

УДК 621. 992. 04

ФОРМОУТВОРЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ АРОЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС З ЕВОЛЬВЕНТНИМ ПРОФІЛЕМ РІЗНИМИ СПОСОБАМИ

С. П. Воробйов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
вул. Борщагівська, 115/3, 03056, м. Київ, Україна. E-mail: vorobyov_sp@ukr.net

Розглянуто різні способи формоутворення циліндричних абочних зубчастих коліс, що забезпечують евольвентний профіль зубів в торцевих перерізах по ширині колеса. Показано, що вказані способи формоутворення евольвентного профілю в торцевих перерізах є малопродуктивними або потребують спеціальної різцевої головки з планетарним механізмом, при чому для кожного радіуса кривизни зуба арки необхідна відповідного радіуса різцева головка. Тому запропоновано способи нарізання таких коліс різцевими головками, як методом обкату, так і копіювання на верстатах з ЧПК з додатковими зміщеннями. Виведено аналітичні залежності для визначення величин цих зміщень по осям координат та кутів повороту осей на верстатах з ЧПК. Розрахунок величин за вихідними даними дасть змогу оцінити їх для кожного зі способів та обрати більш продуктивний.

Ключові слова: формоутворення, абочні, евольвентні, спосіб, зміщення.

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ АРОЧНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС С ЭВОЛЬВЕНТНЫМ ПРОФИЛЕМ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ

С. П. Воробьев

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
ул. Борщаговская, 115/3, 03056, г. Киев, Украина. E-mail: vorobyov_sp@ukr.net

Рассмотрены различные способы формообразования цилиндрических абочных зубчатых колес, обеспечивающих эвольвентный профиль зубьев в торцевых сечениях по ширине колеса. Показано, что указанные способы формообразования эвольвентного профиля в торцевых сечениях есть малопродуктивными или требующие специальной резцовой головки с планетарным механизмом, причем для каждого радиуса кривизны зуба арки необходимо соответствующего радиуса резцовая головка. Поэтому предложены способы нарезания таких колес резцовой головкой, как методом обката, так и копированием на станках с ЧПУ с дополнительными смещениями. Выведены аналитические зависимости для определения величин этих смещений по осям координат и углов поворота осей на станках с ЧПУ. Расчет величин по исходным данным позволит оценить их для каждого из способов и выбрать более производительный.

Ключевые слова: формообразование, абочные, эвольвентные, способ, смещение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Одним з перспективних напрямків розвитку зубчастих передач є застосування циліндричних абочних передач. Ці зубчасті колеса мають більшу навантажувальну здатність та плавність роботи, сприяють зменшенню шуму та вібрацій, дозволяють легко керувати розподіленням навантаження на зуб. Широке застосування цих передач – це шлях до підвищення довговічності, зниження металоємності та собівартості.

Заміна існуючих циліндричних передач на абочні у механізмах гірничої промисловості, механізмах важкого машинобудування, гідромашинах дала високі результати [1–5].

Однак, промислове використання цього виду зачеплення стримується через відсутність точних високопродуктивних способів обробки абочних коліс.

Відомими способами нарізання циліндричних абочних коліс можна забезпечити або високу продуктивність їх виготовлення [6, 7] або точність профілю зубів колеса по всій його ширині [2, 8, 9]. Тому розробка високопродуктивних способів виготовлення абочних циліндричних зубчастих коліс, які забезпечують точне формоутворення евольвенти їх зубів, є нагальною науковою та практичною проблемою, що значно розширить застосування цих передач.

Вирішення цієї проблеми перш за все базується на основі дослідження формоутворення циліндричних абочних зубчастих коліс різними способами на верстатах з ЧПК.

Метою роботи є забезпечення високої продуктивності та точності виготовлення циліндричних абочних коліс на основі дослідження їх формоутворення на верстатах з ЧПК різними способами.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. До високопродуктивних способів обробки абочних коліс відноситься їх нарізання різцевими головками, як методом обкату, так і копіювання.

