

## АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ ТА ЇХ ПРОГРЕСИВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

© Настасенко В. О., 2016

Робота належить до сфери машинобудування та інструментального виробництва, зокрема – виробництва черв'ячних фрез та шеверів для обробки ними зубчатих коліс. Головною метою роботи є аналіз умов підвищення продуктивності черв'ячних фрез і розроблення на цій основі їх удосконалених конструкцій та нових способів і технологій їх виробництва.

**Ключові слова:** зубчасті колеса, фреза, підвищення продуктивності.

The work relates to the field of mechanical engineering and tool production, in particular – the production of worm mills for processing their gears. Constantly growing demands for increased productivity, accuracy and quality of processing gears require corresponding improvement worm cutters. The main goal of this work is to analyze the conditions for increasing productivity worm mills and on this basis the development of improved designs and new methods and technologies for their production.

**Key words:** gears, mill, increased productivity.

**Постановка проблеми.** Робота належить до сфери машинобудування та інструментального виробництва, зокрема – виробництва черв'ячних фрез та шеверів для обробки ними зубчатих коліс.

Черв'ячні зуборізні фрези є одними з найпоширеніших зуборізних інструментів, що зумовлено: 1) їх порівняно високою продуктивністю; 2) точністю; 3) поширенням зубофрезерних верстатів, які використовують для їх роботи [1], які простіші та дешевші, порівняно з іншими зуборізними верстатами. Черв'ячні шевери використовують здебільшого для обробки черв'ячних коліс і майже не використовують для обробки циліндричних зубчастих коліс [1], оскільки вони значно складніші у виготовленні за дискові шевери, у яких високу продуктивність забезпечує можливість практично необмеженого (у більшості випадків зубообробки) збільшення їх діаметра та кількості зубців, а також можливість простішого, порівняно зі збірними черв'ячними шеверами, конструктивного і технологічного оснащення їх зубцями із твердосплавних інструментальних матеріалів.

Однак постійне зростання вимог до підвищення продуктивності, точності та якості обробки зубчатих коліс потребує відповідного удосконалення черв'ячних фрез та шеверів. Тому актуальність проблеми теж постійно зростає, що потребує її вирішення.

**Аналіз стану проблеми.** Як новий вид інструменту, черв'ячні фрези були винайдені в Англії, в 1856 р. [2]. Вони мали зубці, які розташовані на гвинтовій циліндричній поверхні, ріжуча кромка яких сформована при перетині радіальної передньої поверхні з нульовим переднім кутом і задньої поверхні, затилованої за архімедовою спіраллю. У ХХ ст. у них з'явилися: покращена геометрія ріжучого клина (у фрез з швидкорізальних сталей – позитивні [3], а з твердосплавних матеріалів – негативні [4] передні кути), криволінійна форма передньої поверхні [5, 6], незатиловані поворотні рейки для фрез збірних конструкцій [7], прогресивна схема різання вершинною і бічними ріжучими кромками [8], нульові кути профілю [9] та інші удосконалення. Але конструкція високоточних фрез так і залишилася традиційною – на базі циліндричних поверхонь, з 10–14 рейками, а використання твердого сплаву – обмежене в основному для чистової обробки загартованих коліс або з великою кількістю зубців і великого модуля, оскільки висока вартість фрез робить нерентабельним їх використання для чорнової обробки незагартованих зубчастих коліс модуля 2–5 мм з найпоширенішою кількістю зубців – від 14 до 60.

Відхід від традиційних конструкцій зумовили гіперболоїдні фрези [10], які можна вважати зуборізними інструментами ХХІ ст., оскільки у них з'явилася можливість суттєвого збільшення кількості заходів (до 9) [11] та кількості зубців на один виток (до 90) [12]. Поява таких фрез

зумовлена працями [13–15], однак подальший розвиток робіт у цьому напрямі потребує детальнішого аналізу їх продуктивності та розроблення для них прогресивних конструкцій.

