця отримується зміщенням ВКІР відносно основного кола, яке залишається постійним.

Евольвентний профіль, отриманий стандартним ВКІР із кутом профілю 20^0, можна отримати також вихідною інструментальною рейкою, кут вихідного контуру якої менший від стандартного. В цьому випадку контур вихідної інструментальної рейки можна утворити із контурів твердосплавних пластин типу 32 або типу 51 (див. рис. 1, а, трапецієподібний профіль зубця рейки 5, контур рейки 2). Твердосплавні пластини за ГОСТ 25412-90 типорозміру 32250 із розмірами l = 36 мм, b = 28 мм, b_1 =10,3 мм, S = 6 мм, кутом між боковими лезами $2\alpha_{02} = 34^0$ ($\alpha_{02} = 17^0$) можна використати в інструментальній рейці для нарізання зубців модулем 10 мм.

Зміна кута профілю вихідної інструментальної рейки спричиняє зміну кінематики процесу формоутворення. Для забезпечення контакту із існуючою евольвентою потрібно змістити ВКІР із меншим кутом профілю в напрямку осі обертання нарізуваного колеса. Обкочування такої рейки повинно здійснюватись по початковому колу, діаметр якого менший за d_{W1}. При суміщенні із колом западин зубців колеса діаметром d_{f1} переднього різального леза твердосплавної пластини із кутом контуру α_{02}, використовуваних у вихідній інструментальній рейці, може виявитись, що ширина твердосплавної пластини є більшою за відстань між сусідніми утворюваними зубцями зубчастого колеса відповідного модуля і кількості. В цьому випадку потрібно здійснити плоско-паралельне зміщення вихідної інструментальної рейки на відстань c_{02} вздовж бокового леза трапецієподібного зубця, зберігаючи в точці B_{12} контакт бокового леза зубця із евольвентним профілем зубця колеса. Центр профілювання (верстатного зачеплення) у точці C_{12} знайдемо на перетині лінії профілювання $A_{12}B_{12}$ та лінії O_1C_{11}.

Лінію профілювання $A_{12}B_{12}$ проведено дотично до основного кола 8 діаметром d_{b1} і перпендикулярно до бічного леза зубця вихідної інструментальної рейки із кутом профілю a_{02}. Лінія профілювання $A_{12}B_{12}$ у цьому положенні утворює з початковою прямою 4 вихідної інструментальної рейки 5 кут зачеплення a_{02} ($a_{02} = 17^0$). Профілювання евольвентного профілю здійснюється коченням без проковзування початкової прямої 4 вихідної інструментальної рейки 5 із контуром 2 по дузі початкового кола 7 діаметром d_{W12}. Початкове коло 7 діаметром d_{W12}, що відмінне від початкового кола 6, проходить через полюс профілювання C_{12}. Діаметр d_{W12} визначаємо, використовуючи такі вирази:

$$d_{W12} = d_{b1} / \cos a_{02}; \tag{2}$$

$$d_{W12} = d_{W11}\cdot\frac{\cos a_{01}}{\cos a_{02}}. \tag{3}$$

Початкова пряма 4 перетинає контур 2 не симетрично : висоту головки h_{a02} та висоту ніжки h_{f02} зубця вихідної інструментальної рейки 5 визначають за співвідношеннями:

$$h_{a02} = \frac{1}{2}\cdot(d_{W12} - d_{f1}) + c_{02}; \qquad h_{f02} = \frac{b - b_1}{2\cdot tg a_{02}} - h_{a02}. \tag{4}$$

У вихідній інструментальній рейці крок P_{02} має дорівнювати коловому кроку зубців на початковому колі 7. Для визначення P_{02} , використовуючи (3), отримаємо такі залежності:

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

$$P_{02} = p \cdot d_{W12} / Z_1; \tag{5}$$

$$P_{02} = P_{01} \cdot \frac{\cos a_{01}}{\cos a_{02}}. \tag{6}$$

Розташування твердосплавних зубців у вихідній інструментальній рейці доцільно контролювати, вимірюючи крок зачеплення P_{0b2}, номінальне значення якого визначаємо за виразом $P_{0b2} = P_{02} \cdot \cos a_{02}$. При встановленні зубців 5 в інструментальній рейці із кроком P_{02} використовують проміжні елементи, ширину f_{022} яких розраховуємо за виразом – $f_{022} = P_{02} - b$.