Формоутворення абочних зубчастих коліс методом обкату [6, 7] з циклоїдальною формою зуба виконується на зубофрезерних верстатах торцевою різцевою головкою з тангенціальною подачею та неперервним діленням заготовки на крок нарізуваних зубів. Похибка теоретичного профілю у вихідному перерізі нарізуваного колеса рівна нулю. Зі збільшенням ширини колеса похибка напрямку зуба збільшується. Це пояснюється тим, що необхідний профіль встановлених в головці різців задається в площині вихідного перерізу нарізуваного колеса. Очевидно, що чим далі знаходиться розглядуваний торцевий переріз колеса від вихідного, тим більше змінюється профіль різців у ньому відносно заданого. Це в свою чергу обумовлює збільшення похибки напрямку зуба.

Також відомо, що при формоутворенні циліндричних абочних зубчастих коліс торцевими різцевими головками методом копіювання [10] виникають похибки профілю абочного зуба в перерізах перпендикулярних осі колеса. Встановлено, що величина похибки при нарізанні торцевими різцевими

головками залежить від параметрів зубчастого колеса та радіуса різцевої головки.

Отже, при формоутворенні цими методами теоретично точну евольвенту можливо отримати лише у середньому (вихідному) перерізі перпендикулярному осі.

Теоретично точні арочні колеса можна нарізати за методом обкату шляхом обкочування нульовим інструментом [2, 8, 9] або спеціальною різцевою головкою.

Способи нарізання арочних коліс нульовим інструментом (кут профілю дорівнює нулю) реалізуються на верстатах з ЧПК, шляхом обкату окремо випуклої та ввігнутої частин западини зуба з періодичним діленням на крок нарізуваних зубів. Дані способи дозволяють отримати циліндричне арочне колесо з евольвентним профілем в усіх торцевих перерізах. Однак, вони потребують застосування кінцевої фрези або двох різцевих головок (або переналадки однієї, змінюючи радіус встановлення різців). При чому обробка ведеться однією точкою на вершині різця з нульовим кутом профілю. Як наслідок процес є малопродуктивним.

Іншим методом, який дозволяє отримати евольвенту по всій довжині зуба в перерізах, перпендикулярних осі колеса, є спосіб нарізання циліндричних зубчастих коліс з круговими зубами спеціальною різцевою головкою, розробленою Польовим В.І. Суть методу полягає у застосуванні різцевої головки з планетарним механізмом, конструктивними елементами якого є встановлене по одній осі з корпусом головки центральне зубчасте колесо, водило та оснащені різцями сателіти, а параметри конструктивних елементів узгоджують таким чином, що леза різців у процесі формування зубців не змінюють орієнтації відносно площини обертання заготовки колеса, що нарізуються. Проте, для нарізання арочних зубчастих коліс з різними радіусами кривизни арки, необхідно спеціальні різцеві головки відповідних радіусів, що потребує виготовлення складного інструменту для кожного значення радіуса.

Наведений аналіз рухів показує, що рухи, які здійснюються планетарною різцевою головкою, можуть бути відтворені на сучасних багатокоординатних верстатах з ЧПК. Це дає змогу на основі дослідження формоутворення зубів арочних високопродуктивними простими за конструкцією різцевими головками нарізати евольвентні арочні колеса в усіх торцевих перерізах.

Спосіб формоутворення, заснований на методі обкату. Розглянемо спосіб формоутворення різцевою головкою методом обкату з тангенційною подачею (рис. 1).

Різцевій головці 1, оснащеній різцями з прямолінійними ріжучими кромками 2, надають обертальний рух різання з кутовою швидкістю ω_p , обумовленої необхідною швидкістю різання, та поступальний рух тангенціальної подачі S. Заготовці 3 надають обертальний рух обкату з кутовою швидкістю ω_3 , узгодженої зі швидкістю поступального руху інструменту S таким чином, щоб ділильне коло радіусом r заготовки 4 перекочувалося без ковзання по початковій площині інструменту 5.