Отже, головною метою роботи є аналіз умов підвищення продуктивності черв'ячних фрез і розроблення на цій базі їх удосконалених конструкцій та нових способів і технологій їх виробництва.

Об'єктом дослідження є шляхи підвищення продуктивності черв'ячних фрез і шеверів та конструкції зуборізних інструментів, які їх реалізують.

Предметом дослідження є пошук і розроблення найефективніших видів і конструкцій черв'ячних фрез з великою кількістю заходів і зубців та технологій їх виробництва.

Вирішення цих проблем в умовах сучасного виробництва є актуальним, оскільки дає змогу забезпечити дедалі більші вимоги до підвищення продуктивності, точності та якості обробки зубчатих коліс.

Практичну значущість роботи визначає розв'язання задачі найефективнішого підвищення продуктивності черв'ячних фрез і створення найпростіших та ефективних їх конструкцій, а також технологій їх виробництва та експлуатації, що забезпечує широкі можливості для їх швидкого і найпростішого впровадження.

**Шляхи вирішення поставлених проблем.** Проблема підвищення продуктивності черв'ячних фрез є спірною [16, 17], особливо для коліс великих модулів і кількості зубців, що пов'язано як зі стійкістю фрез, так і з можливостями обертання столів використовуваних для них зубофрезерних верстатів [16, 18]. Однак використання твердого сплаву і зуборізних верстатів з ЧПК з електронним узгодженням відокремлених рухів обертання черв'ячної фрези і стола верстата, дають змогу ефективно вирішити вказані проблеми, що підтверджує збільшення перспектив поширення твердо-сплавних черв'ячних фрез, шеверів і черв'ячної зубообробки. Другою їх перевагою порівняно зі спрощеними методами обробки [19] є висока точність, особливо для зубчастих коліс з евольвентним профілем, найменш чутливим для похибок монтажу міжцентрової відстані зубчастих пар.

Підвищення продуктивності ( $\Pi$ ) обробки зубчатих коліс черв'ячними фрезами передбачене в загальномашинобудівних нормативах режимів різання [20], як зворотна величина основного машинного часу  $t_{o.m.}$  у межах залежності:

$$\Pi = \frac{1}{t_{o.m.}} = \frac{s_{об.см.} n_{\phi} k_z}{(l_{вр.} + l_p + l_{пер.}) z_k} (xv^{-1}) \quad (1)$$

де  $l_{вр.}$ ,  $l_{пер.}$  – довжина врізання і перебігу, мм;  $l_p$  – довжина різання, мм;  $z_k$  – кількість зубців колеса;  $s_{об.см.}$  – подача на оборот стола верстата, мм/об;  $n_{\phi}$  – частота обертання фрези, об/хв;  $k_z$  – кількість заходів фрези.

Однак її аналіз показав, що продуктивність  $\Pi$  може бути нескінченною, залежно від збільшення величин  $s_{об.см.}$ ,  $n_{\phi}$ ,  $k_z$ , що не відповідає реальній дійсності, тому потрібне усунення цих недоліків.

Якщо  $n_{\phi} = \frac{1000}{\pi D_{аф.}} (xv^{-1})$ ,  $l_{пер.} = 2 \dots 5$  мм,  $l_{вр.} = \sqrt{2,2m(D_{аф.} - 2,2m)}$  (мм), які наведені в роботі

[20], отримаємо нову залежність (2), в якій продуктивність  $\Pi$  є величиною, що залежить від подачі на зуб фрези  $s_{\phi}$ , кількості її рейок  $z_{\phi}$ , швидкості різання  $v$ , зовнішнього діаметра фрези  $D_{аф.}$ , модуля  $m$  і довжини різання  $l_p$ :

$$\Pi = \frac{1000 s_z z_{\phi} v}{\pi D_{аф.} (l_{\phi} + \sqrt{2,2m(D_{аф.} - 2,2m)} + 2 \dots 5)} \quad (2)$$

Однак і ця залежність не повною мірою пояснює можливість збільшення продуктивності, оскільки не враховує стійкість  $T$  фрез, яка обумовлена залежністю (3) [20]:

$$v_{\phi} = \frac{C_v}{T^{0,3} s_{об.см.}^{0,5} m^{0,1} HB^{1,25}} (M \cdot xv^{-1}), \quad (3)$$

де  $v_{\phi}$  – швидкість різання, м/хв;  $C_v$  – нормативний коефіцієнт швидкості різання;  $s_{об.см.}$  – подача на оборот стола верстата, мм/об;  $m$  – модуль, мм,  $HB$  – твердість матеріалу виробу.

З урахуванням залежності (3), із (2) випливає, що для зниження  $T$  удвічі достатньо:

- 1) підвищення швидкості різання  $v_{\phi}$  в 1,26 разу;
- 2) підвищення подачі  $s_z$  – в 1,43 разу.

Збільшення кількості рейок  $z_{\phi}$  адекватно підвищує стійкість за рахунок зменшення товщини зрізу, але за незмінного зовнішнього діаметра фрези сильніше зменшується кількість переточок зубців, що збільшує витрати фрез.

Це накладає відповідні обмеження на зростання  $\Pi$ . Однак, щоб не допустити зниження  $T$ , можлива комбінація вказаних параметрів. Якщо  $T = const$ , з рівняння (3) випливає, що підвищення у  $n$  разів швидкості різання  $v_{\phi}$  потребує зниження подачі  $s_{об.см.}$  у  $n^2$  разів:

$$v_{(n)} = nv_{(c)},$$

$$s_{об.см.(n)} = \frac{s_{об.см.(c)}}{n^2},$$
(4)

де індекси (н) і (с) – відповідно позначають нове і старе значення цього параметра.

Підставивши значення (4) у рівняння (2), за інших рівних параметрів отримаємо не зростання, а зменшення продуктивності  $\Delta\Pi_v$ :

$$\Delta\Pi_v = \frac{\Pi_{v(n)}}{\Pi_{v(c)}} = \frac{nv_{(c)}}{v_{(c)}} \times \frac{s_{об.см.(c)}}{n^2 s_{об.см.(c)}} = \frac{1}{n} \text{ (разів)}. \quad (5)$$

Підвищення у  $n$  разів подачі  $s_{об.см.}$  менш сильно знижує стійкість і за  $T = const$  може бути компенсоване зниженням швидкості різання  $v$  в  $\sqrt{n}$  разів:

$$s_{об.см.(n)} = ns_{об.см.(c)},$$

$$v_{(n)} = \frac{1}{\sqrt{nv_{(c)}}}. \quad (6)$$

Підставивши значення (6) у рівняння (2), за інших рівних параметрів, отримаємо підвищення продуктивності  $\Delta\Pi_s$ :

$$\Delta\Pi_s = \frac{\Pi_{s(n)}}{\Pi_{s(c)}} = \frac{ns_{об.см.(c)}}{s_{об.см.(c)}} \times \frac{v_{(c)}}{\sqrt{nv_{(c)}}} = \sqrt{n} \text{ (разів)} \quad (7)$$

У стандартних фрез збільшення у  $n$  разів кількості рейок  $z_{\phi}$  зменшує кількість переточувань в  $(n^2 - 1)$  разів, але збільшує стійкість  $T$  у  $n$  разів, що за  $T = const$  дає змогу підвищити подачу  $s_{об.см.}$  у  $n$  разів:

$$z_{\phi(n)} = nz_{\phi(c)},$$

$$s_{об.см.(n)} = ns_{об.см.(c)}. \quad (8)$$

За інших рівних умов отримаємо зростання продуктивності:

$$\Delta\Pi_z = \frac{\Pi_{z(n)}}{\Pi_{z(c)}} = \frac{nz_{(c)}}{z_{(c)}} \times \frac{ns_{об.см.(c)}}{s_{об.см.(c)}} = \frac{n^2}{n^2 - 1} \text{ (разів)}. \quad (9)$$

Збільшення у  $n$  разів зовнішнього діаметра фрези  $D_{af}$  приводить до збільшення довжини шляхів врізання і перебігу, до зростання габаритів фрез та верстата і потужності, що витрачається на різання. Оскільки у формулу (2) входить довжина різання  $l_p$ , яка залежить від конкретних умов обробки і не може бути точно врахована в узагальненій залежності, то зміна продуктивності віднесена тільки до ділянок врізання і перебігу, що в разі оброблення виробів у пакеті по  $N$  штук зменшується в  $N$  разів і становитиме:

$$\Delta\Pi_{D_{a.\phi(n)}} = \frac{\Pi_{D_{a.\phi(n)}}}{\Pi_{D_{a.\phi(c)}}} = \frac{1}{n + \sqrt{n}} - \frac{nD_{a\phi(c)}}{D_{a\phi(c)}} = \frac{1}{n + \sqrt{n}} - n \quad (10)$$

У разі зубообробки одиничних виробів цей шлях призводить до найбільшого зниження продуктивності, тому найдоцільніше збільшення зовнішнього діаметра поєднувати зі збільшенням кількості рейок фрези, вплив яких на  $\Pi$  розглянуто вище в залежності (9).

На основі залежності (2) зростання модуля  $m$  зменшує продуктивність, оскільки збільшує глибину різання і об'єм металу, що видаляється із западини. Але його вплив також неоднозначний,

оскільки пов'язаний зі збільшенням діаметра фрези і залежними від цього показниками стійкості та міцності. А їх величина залежить від конкретних умов обробки і не може бути точно врахована в узагальненій залежності, тому в цій роботі  $m$  визнано таким, що зменшує продуктивність, але  $\Delta\Pi_m$  не конкретизується.

Отже, якщо  $T = const$ , реальний вплив на продуктивність відображає схема (11), де  $\uparrow$  – чинники, що збільшують, а  $\downarrow$  – що зменшують продуктивність  $\Pi$ :

$$s_{об.см.} \uparrow z_f \uparrow D_{af} \uparrow m \downarrow l_{вр.} \downarrow l_p \downarrow l_{нер} \downarrow. \quad (11)$$

Найдоцільнішим для підвищення продуктивності зубофрезерування є збільшення подачі  $s_{об.см.}$ , однак тоді обмежувальним чинником стає хвилястість зубообробки (висоти макронерівностей у напрямку осьової подачі фрези по дузі виходу вершин її зубців). Оскільки зменшити ці чинники дають змогу збільшення кількості зубців і заходів фрези, саме вони є головними факторами для збільшення продуктивності зубообробки.

Однак збільшення кількості заходів автоматично веде до збільшення швидкості обертання стола верстата і пов'язаного з цим збільшення частоти обертання фрези або її швидкості  $v_f$ . Отже, коло впливових факторів замикається – реальне підвищення продуктивності черв'ячних фрез можливе тільки у разі переходу до твердосплавних інструментальних матеріалів, які мають великі швидкості різання, і до багатозахідних багатозубих конструкцій фрез.

**Розроблення нових конструкцій черв'ячних фрез** Збільшити кількість заходів до 7, а зубців – до 90 на 1 виток, без збільшення зовнішнього діаметра фрези, дають змогу пружинно-пластинчасті конструкції черв'ячних фрез, що запропоновані в патенті РФ № 2134183 [21], схема яких показана на рис. 1. Симетричне виконання на верхній і нижній частинах пластин профілів ріжучих зубців з висотою головки  $h_a$  та ніжки  $h_f$  дозволяє виконувати чотири перестановки, а за наявності заднього кута  $\alpha_{бок} > 0^\circ$  – тільки дві перестановки, але поліпшення умов різання веде до збільшення стійкості зубців, що в сумі адекватно чотирьом переточкам переточуваних фрез.

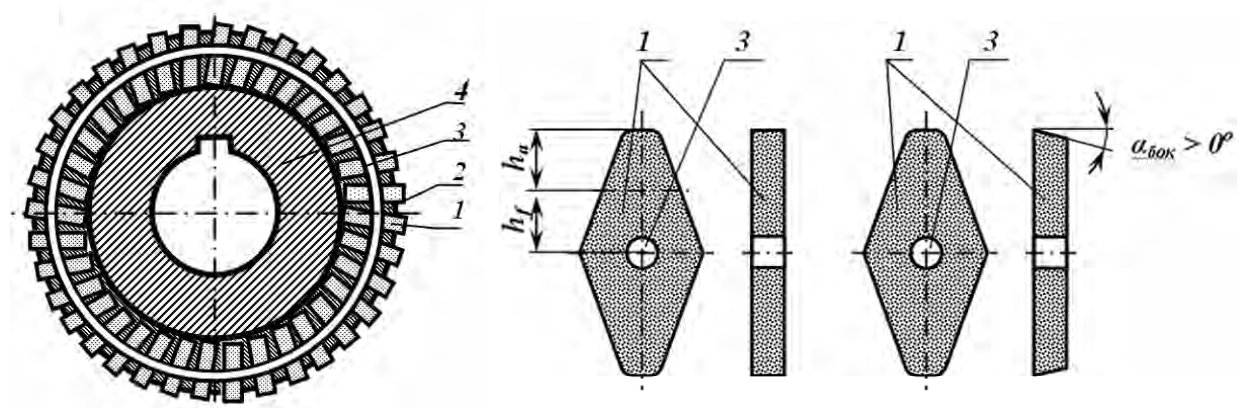


Рис. 1. Збірна черв'ячна фреза з переточуваними ріжучими пластинами 1 та клиновими вставками 2, які начеплені своїми отворами на пружину 3 і введені в канавки між витками її корпусу 4

Проте недоліком цих інструментів є потреба у виконанні високоточного отвору в пластинах, що обмежує їх мінімальні розміри, здорожчує їх виробництво та ускладнює технологічні процеси складання.

Усуває ці недоліки конструкція черв'ячних фрез, що запропонована в заявці на патент України [22]. Відмінністю їх від базових [21] є розміщення кріпильних пружин між витками, зібраними з ріжучих пластин і клинових вставок (рис. 2).

Аналіз пружинно-пластинчастих черв'ячних зуборізних інструментів показав, що їх застосування найдоцільніше для багатозахідних циліндричних конструкцій, оскільки для гіперболоїдних фрез клинові вставки повинні бути індивідуальними у кожному витку, в яких кут і ширина клина змінюється від середнього перетину фрези до її торців, і від зміщення зубців рейки в межах першого заходу в кожному з  $n$  заходів.

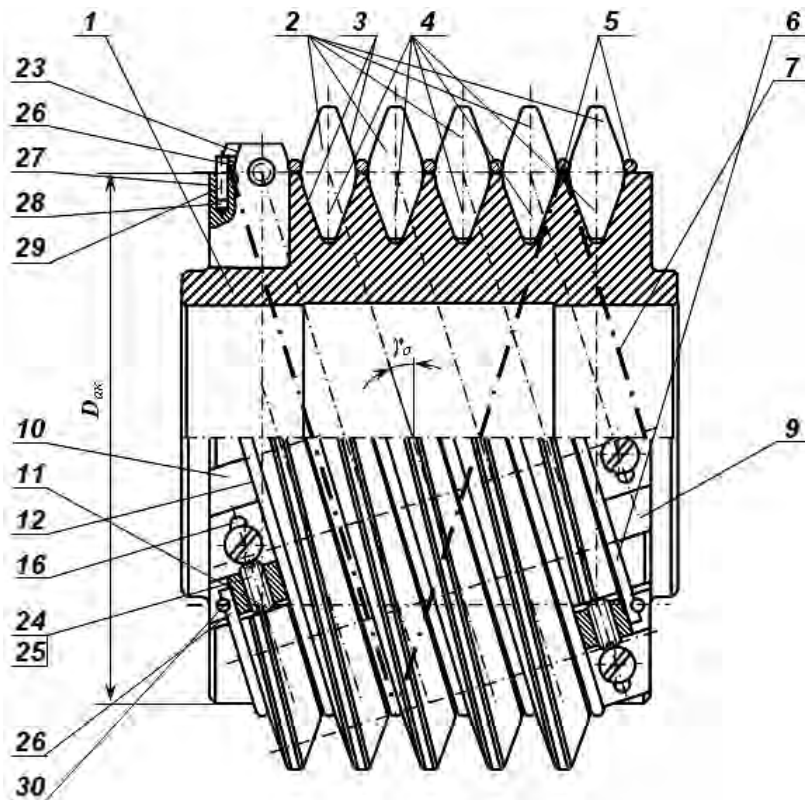


Рис. 2. Збірна черв'ячна фреза з пружинним кріпленням ріжучих пластин і клинових вставок між витками її корпусу

Найдоцільніша заміна пропонуваними пружинно-пластинчастими черв'ячними інструментами черв'ячних шеверів, оскільки їх клинові вставки замінюють бічні канавки на витках черв'яка, а різальні пластини – різальні кромки. Враховуючи, що кількість канавок у базових шеверів велика, відсутність потреби їх виготовлення струганням значно спрощує технологічний процес. Окрім того, відомі шевери виготовляють з швидкорізальних сталей, тому застосування твердих сплавів істотно підвищує різальні властивості запропонованих шеверів. У міру їх зносу замінюються лише різальні пластини, багаторазово використовують вставки і корпус. Для підвищення точності запропонованого шевера після складання необхідне шліфування бічних сторін його витків. Якщо раніше застосування шеверів обмежувалося обробкою черв'ячних зубчатих коліс, то запропоновані шевери, враховуючи зниження трудомісткості їх виробництва і обслуговування, дають змогу застосовувати їх також для чистової обробки циліндричних зубчатих коліс з будь-яким профілем зубців. Розроблена методика проектування цих інструментів та їх САПР.

### Загальні висновки

1. Реальні можливості підвищення продуктивності черв'ячних зуборізних інструментів забезпечує використання твердих сплавів, збільшення кількості їх заходів і зубців, реалізувати їх можуть тільки багатозубі системи, з яких найефективніші пружинно-пластинчасті конструкції.

2. Серед пружинно-пластинчастих черв'ячних зуборізних інструментів найдоцільніші конструкції, які забезпечують кріплення у витках корпусу черв'яка комплектів пластин, що чергуються з клиновими вставками між ними, з введенням зовнішніх пружин у западини між витками і бічними сторонами в рядках сусідніх пластин.

3. Застосування пружинно-пластинчастих конструкцій черв'ячних зуборізних інструментів доцільніше для циліндричних багатозахідних фрез, оскільки для гіперболоїдних конструкцій потрібно виконати велику кількість клинових вставок індивідуальних розмірів, що істотно ускладнює і здорожчує їх виготовлення і експлуатацію.

4. Найдоцільніші запропоновані пружинно-пластинчасті конструкції для гіперболоїдних черв'ячних шеверів, оскільки значно підвищують їх точність та продуктивність за великої кількості зубців і заходів, не потрібно і трудомісткого додання великої кількості бічних стружкових канавок.

1. Производство зубчатых колес: справочник / С. Н. Калашиников, А. С. Калашиников, Г. И. Коган и др.; под общ. ред. Б. А. Тайца. – М.: Машиностроение. 1990. – 464 с. 2. Родин П. Р. Основы проектирования режущих инструментов: учебник / Родин П. Р. – К.: Вища шк., 1990. – 424 с. 3. Иноземцев Г. Г. Червячные фрезы с рациональными геометрическими и конструктивными параметрами / Иноземцев Г. Г. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1961. – 224 с. 4. Моисеенко О. И. Твердосплавные зуборезные инструменты / Моисеенко О. И., Павлов Л. Е., Диденко С. И. – М.: Машиностроение, 1977. – 190 с. 5. Юдин А. Г. Анализ точности профилирования червячных модульных фрез с передней поверхностью, образованной сферой / Юдин А. Г., Михайлова О. В. // Резание и инструмент: республ. межвед. науч. сб. – Харьков: Основа, 1987. Вып. 38. – С. 88–94. 6. Сергиенко Е. П. Расчет исходных параметров передней поверхности зубьев фрез, заданных кривыми второго порядка / Сергиенко Е. П., Настасенко В. А., Гончаренко Л. С. // Исследование зубообрабатывающих станков и инструментов: Межвуз. науч. сб. – Саратов: СПИ, 1981. – С. 64–69. 7. Шевченко А. Н. Современный зарубежный зуборезный инструмент. Обзор / Шевченко А. Н. – М.: НИИМаши. 1976. – 56 с. 8. Медведицков С. Н. Высокопроизводительное зубонарезание фрезами / Медведицков С. Н. – М.: Машиностроение, 1981. – 104 с. 9. Сидоренко А. К. Червячные фрезы: Опыт НКМЗ / Сидоренко А. К. – М.: Машиностроение, 1980. – 83 с. 10. Настасенко В. А. Червячные фрезы XXI века / Настасенко В. А. // Прогрессивные технологии машиностроения и современность: междунар. науч.-техн. конф. – Севастополь, 1997. – С. 176–177. 11. Настасенко В. А. Зубонарезание многозаходными червячными фрезами как альтернатива зубопротягиванию / Настасенко В. А. // СТИН. – 2001. – № 1. – С. 27–31. 12. Настасенко В. А. Новая концепция повышения точности червячных зуборезных инструментов / Настасенко В. А. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – Вып. 17. – С. 109–114. 13. Настасенко В. А. Дополнительный анализ возможности повышения производительности зубофрезерования увеличением числа заходов фрезы / Настасенко В. А. // Вестник машиностроения. – 1996. – № 1. – С. 38–40. 14. Настасенко В. А. Оценка производительности однозаходных и многозаходных червячных фрез в условиях повышения режущих свойств / Настасенко В. А. // Современные проблемы и методология проектирования и производства силовых зубчатых передач: сб. науч. трудов. – Тула: ТГУ. 2000. – С. 148–151. 15. Настасенко В. А. Опыт изготовления пружинно-пластинчатых червячных зуборезных инструментов / Настасенко В. А. // Прогрессивные технологии машиностроения: международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – Вып. 13. – С. 27–32. 16. Тернюк Н. Э. Основы комплексной оптимизации систем для производства зубчатых колес: дисс. ... д-ра техн. наук / Тернюк Н. Э. – Харьков. 1983. – 428 с. 17. Снегирев А. И. Анализ возможности повышения производительности зубофрезерования увеличением числа заходов фрезы / Снегирев А. И. // Вестник машиностроения. – 1992. – № 1. – С. 39–40. 18. Новому поколению червячных фрез – новое поколение зубофрезерных станков // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов IX Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе. – Донецк, ДонГТУ, 2002, т. 2. – С. 164–169. 19. Грицай І. Є. Зубчасті передачі синусоїдального зачеплення і новітня технологія їх виготовлення / Грицай І. Є. // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XII Междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе. – Донецк: ДонГТУ, 2005. – Т. 1. – С. 230–234. 20. Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на металло-режущих станках. Ч. 2. Зуборезные, горизонтально-расточные, резьбонакатные и отрезные станки. – М.: Машиностроение, 1974. – 200 с. 21. Патент РФ № 2134183. МПК В23 F 21/16. Червячный инструмент. Авт. изобр. Настасенко В. А. Заявка № 98100805/08 от 15.01.98 // БИ. № 22 от 10.08.99. 22. Заявка на патент України на винахід. МПК В23 F 21/16. № 2013 09603 Від 01.08.2013 р. Збірний багатозаходний черв'ячний зуборізний інструмент та змінні поворотні непереточувані пластини для його оснащення / Авт. заявки Настасенко В. О.