Проектувати вихідний інструментальний контур доцільно при оцінюванні геометричних параметрів утворюваного зубця колеса, які можна контролювати в процесі нарізання зубчастого колеса черв'ячною фрезою із вставними різальними зубцями. До таких параметрів належить товщина зуба по хорді зубця колеса S_{C12}, що визначається на висоті зуба колеса h_{C12}. Попередньо встановимо вирази для визначення товщини зуба з евольвентним профілем на колі певного діаметра. Використовуємо для цього (див. рис. 1, *а*) відоме співвідношення :

$$\frac{S_{W11}}{d_{W11}} + (\operatorname{tg}\alpha_{01} - \alpha_{01}) = \frac{S_{W12}}{d_{W12}} + (\operatorname{tg}\alpha_{02} - \alpha_{02}), \tag{7}$$

де S_{W11} та S_{W12} – відповідно товщина (довжина дуги) евольвентного зуба колеса на відповідних початкових діаметрах d_{W11} і d_{W12} при кутах профілю евольвенти α_{01} і α_{02} .

Товщина зуба S_{W11} на початковому (ділильному) колі діаметра d_{W11} (d_1) дорівнює – $S_{W11} = P_{01}/2$. Товщину зуба S_{W12} на початковому колі діаметра d_{W12} розраховуємо за виразом ($\alpha_{01} = 20^0$, $\alpha_{02} = 17^0$):

$$S_{W12} = d_{W12} \cdot \left(\frac{S_{W11}}{d_{W11}} + (\operatorname{tg} a_{01} - a_{01}) - (\operatorname{tg} a_{02} - a_{02}) \right). \tag{8}$$

Товщину зуба S_{b1} на основному колі діаметра d_{b1} , якщо кут профілю дорівнює нулю, визначаємо за формулою:

$$S_{b1} = \cos a_{01} \cdot (S_{W11} + d_{W11} \cdot (\operatorname{tg} a_{01} - a_{01})). \tag{9}$$

Центральний кут η_F, що може бути використаний для розрахунку координат точок евольвентного профілю, визначаємо за залежністю $\eta_F = S_{b1} / (2 \cdot d_{b1})$.

Товщину зуба по хорді зубця колеса S_{C12} встановимо (див. рис. 1, *а*) беручи до уваги те, що довжина відрізка, проведеного між протилежними точками контуру 2 інструментальної рейки, який одночасно є дотичним у точці C_{12} до початкового кола 7 діаметром d_{W12}, практично дорівнює товщині зуба S_{W12} цього початкового кола. Так, для кута профілю $\alpha_{02} = 17^0$, модуля – m = 10 мм, кількості зубців – $Z_1 = 23$, різниця між довжинами згаданого відрізка та товщини зуба становить $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ мм, а частка між ними дорівнює 0,9998 (товщина зуба більша за довжину відрізка). Хорда зубця колеса довжиною S_{C12} та евольвентний контур зуба контактують в точці B_{12} з контуром 2 інструментальної вихідної рейки.

Товщину зуба по хорді S_{C12} та висоту зуба h_{C12} до цієї хорди визначають за такими співвідношеннями:

$$S_{C12} = S_{W12} \cdot \cos^2 a_{02}; \tag{10}$$

$$h_{C12} = \frac{1}{2} \cdot (d_{a1} - d_{W12} - S_{C12} \cdot \operatorname{tg} a_{02}). \tag{11}$$

Вихідний контур інструментальної рейки із кутом профілю α_{02} зубців, меншим від стандартного кута профілю α_{01}, складається із правої та лівої частин (див. рис. 1, *а*), якими здійснюється профілювання (формоутворення) правих чи лівих евольвентних профілів зубців зубчастого колеса. Отримання зубця колеса із заданою товщиною (наприклад, товщиною зуба по хорді S_{C12}) можливе при розташуванні правого та лівого вихідних контурів інструментальної рейки на віддалі f_{021} симетрично до центрального зубця колеса (згідно зі схемою) або лінії симетрії O_1C_{11} за допомогою центрального проміжного елемента. Ширина f_{021} центрального проміжного елемента між правою та лівою вихідними інструментальними рейками визначаємо за таким виразом:

$$f_{021} = S_{C12} + (2 \cdot h_{a02} + S_{C12} \cdot \operatorname{tg} a_{02}) \cdot \operatorname{tg} a_{02} + b_1 - b. \tag{12}$$