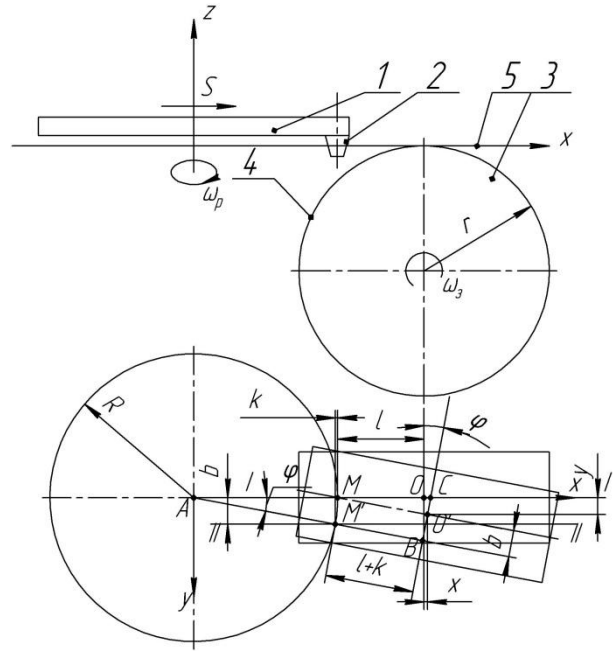


Рисунок 1 – Схема формоутворення методом обкату зі зміщення заготовки

Нехай, в початковому положенні осьовий переріз різцевої головки, в якому визначається профіль інструменту, співпадає з середнім перерізом I-I зубчастого колеса, який будемо вважати вихідним. В цьому перерізі профілююча точка M лежить на відстані l від осі зубчастого колеса.

Введемо систему координат XYZ, де x – співпадає з радіусом AM профілюючої точки M, y – проходить паралельно осі заготовки через вісь обертання різцевої головки; z – співпадає з віссю обертання різцевої головки.

При повороті різцевої головки на довільний кут φ профілююча точка M займе положення M' в перерізі II-II на відстані b від середнього та відстані M'B = (L + k) від осі зубчастого колеса, де k – різниця між радіусом профілюючої точки AM' та проекцією цього радіуса на вісь x і дорівнює

$$k = AM - AM' \cdot \cos \varphi = R - R \cos \varphi. \quad (1)$$

Внаслідок повороту різцевої головки її осьовий переріз не буде співпадати з торцевим перерізом заготовки II-II, що лежить на відстані b від середнього, і відповідно профіль не буде співпадати з вихідним, тобто профіль буде неевольвентним. Для нарізання евольвентного профілю необхідно повернути заготовку на кут φ навколо точки M' так, щоб вісь заготовки була перпендикулярна до радіуса різцевої головки. При цьому повороті центр заготовки O зміститься у положення O' з координатами (x, y), а вісь заготовки повернеться на кут φ відносно початкового положення.

Для знаходження координат (x, y) розглянемо трикутник ABC. З нього отримаємо:

$$AB = R + l + k, \quad (2)$$

$$BC = AB \cdot \tan \varphi, \quad (3)$$

де $O'C = BC - O'B,$ (4)

$O'B = b = R \sin \varphi.$ (5)

Отже

$y = O'C \cdot \cos \varphi =$
 $= [(2R + l - R \cos \varphi) \tan \varphi - R \sin \varphi] \cos \varphi,$ (6)

відповідно

$x = OC - O'C \cdot \sin \varphi,$ (7)

де

$OC = AC - R - l = \frac{AB}{\cos \varphi} - R - l =$
 $= \frac{2R + l - R \cdot \cos \varphi}{\cos \varphi} - R - l,$ (8)

Застосовуючи тригонометричні перетворення та спрощення, остаточно отримуємо:

$y = \sin \varphi \left(4R \sin^2 \frac{\varphi}{2} + l \right),$ (9)

$x = 2 \sin^2 \frac{\varphi}{2} (2R \cos \varphi - l)$ (10)

Максимальне значення повороту осі заготовки φ залежатиме від ширини зубчастого колеса і визначається

$\sin \varphi_{\max} = \frac{B}{2R}$ (11)

де B – ширина зубчастого колеса.

Після нарізування першої западини, різцева головка і заготовка повертаються в початкове положення, заготовка повертається на крок нарізуваних зубів і процес повторюється. Проте для зменшення допоміжного часу на холостий рух повернення інструменту і заготовки у вихідне положення, можна застосовувати спосіб реверсивного обкату (рис. 2).

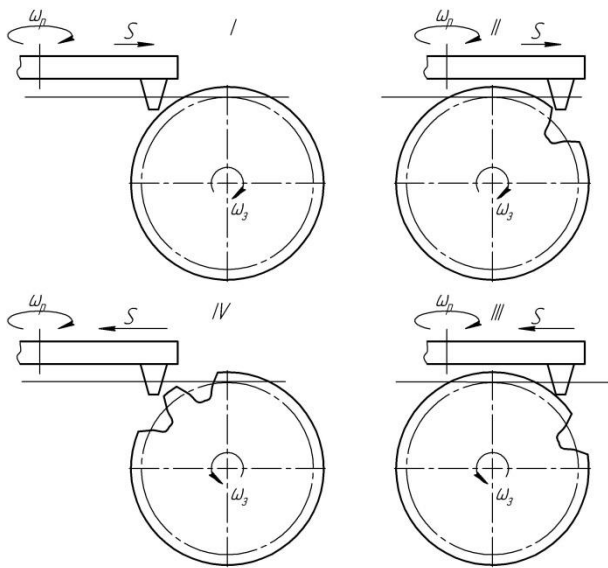


Рисунок 2 – Схема реверсивного обкату

Після нарізування першої западини (поз. II) заготовку повертають на крок нарізуваних зубів (поз. III) і процес повторюється у зворотному напрямку.

Враховуючи усі переміщення, для способу формоутворення, заснованому на методі обкату, необхідно задіяти чотири керованих рухів.

Спосіб формоутворення, заснований на методі копіювання. Розглянемо спосіб нарізування торцевою різцевою головкою методом копіювання (рис. 3).

Різцевій головці 1, оснащеної фасонними різцями 2, які встановлюють рівномірно по колу радіуса R , надають обертальний рух різання з кутовою швидкістю ω_p , обумовленої необхідною швидкістю різання, а також поступальний рух подачі S уздовж осі обертання різцевої головки. Відповідно, як і при методі обкату, для одержання евольвентного профілю в торцевих перерізах зубчастого колеса необхідно надавати заготовці додаткові переміщення. При повороті різцевої головки на кут φ відносно початкового положення необхідно одночасно повернути заготовку на кут ϑ [10] навколо її осі обертання та на кут φ повернути вісь обертання відносно початкового положення, при цьому центр заготовки O зміститься у положення O' з координатами (x, y) . Кут ϑ знаходиться за формулою:

$\vartheta = \frac{2\pi k}{r},$ (12)

де

$k = R - R \cdot \cos \varphi$ (13)

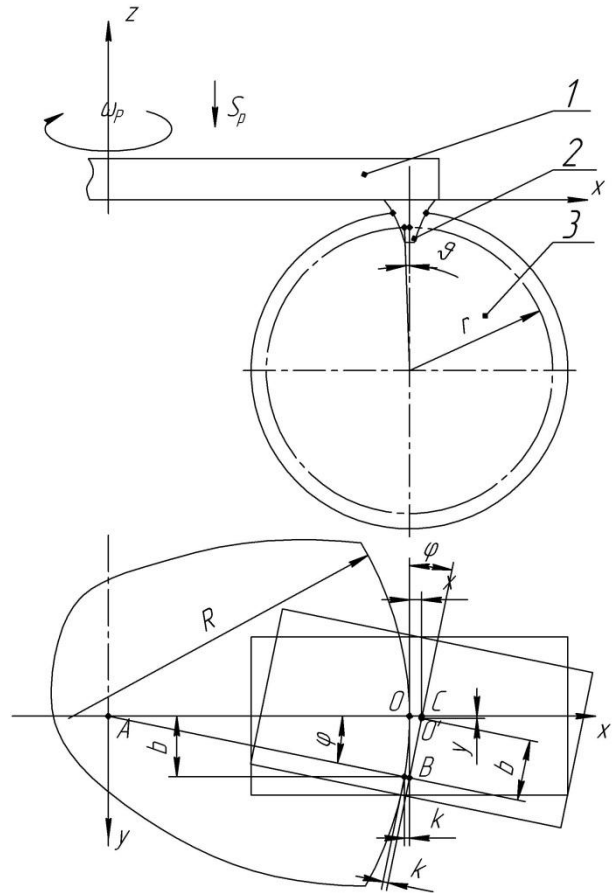


Рисунок 3 – Схема формоутворення методом копіювання зі зміщенням заготовки

Для знаходження координат (x, y) розглянемо трикутник ABC . З нього отримуємо:

$$AB = R + k = 2R - R \cdot \cos \varphi, \quad (14)$$

$$BC = AB \cdot \tan \varphi = (2R - R \cdot \cos \varphi) \tan \varphi, \quad (15)$$

звідки

$$O'C = BC - O'B = (2R - R \cdot \cos \varphi) \tan \varphi - R \sin \varphi, \quad (16)$$

отже

$$y = O'C \cdot \cos \varphi = [(2R - R \cdot \cos \varphi) \tan \varphi - R \sin \varphi] \cos \varphi. \quad (17)$$

Відповідно

$$x = OC - O'C \cdot \sin \varphi, \quad (18)$$

де

$$OC = AC - R = \frac{AB}{\cos \varphi} - R = \frac{2R - R \cdot \cos \varphi}{\cos \varphi} - R \quad (19)$$

Застосовуючи тригонометричні перетворення та спрощення, остаточно отримаємо

$$y = 4R \sin \varphi \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (20)$$

$$x = 4R \cos \varphi \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (21)$$

Після врізання різців в заготовку на глибину, відповідну висоті нарізуваних зубів, різцеву головку виводять із зачеплення із заготовкою, заготовку повертають на крок нарізуваних зубів і процес повторюють.

Для реалізації обох розглянутих способів необхідно задіяти чотири керованих рухів. Проте, при методі обкату різці мають прямолінійні різучі кромки, в той час як при копіюванні – фасонні, які потребують профілювання. Проте, розглядаючи кінематичні рухи та порівнюючи їх, очевидно, що при методі обкату зміщення по осі у будувати мати більші величини, ніж при копіюванні, а по осі x – навпаки. Тому кінцевий вибір способу нарізання залежить від визначення цих величин в залежності від вихідних параметрів та характеристик верстату з ЧПК.

ВИСНОВКИ. В роботі вирішена задача формування циліндричних арокних зубчастих коліс різцевими головками способом обкату та копіювання. Показано, що за рахунок зміщень заготовки можливо отримати евольвентний профіль в торцевих перерізах по свій ширині зубчастого колеса. Виведені залежності дозволяють визначити величини

зміщень по осям координат та обрати найбільш продуктивний спосіб обробки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Результаты испытаний арочных 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.
2. Эвольвентные арочные передачи / А.Н. Виноградов, А.П. Давыдов, С.И. Липатов / Межотраслевой альманах ДСР. – 2011. – № 31. – С. 42–45.
3. Маликов А.А. Конструктивно-технологические преимущества цилиндрических колес с арочными зубьями / Известия ТулГУ. Технические науки. – 2008. – № 1. – С. 198–205.
4. Беляев А.И., Емельянов Ю.В. Тяговая арочная эвольвентная цилиндрическая передача локомотивов / Вестник ВНИИЖТ. – 1994. – № 2. – С. 41–45.
5. Особенности изготовления и применения высокоточных арочных тяговых зубчатых передач / А.И. Беляев, А.И. Сирицын, Д.А. Сирицын // Вестник машиностроения. – 1997. – № 1. – С. 3–6.
6. Родин П.Р., Полевой В.И. Инструмент для нарезания цилиндрических зубчатых колес с циклоидной по длине формой зубьев // Повышение эффективности производства машиностроительных предприятий. Тез. докл. респ. н.-т. конф. – Душанбе: ТаджикНИИИТИ, 1990. – С. 112–113.
7. Родин П.Р., Полевой В.И. Резцовая головка для нарезания цилиндрических колес с циклоидной по длине формой зубьев // Пути повышения стойкости и надежности режущих и штамповых инструментов. Тез. докл. всес. н.-т. конф. – Николаев: ЮФ ВНИИТСМ «Сириус», 1990. – С. 72–73.
8. 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.
9. Изготовление зубчатых колес с арочными зубьями с применением пальцевых фрез / В.Д. Плахтин, А.П. Давыдов, А.Н. Паршин // Технология машиностроения. – 2008. – № 6 – С. 12–15.
10. Равська Н.С., Воробйов С.П. Відхилення профілю зуба арочного колеса від евольвентного при формуванні торцевими різцевими головками / Зб. наук. пр. «Вісник національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»», серія Машинобудування. – 2014. – № 70. – С. 19–24.

MORPHOGENESIS OF CYLINDRICAL ARCH GEARS WITH INVOLUTE PROFILES OF DIFFERENT METHODS

S. Vorobyov

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"

vul. Borshhagiv's'ka, 115/3, 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: vorobyov_sp@ukr.net

Purpose. The aim is to provide the high productivity and precision manufacturing of cylindrical arched gear on the basis of study of their morphogenesis on CNC machines by different techniques. **Methodology.** Various methods of morphogenesis the arched cylindrical gears were considered, to ensure involute profile of the teeth in the butt-end sections on the gear width. It is shown that these methods of morphogenesis involute profile in the butt-end section are unproductive or require special cutting head with a planetary gear, and for each radius of curvature of the arch of the tooth it is necessary an appropriate radius cutter head. **Results.** It is provided methods of cutting wheels of the cutting

head, a method of running-in and copying on CNC machines with additional displacements. The analytic dependence for determining the values of these displacements along the axes of the coordinate axes and rotation angles on the CNC machines is shown. Calculation of values for the initial data allows to estimate them for each of the methods and to select more productive. **Originality.** For the first time it is proposed methods to cut the accurate arched gears with involute profile incisal usual heads with the establishment of shaped cutters or cutter with angle profile nonzero on CNC machines. **Practical value.** The formula for calculating the displacements and angles of rotation axes allows to write a control program for CNC machines for cutting gears incisal arched heads. References 11, figures 3.

Key words: morphogenesis, arched, involute, methods, displacements.

REFERENCES

1. Beljaev, A.I., Siricyn, A.I., Siricyn, D.A. (1997) "Test results wheel arched of teeth for wear and flexural fatigue resistance", *Vestnik mashinostroenija*, no 1, pp. 6–8.
2. Vinogradov, A.N., Davydov, A.P., Lipatov, S.I., Margolit, R.B., Pankov, I.G., Parshin, A.N. (2011), "Involute arched transmission", *Mezhotraslevoj al'manah delovaja slava rossii*, no. 31, pp. 42–45.
3. Malikov, A.A. (2008), "Structurally-technological advantages of cylindrical gears with arched teeth", *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, no. 1, pp. 198–205.
4. Beljaev, A.I., Emel'janov, Ju.V. (1994), "Tractive arch involute spur gear of locomotives", *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta*, no. 2, pp. 41–45.
5. Beljaev, A.I., Siricin, A.I., Siricin, D.A. (1997), "Features of production and application of high-precision gears arched traction", *Vestnik mashinostroenija*, no. 1, pp. 3–6.
6. Rodin, P.R., Polevoj, V.I. (1990), "Tools for cutting cylindrical gears with cycloidal shape along the length of the teeth", *Povyshenie jeffektivnosti proizvodstva mashinostroitel'nyh predpriyatij. Tezy doklada respublikanskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, [Improving the efficiency of the production of machine-building enterprises. Abstracts of republican Sci.-Tech. conference report], Dushanbe, Tadzhiк nauchno-issledovatel'skij institut nauchno-tehnicheskoy informacii, 1990, pp. 112–113.
7. Rodin, P.R., Polevoj, V.I. (1990), "Cutting head for cutting cylindrical gears with a cycloid shape along the length of the teeth", *Puti povyshenija stojkosti i nadezhnosti rezhushhih i shtampovyh instrumentov. Tezy doklada vsesojuznoj nauchno-tehnicheskoy konferencii* [Ways to improve the durability and reliability of cutting and punching tools. Abstracts of All-Union Sci.-Tech. Conference], Nikolaev, Vsesojuznyj nauchno-issledovatel'skij institut tehnologii sudovogo mashinostroenija "Sirius", 1990, pp. 72–73.
8. Plahtin, V.D., Davydov, A.P., Parshin, A.N. (2007), "Parameters dactylar milling and machine tool of gearing in the manufacture of gears with arched teeth", *Problemy mashinostroenija i avtomatizacii*, no 4, pp. 95–102.
9. Plahtin, V.D., Davydov, A.P., Parshin, A.N. (2008), "Making gears with arched teeth using fingerholes mills", *Tehnologija mashinostroenija*, no. 6, pp. 12–15.
10. Rav'ska, N.S., Vorobjov, S.P. (2014), "Departure tooth profile arched gear of involute in the shaping of butt-end chisel heads", *Journal of Mechanical Engineering the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"*, no. 70, pp. 19–24.

Стаття надійшла 01.04.2016.