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Вихідна інструментальна рейка містить зубці 5, передні леза яких розташовані на відстані c_{02} від кола западин зубців колеса діаметром d_{f1}. Для повного формування поверхні западин зубців колеса та перехідної кривої між колом западин і евольвентним профілем зубців колеса використовуємо встановлений на гвинтовій поверхні черв'ячної фрези один (два або три) окремий твердосплавний зубець із кутом профілю α_{02} (див. рис. 1, *б*). Бокові леза окремих зубців участі у профілюванні евольвентних профілів зубців практично не беруть. Переднє лезо цього зубця формує коло западин колеса діаметром d_{f1}, а отримані на вершинах зубця фаски під кутом δ_0 ($\delta_0 = 35^0$) забезпечують формування перехідної поверхні на евольвентному профілі зубців колеса та покращують умови різання вершинними лезами.

Висновки. Запропоновано науково обґрунтоване удосконалення процесу нарізання евольвентних зубців стандартного профілю на циліндричних зубчастих колесах великих та середніх модулів за допомогою збірних черв'ячних фрез із вставними твердосплавними зубцями, що мають зменшений кут профілю. Запропоновано для вставних зубців використовувати стандартні трапеціподібні токарні пластини із твердого сплаву, що призначені для точіння канавок або різі. Використання вихідного інструментального контуру із зменшеним кутом профілю передбачає зменшення кроку та міжосьової відстані між віссю черв'ячної фрези та віссю нарізуваного циліндричного зубчастого колеса. Встановлено, що бокові евольвентні поверхні зубців профілюються окремо правою та лівою частинами вихідної інструментальної рейки. Формують перехідну криву та коло западин зубчастого колеса окремим вставним із твердого сплаву трапеціподібним зубцем, розміщеним симетрично між правою і лівою частинами вихідної інструментальної рейки на витку черв'ячної фрези. Контроль за точністю зубчастих коліс запропоновано виконувати за товщиною зуба по хорді, яка знаходиться на відповідній висоті зуба від кола вершин зубців колеса. Товщина зуба по хорді прямо пропорційна до ширини зуба по дузі початкового кола та квадрата косинуса кута профілю на початковому колі зубчастого колеса.

1. Грицай І. Є. Теоретико-прикладні основи комплексних наукових досліджень процесу нарізання зубчастих коліс: монографія. – Львів: Сполом, 2009. – 254 с. 2. Богуслаєв В. О. Формоутворення черв'ячних зуборізних фрез / В. О. Богуслаєв, Н. С. Равська, О. Я. Качан, К. Б. Балушок, В. Ф. Мозговий, О. А. Охріменко. – Запоріжжя: Вид-во ВАТ "Мотор Січ", – 2007. – 179 с. 3. Антонюк В. Е. Современные технологи изготовления цилиндрических зубчастых колес // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия "Металлообработка". – 2007. – № 4. – С. 6–18. 4. Локтев Д. А. Рациональная эксплуатация современных червячных фрез // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия – "Металлообработка". – 2007. – № 4. – С. 20–23. 5. Локтев Д. А. Червячные фрезы. Выбор рациональных конструкционных и эксплуатационных параметров // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия "Металлообработка". – 2008. – № 5. – С. 64–68. 6. Sandvik Coromant. Решения для зубофрезерования. Руководство. / Режим доступу: https://www.sandvik.coromant.com/sitecollectiondocuments/downloads/global/technical%20guides/ru-ru/c-1040-126.pdf. 7. Ingersoll cutting tool. Ingersoll gear production. / Режим доступу: https://ssl.ingersoll-imc.com/ resources/ pdf/ 5879192_Gear_Production_Cat. pdf. 8. LMT Fette Gear Cutting Tools and Knowledge/ Режим доступу: https://www.lmt-tools.com/ fileadmin / user_upload/ content_lmt-tools/ content/ segmente/ verzahnen/ downloads/ LMT-Tools-Katalog-Verzahnen-s.pdf. 9. Кривошея А. В. Анализ формообразования изношенных крупногабаритных цилиндрических зубчатых колес / А. В. Кривошея [и др.] // Високі технології в машинобудуванні = High technologies of machine-building : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – Вип. 1 (22). – С. 145–152. 10. Ординарцев И. А. Справочник инструментальщика / И. А. Ординарцев и др.; под общ. ред. И. А. Ординарцева. – Л.: Машиностроение, 1987. – 846 с.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua