

УДК 621.923.9

А. О. ГНАТЮК

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ТОЧНОСТІ ПРИ ШЛІФУВАННІ ПРОФІЛЮ ЦІВКОВОГО КОЛЕСА ГЕРОТОРНОЇ ПАРИ В УМОВАХ ПЛАНЕТАРНОГО ОБКАТУ

В роботі представлено дослідження залежності параметрів точності внутрішнього профілю цівкового колеса героторної пари від технологічних факторів, отриманих в ході реалізації методу шліфування колеса в умовах планетарного обкату. Обробка здійснювалась абразивними інструментами з різною формою профілю. Залежність отримана у вигляді поліноміальної моделі, в ході здійснення програми ротатбельного плану другого порядку. У відповідності з отриманими моделями, побудовані поверхні відгуку, локалізовані області оптимуму, в яких досягається найменше значення відхилень. Експериментально визначена стійкість інструментів, розроблені рекомендації щодо застосування різних типів геометрії профілю інструментів. За отриманими показниками обробки, зроблено висновок щодо прийнятності впровадження методу шліфування у виробництво. Створено передумови конструктивної реалізації методу обробки на універсальному технологічному обладнанні.

Ключові слова: цівкове колесо, героторна пара, метод шліфування, планетарний обкат, точність.

В работе представлено исследование зависимости параметров точности внутреннего профиля цевочного колеса героторной пары от технологических факторов, полученных в ходе реализации метода шлифования колеса в условиях планетарной обкатки. Обработка осуществлялась абразивными инструментами с разной формой профиля. Зависимость получена в виде полиномиальной модели, в ходе осуществления программы ротатбельного плана второго порядка. В соответствии полученным моделям, построены поверхности отклика, локализованные области оптимума, в которых достигается наименьшее значение отклонений. Экспериментально определена стойкость инструментов, разработаны рекомендации по применению различных типов геометрии профиля инструментов. По полученным показателям обработки, сделан вывод о приемлемости внедрения метода шлифования в производство. Созданы предпосылки конструктивной реализации метода обработки на универсальном технологическом оборудовании.

Ключевые слова: цевочное колесо, героторная пара, метод шлифования, планетарный обкат, точность.

The paper presents research correlation of precision parameter of internal profile in bobbin wheel of gerotor, from technological factors, obtained in the course of gear generating grinding method. Grinding was carried out using abrasive tools with a different shape of the profile. Correlation was obtained in the form of a polynomial model, of second order rotatable plan program. According obtained models, was constructed response surface, localized optimum area in which is reached the lowest value deviations. Experimentally determined resistance of tools, developed recommendations for the use of different types of tool profile geometry. According to figures obtained by processing the conclusion of the admissibility of the introduction in manufacturing of the grinding method. Created the preconditions of constructive implementation of the processing method on the universal process equipment.

Keywords: bobbin wheel, gerotor, grinding method, planetary gear generation, precision.

Вступ. Зачеплення героторної пари на сьогоднішній день знайшло широке застосування в різних гідравлічних машинах – насосах, героторних гідромоторах, насосах-дозаторах, а також машинах і механізмах, де необхідно досягти високих передаточних відношень. Зачеплення утворюють два колеса – внутрішній сателіт із зовнішнім зубчатим вінцем і зовнішнє цівкове колесо із внутрішнім зубчатим вінцем і кількістю зубців на один більше, ніж у сателіта. Зубчатий профіль сателіта окреслений еквідистантою до вкороченої епіциклоїди [9], профіль цівкового колеса окреслений масивом дуг постійного радіусу (цівками). Зубчатий профіль сателіта є більш технологічний у виготовленні, оскільки не перешкоджає доступу різального інструменту. Внутрішній профіль цівкового колеса є менш технологічний, має місце ускладнений доступ різального інструменту до оброблюваної поверхні. Розміри інструменту обмежені діаметром внутрішнього профілю, що впливає на його жорсткість. Враховуючи високу точність виготовлення робочих профільних поверхонь коліс, актуальними є розробки і дослідження методів кінцевої фінішної обробки нетехнологічного профілю цівкового колеса. Бажано щоб обробка здійснювалась в умовах обкату, при якому досягаються найбільш висока точність і ефективність зубообробки.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз патентної та науково-технічної літератури показує, що для обробки внутрішнього профілю цівкового колеса, який окреслений цівками постійного радіусу або обвідною

сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд, існує ряд специфічних методів і засобів для їх здійснення [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]. Для реалізації деяких з них застосовується дуже дорогі спеціалізовані верстати, для ряду інших – спеціальний складний інструмент та оснастка. Окрім лезової та абразивної обробки, існують методи вирізання на електроерозійних верстатах та спікання з порошкових матеріалів. Порошкова металургія посіла провідне місце у світовому обсязі виробництва коліс героторної пари. Водночас такий метод має суттєві недоліки, а саме:

- точність деталей лежить в межах 12-9 квалітету (за умови повторного пресування в калібруючих прес-формах);

- низька гнучкість методу, недоцільність його застосування в серійному виробництві.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. При високій твердості деталі (близько 60 HRC), частина з відомих методів виявляється непридатною для застосування. Сюди відносяться методи зубодовбання багатозубими і однозубими довбачами [6, 8]. Відсутні методи обробки, які б відрізнялись простотою інструменту, його відносною дешевизною, з можливістю швидкого відновлення ріжучих властивостей. Також серед розглянутих методів обробки практично відсутня інформація щодо оціночних показників (точність, шорсткість), які досягаються при здійсненні того чи іншого методу. Для удосконалення процесу фінішної обробки цівкового колеса героторної пари, розроблена альтернативна

© О.А. Гнатюк, 2017

прогресивна схема шліфування його внутрішнього профілю, в умовах планетарного обкату [9].

Метою даної статті є дослідження показників точності профілю цівкового колеса, отриманих після шліфування в умовах планетарного обкату. Отримані в ході дослідження дані, дозволять зробити висновок про доцільність впровадження методу шліфування [9] у виробництво.

Викладення основного матеріалу дослідження. Сутність обробки профілю цівкового колеса, описаного в патенті [9], пояснюється рис. 1, де схематично зображено зачеплення коліс 1 і 2. На цій же схемі представлений один із варіантів здійснення цівковим колесом руху обкату. Для забезпечення такого руху, центроїда 4 радіусом R , яка жорстко пов'язана із колесом 2, обкатується без ковзання по зовнішній стороні центроїди 3 радіусом r , яка пов'язана із нерухомим сателітом 1. В процесі обкату, центр центроїди 4 описує колову траєкторію 5. Швидкість обкату задається вхідною частотою ($n_{вх}$) обертання центру центроїди колеса по коловій траєкторії, відносно центру нерухомої центроїди. Одночасно колесо 2 здійснює обертальний рух навколо миттєвої вісі з частотою $n_{вих}$, яка пов'язана із частотою $n_{вх}$ співвідношенням:

$$n_{вих} = n_{вх} / z_2 \quad (1)$$

де z_2 – число зубців цівкового колеса, $z_2 = z_1 + 1$;

z_1 – число зубців сателіта.

Під час обробки, сателіт замінюється ріжучим інструментом, який утворює з оброблюваним профілем колеса 2 верстатне зачеплення. На цій же схемі представлені основні конструктивні параметри для побудови зачеплення – радіуси центроїд, ексцентриситет зачеплення e , радіус центрів цівок $R_{цв}$, радіус цівки $r_{ц}$.

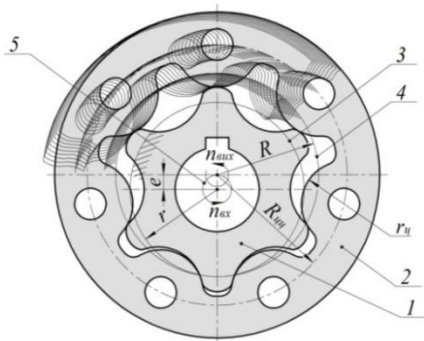


Рис. 1 – Схема обкату цівкового колеса навколо нерухомого сателіта: 1 – сателіт; 2 – цівкове колесо; 3 – центроїда сателіта; 4 – центроїда цівкового колеса; 5 – траєкторія, описана центром колеса в процесі обкату

Необхідною умовою обкату є дотримання наступного співвідношення:

$$r/R = e \cdot z_1 / e \cdot z_2 \quad (2)$$

Реалізувати представлену на рис. 1 схему, можливо за допомогою спеціальних пристосувань [1, 5], або на верстаті з ЧПУ, поєднавши колову інтерполяцію і обертання колеса навколо програмованої вісі С. Майбутньому інструменту для здійснення процесу

формоутворення, необхідно частково або повністю надати елементи геометрії спряженого взаємоогинаемого профілю. Такими елементами можуть бути випуклі та увігнуті ділянки профілю сателіту.

Принцип проектування інструментів і фрагмент оснастки для здійснення методу шліфування [9], представлені на рис. 2.

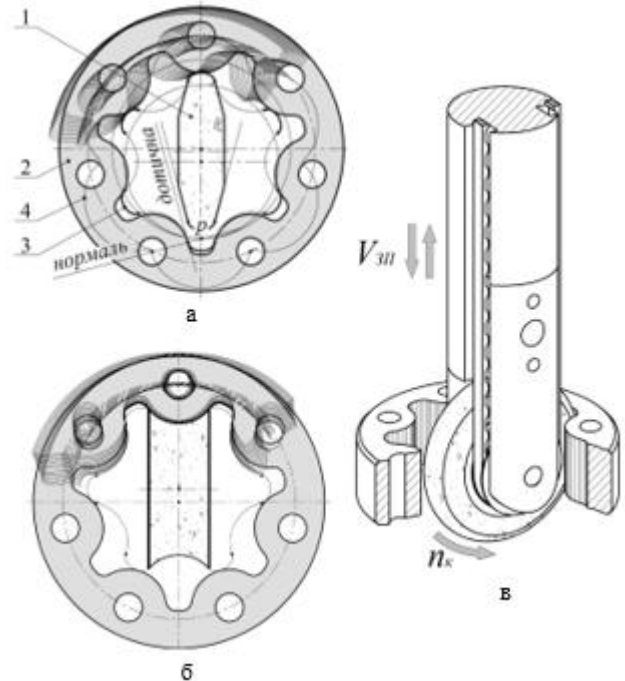


Рис. 2 – Шліфувальні круги для здійснення обробки цівкового колеса в умовах планетарного обкату: а – круг з випуклою формою профілю; б – круг з увігнутою формою профілю; в – круг встановлений в оправці і рухи для здійснення процесу шліфування

Для профілювання круга 1 з випуклою формою профілю (див. рис. 2, а), використовується ділянка еквідистанти 4 до епіциклоїди 3, яка обмежена двома сусідніми точками контакту з цівковим колесом 2. При цьому полюс зачеплення центроїд p , лежить на вертикальній вісі симетрії і через нього проходить спільна нормаль до епіциклоїди 3 і її еквідистанти 4.

Увігнута ділянка (див. рис. 2, б), утворюється відтинанням випуклих ділянок, що використовуються в попередній схемі на рис. 2, а. В кінцевих точках увігнутого профілю, необхідно виконати округлення, із-за низької стійкості гострих абразивних кромки.

Для здійснення процесу шліфування, інструменту необхідно надати обертання з частотою n_x і зворотньо-поступальні рухи паралельно оброблюваній поверхні, зі швидкістю $V_{зп}$. Для цього необхідна спеціальна оснастка – оправка, в яку встановлюється шліфувальний круг (рис 2, в). Шліфувальний круг встановлюється на вісь, яка має зубчатий шків. Обертання на цей шків передається від окремого привода через пасову зубату передачу. Вісь із кругом в свою чергу встановлюються в корпусі оправки, який кріпиться до інших елементів верстату.

Опис обладнання та оснастки для проведення експериментальних досліджень. Для здійснення

схеми шліфування [9] в реальних виробничих умовах, була розроблена та виготовлена спеціальна оснастка, адаптована до вертикального фрезерного оброблювального центру моделі BMV-850 MILLSTAR (Тайвань) з ПЧПУ FANUC, представленого на рис. 3. Оснастка включає в себе пристосування для профільного шліфування внутрішніх поверхонь і пристосування для надання цівковому колесу руху обкату. Перше пристосування кріпиться до пінолі шпинделя обробного центру, друге встановлюється на його двокоординатному столі. Обидва пристосування мають власні приводи з можливістю регулювання частот.



Рис. 3 – Обробний центр з ЧПУ моделі BMV-850 MILLSTAR, оснащений пристосуванням для профільного шліфування внутрішніх поверхонь і пристосуванням для відтворення руху обкату

Пристосування для профільного шліфування внутрішніх поверхонь (див. рис. 4) включає в себе привід 1 (MF 907079 Hauser) в чавунному корпусі, оправку 2, із закріпленням на ній шліфувальним кругом 3. Оправка базується в посадковий отвір в корпусі привода. Корпус привода має фланець, на якому розміщені кріпильні отвори. За допомогою цього фланцю, привід разом із оправкою, жорстко приєднується до елементів ОЦ через адаптер 4, який базується на циліндричну частину пінолі і кріпиться до її фланцю.

Пристосування для надання цівковому колесу руху обкату (див. рис. 4) включає в себе планетарний редуктор внутрішнього зачеплення 5, який встановлюється на поворотний стіл 6 (мод. РКВ 7205-4003). Поворотний стіл базується на плиті 7, яка має змогу повертатись в незакріпленому стані навколо вісі поворотного стола для здійснення наладки. Також на плиті встановлений мотор-редуктор 8 (універсальний колекторний електродвигун УВ-061-М64, поєднаний з черв'ячним редуктором) та зубчаста передача 9 ($z=11/z=35$). Передача крутного моменту між мотор-редуктором, зубчастою передачею і поворотним столом відбувається через муфти 10.

Більш детально принцип роботи пристосування для відтворення руху обкату пояснюється кінематичною схемою, яка представлена на рис. 5. Від мотор-редуктора 1, обертовий рух передається до зубчатої пари 2 і далі на черв'як 3, який приводе в рух черв'ячне колесо 4.



Рис. 4 – Загальний вигляд оснастки для здійснення розробленого методу шліфування цівкового колеса ГП в реальних умовах: 1 – привід шліфувального круга Hauser MF 907079; 2 – оправка; 3 – шліфувальний круг; 4 – адаптер; 5 – пристосування для відтворення руху обкату; 6 – поворотний стіл РКВ 7205-4003; 7 – плита рухома; 8 – привід руху обкату УВ-061-М64; 9 – зубчата передача; 10 – муфти

Черв'ячна пара знаходиться в корпусі 5 поворотного стола. Обертання черв'ячного колеса приводить до обертання корпусу 6 планетарного редуктора. В середині корпусу 6 розміщена передача внутрішнього зачеплення, яку утворюють колесо 7 і обойма 8 із внутрішнім зубчатим вінцем.

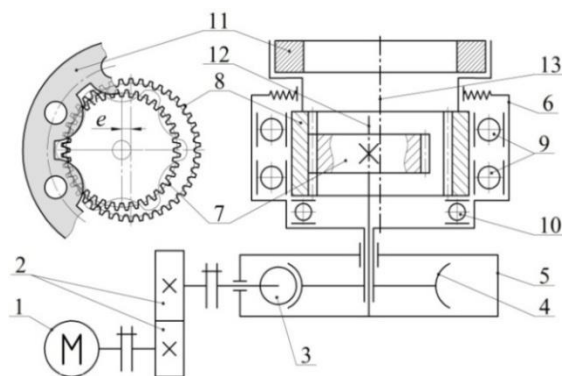


Рис. 5. Кінематична схема пристосування для відтворення руху обкату: 1 – мотор-редуктор; 2 – зубчата передача ($z=11/z=35$); 3 – черв'як, 4 – черв'ячне колесо; 5 – корпус поворотного стола; 6 – еквівалентне колесо, що імітує сателіт; 8 – обойма із внутрішнім зачепленням; 9 – радіальні підшипники; 10 – упорний підшипник; 11 – оброблюване цівкове колесо; 12 – вісь обертання стола (вісь обкату); 13 – миттєва вісь обертання цівкового колеса

Зачеплення колеса 7 і обойми 8 є еквівалентним зачепленню героторної пари і має теж саме передавальне відношення. Колесо 7 пов'язане із корпусом 6

поворотного столу і повністю нерухоме. Обойма 8 має змогу обертатись за рахунок двох радіальних підшипників 9 і одного упорного 10, які знаходяться в корпусі 6. Обойма 8 жорстко пов'язана із оброблюваним цівковим колесом 11. Відповідно, в процесі роботи, колесо 11 отримує від обойми 8 рух по коловій траєкторії, навколо вісі 12 і обертання навколо ексцентрично розташованої миттєвої вісі 13, яка одночасно є геометричною віссю корпусу 6. Відстань між осями 13 і 14 рівна ексцентриситету героторної пари.

Оправка для встановлення шліфувального круга являє собою окремих вузол, представлений на рис 6, який складається з корпусу 1, притискної планки 2, перехідного вкладиша 3. Шліфувальний круг базується на вісь 4, яка разом із зубчатим шківом являє собою єдину конструкцію. На валу електродвигуна, в порожнині його корпусу, встановлений зубчатий шків, від якого через зубчатий пас, оберти надаються шківу вісі 4. Круг притискається гайкою 5, яка додатково фіксується гвинтом 6, для запобігання послаблення сили затиску. В порожнині шківа розміщено дві пари радіально-упорних підшипників 7. Між ними розміщується опорний валик 8, кінці якого частково базуються у внутрішніх обоймах підшипників. Одночасно торці обойм упираються в опорні торці валика. В корпусі і притискній планці містяться отвори, в які запресовані шипи 9, на конічні поверхні яких базуються внутрішні обойми підшипників 7. Притискна планка 2 кріпиться до корпусу за допомогою двох штифтів 10 і гвинта 11. При цьому створюється натяг для точного центрування круга відносно вісі шипів і уникнення зазорів. В залежності від ширини круга, змінний перехідний вкладиш 3 може мати різну товщину.

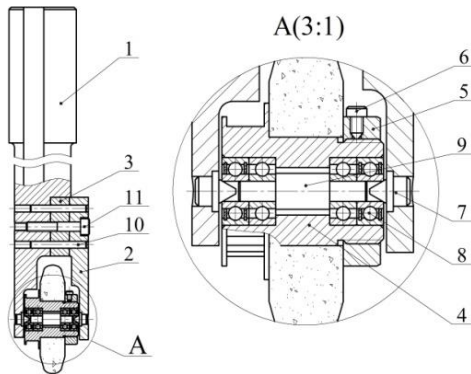


Рис. 6 – Конструктивне виконання оправка зі встановленим шліфувальним кругом

Для виготовлення інструментів, були використані дискові круги з прямим профілем, з послідовною правкою алмазним олівцем на профіleshліфувальному оптичному верстаті 395МФ10. Робочі характеристики кругів приведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Робочі характеристики шліфувальних кругів

Характеристика	Позначення згідно стандарту
Абразивний матеріал	14А Електрокорунд нормальний ГОСТ 2424-83
Зернистість	F120-F150 ГОСТ Р 52381-2005
Твердість круга	Р (СТ-2) ГОСТ Р 52587-2006
Структура	Щільна (4) ГОСТ 2424-83
Зв'язка	Керамічна (K5)

Планування та здійснення експерименту. Для проведення експериментальних досліджень був обраний ротатбельний центральний композиційний план другого порядку [10], який включає в себе повний факторний експеримент з 8ми дослідів та додаткові досліді в зіркових точках (6 дослідів) і в центрі плану (6 дослідів). Загальна кількість дослідів складає 20. Рівні та інтервали варіювання факторів зведені до таблиці 2. Матриця ротатбельного плану наведена в таблиці 3. Параметр оптимізації – точність форми цівкового колеса δf . Матриця планування експерименту для обробки різними інструментами залишатиметься однаковою.

Фактори, вплив яких досліджувався ході проведення експерименту – три основні керовані режими обробки – вхідна частота обкату ($n_{вх}$), швидкість зворотно-поступального руху (осциляції) інструменту ($V_{зп}$) і частота обертання круга ($n_{к}$).

Таблиця 2 – Рівні та інтервали варіювання факторів

Найменування фактору	Позначення	Кодовані рівні факторів				
		0	+1	-1	Зіркові точки	
					+1,682	-1,682
Натуральний масштаб						
Вхідна частота обкату (X_1)	$n_{вх}$ (хв ⁻¹)	1,5	2	1	2,34	0,66
Швидкість зворотно-поступального руху (X_2)	$V_{зп}$ (п.х./хв)	60	80	40	93,63	26,36
Частота обертання круга (X_3)	$n_{к}$ (хв ⁻¹)	800	9000	7000	9681,8	6318,2

Таблиця 3 – Матриця ротатбельного плану

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1
2	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1
4	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1
5	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1
6	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1
7	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1
9	+1	-1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0	0
10	+1	+1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0	0
11	+1	0	-1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0
12	+1	0	+1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0
13	+1	0	0	-1,68	0	0	+2,83	0	0	0
14	+1	0	0	+1,68	0	0	+2,83	0	0	0
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Зміна частоти обертання мотор-редуктора і як наслідок частоти $n_{вх}$, здійснювалось за допомогою лабораторного автотрансформатора ЛАТР-1М (220В, 9А), шляхом плавної зміни живлячої напруги. Точне

значення частоти обертання на валу мотор-редуктора встановлювалось за допомогою оптичного тахометру DT-2234С. Значення швидкості зворотно-поступальних рухів інструменту $V_{зп}$, задавалось управляючою програмою, за допомогою функції робочих переміщень F. Зміна частоти обертання круга, здійснювалась за допомогою частотного перетворювача Danfoss VLT AQUA Drive FC202.

Попередня обробка внутрішнього профілю – фрезерування, з послідовним загартуванням заготовок до 60...62 HRC. Матеріал заготовок – сталь ШХ15 ГОСТ 801-78. Припуск на радіус цівки – 0,1...0,15 мм. Параметри цівкового колеса, що підлягають контролю, приведені на рис. 7.

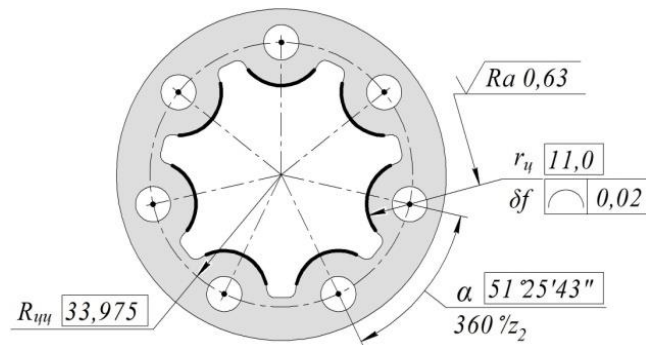


Рис. 7 – Контрольовані параметри цівкового колеса

Фрагменти шліфування цівкового колеса в реальних виробничих умовах представлені на рис.8.



а



б

Рис. 8 – Процес шліфування внутрішнього профілю цівкового колеса в умовах планетарного обкату: а – кругом з випуклою формою профілю; б – кругом з увігнутою формою профілю

Точність форми профілю вимірювалась на координатно-вимірвальній машині Contura G2 CARL ZEISS (див. рис. 9) по 10ти точкам уздовж активної (задіяної в роботі) ділянки дуги цівки і враховує параметри $r_ц$, $R_цц$, α .



Рис. 9 – Вимірювання параметрів цівкового колеса на координатно-вимірвальній машині Contura G2 (Carl Zeiss)

Статистична обробка отриманих даних. За отриманими в ході експериментів значеннями, були побудовані гістограми розсіювання величини

відхилення форми заданого профілю δf , при обробці кругами з випуклою та увігнутою формою профілів (рис. 10)

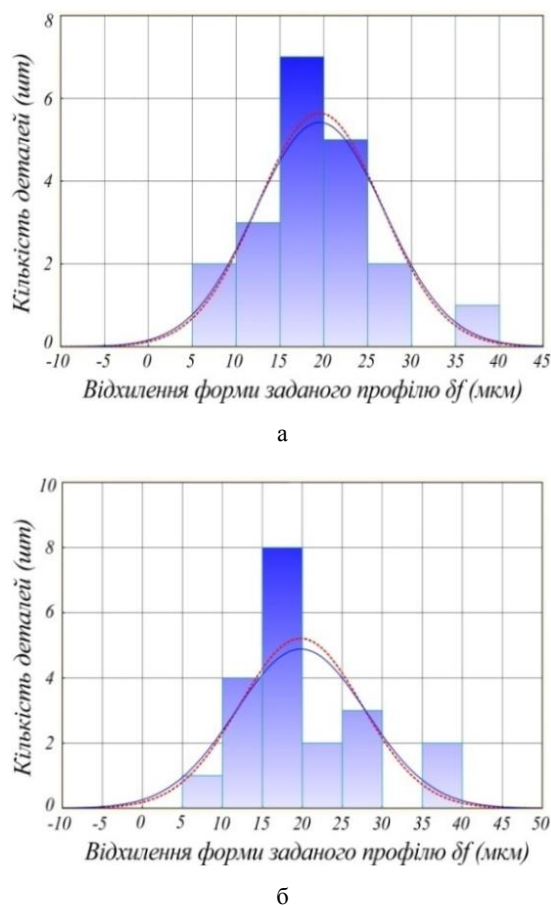


Рис. 10 – Вимірювання параметрів цівкового колеса на координатно-вимірвальній машині Contura G2 (Carl Zeiss): а,б – залежності щодо вимірюваного профілю

Аналіз гістограм показує, що зміна технологічних факторів в заданих межах має суттєвий вплив на величину поля розсіювання показників точності. Так, при обробці кругом з випуклим профілем, поле розсіювання параметру δf знаходиться в межах 6,5...35,9 мкм, а при обробці увігнутим профілем – 5,7...38,3 мкм.

В результаті розрахунку коефіцієнтів регресій, отримані математичні моделі (ММ) впливу технологічних факторів на параметр оптимізації δf , у вигляді поліномів другого порядку:

- ММ відхилення δf при обробці кругом з випуклою формою профілю:

$$Y_1 = 19,083 + 6,019 \cdot X_1 + 3,484 \cdot X_2 - 3,026 \cdot X_3 + 1,464 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,113 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,163 \cdot X_2 \cdot X_3 - 1,19 \cdot X_1^2 + 1,412 \cdot X_2^2 + 0,403 \cdot X_3^2 \quad (3)$$

- ММ відхилення δf при обробці кругом з увігнутою формою профілю:

$$Y_2 = 18,748 + 4,684 \cdot X_1 + 5,674 \cdot X_2 - 2,77 \cdot X_3 + 1,101 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,575 \cdot X_1 \cdot X_3 + 1,576 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,661 \cdot X_1^2 + 2,625 \cdot X_2^2 - 1,197 \cdot X_3^2 \quad (4)$$

По результатам перевірки моделей за критерієм значимості, були побудовані діаграми Парето (див. рис. 11), які відображають ступінь впливовості факторів та їх взаємодій, на параметр δf .

По результатам перевірки моделей за критерієм значимості, були побудовані діаграми Парето (див. рис. 11), які відображають ступінь впливовості факторів та їх взаємодій, на параметр δf .

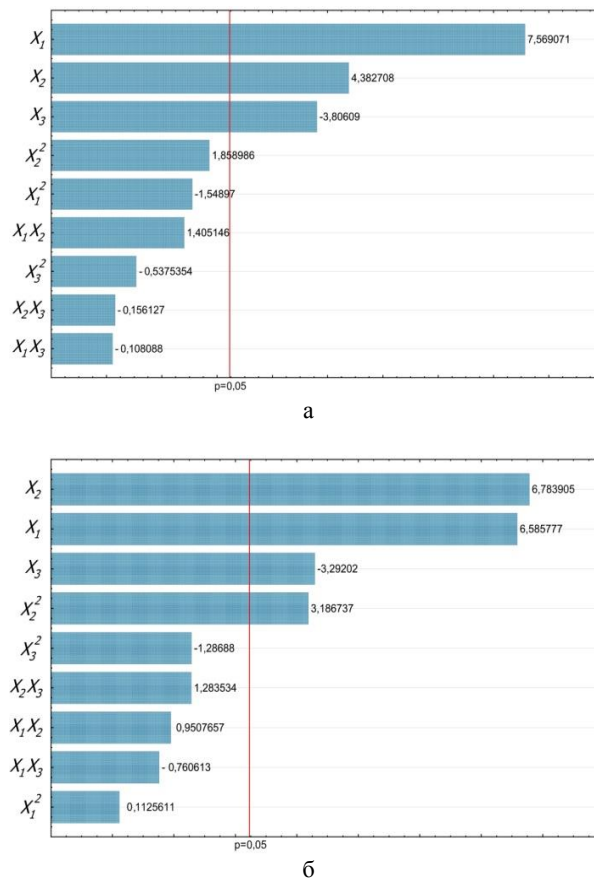


Рис. 11 – Діаграми Парето впливу факторів та їх комбінацій на величину δf : а – при обробці кругом з випуклою формою профілю; б – при обробці кругом з увігнутою формою профілю

Діаграми Парето на рис. 10, а, вказують на найбільшу значимість вхідної частоти n_{ex} . Другорядними по значимості є швидкість зворотно-поступальних рухів $V_{зп}$ і частота обертання круга n_k . При обробці кругом з увігнутою формою профілю, більш вагомою виявилась швидкість $V_{зп}$ (рис. 10, б). Усі без винятку ММ містять не значимі коефіцієнти при квадратичних членах X_i^2 , що вказує на необхідність перерахунку коефіцієнта b_0 за правилом найменших квадратів [11]. Після перерахунку, виключення не значимих коефіцієнтів і переходу від кодованих до натуральних значень, ММ приймають вигляд:

- для обробки кругом з випуклою формою:

$$\delta f = 15,213 + 12,037 \cdot n_{ex} + 0,174 \cdot V_{зп} - 3 \cdot 10^{-3} \cdot n_k \quad (5)$$

- для обробки кругом з увігнутою формою:

$$\delta f = 33,46 + 9,367 \cdot n_{ex} - 0,517 \cdot V_{зп} - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot n_k + 6,6 \cdot 10^{-3} \cdot V_{зп}^2 \quad (6)$$

Для кожної ММ були побудовані поверхні відгуку (див. рис. 11), що виражають залежність параметру δf від найвпливовіших факторів n_{ex} і $V_{зп}$.

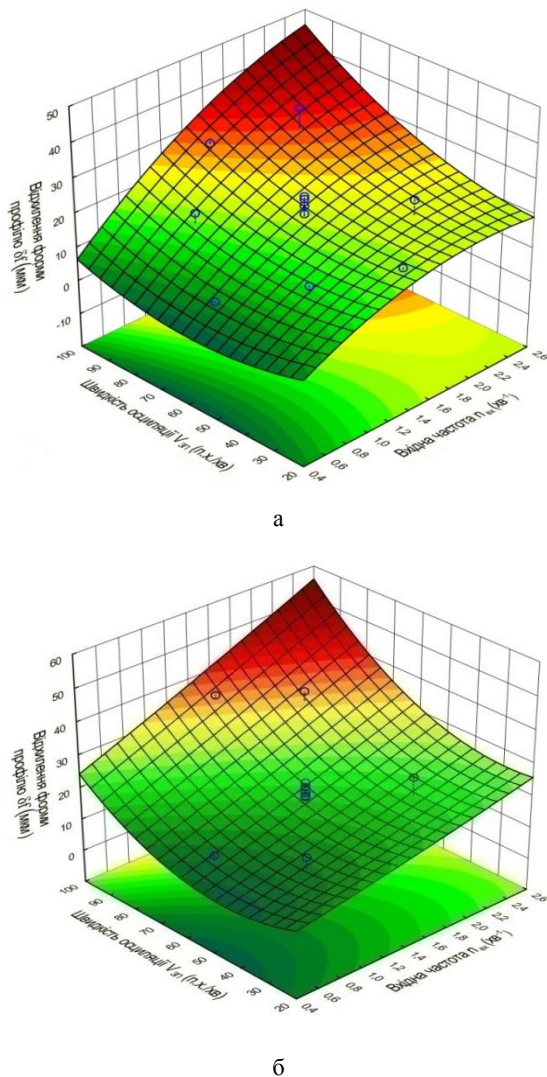


Рис. 11 – Залежність параметру оптимізації δf від технологічних факторів n_{ex} і $V_{зп}$: а – при обробці кругом з випуклою формою профілю; б – при обробці кругом з увігнутою формою профілю

Мінімальне значення δf для обробки кругом з випуклим профілем, було отримано при $n_{ex}=0,66 \text{ хв}^{-1}$, $V_{зп}=55 \text{ п.х./хв}$, $n_x=8200 \text{ хв}^{-1}$. Для круга з увігнутим профілем – при $n_{ex}=0,66 \text{ хв}^{-1}$, $V_{зп}=47 \text{ п.х./хв}$, $n_x=9000 \text{ хв}^{-1}$. Зростання значення n_{ex} , веде до збільшення величин пружних відтисків інструменту від поверхні деталі у всіх фазах обкату. Одночасно, високі значення $V_{зп}$ призводять до надмірних вібрацій. В результаті, при одночасному збільшенні $V_{зп}$ і n_{ex} , процес шліфування стає надмірно навантаженим, що супроводжується збільшенням значення відхилення δf . Оптимального балансу показників точності і шорсткості слід очікувати при мінімальних значеннях n_{ex} і близьких до нульового рівня значеннях $V_{зп}$.

В ході експерименту було встановлено, що стійкість круга з випуклим профілем складає 4 безперервно оброблені цівки. Для круга з увігнутим

профілем цей показник складає 12 цівок. В силу низької стійкості, круг з випуклим профілем бажано виготовляти на гальванічній основі з надтвердих матеріалів (наприклад КНБ), як такий, що не потребує періодичної правки. Круг з увігнутим профілем може бути виготовлений із більш дешевих матеріалів на керамічній зв'язці.

Висновки. Результатом представленого дослідження стало встановлення залежності показника відхилення форми профілю цівкового колеса від технологічних параметрів, що супроводжують процес шліфування в умовах планетарного обкату. Отримані показники точності та шорсткості свідчать про відповідність вимогам на рис. 7, та дають підстави стверджувати, що метод [8] прийнятний для впровадження у виробництво серійного типу.

Метод шліфування може бути здійснено на універсальних трьохкоординатних верстатах з ЧПУ, з вертикальним розташуванням шпинделя, які є досить поширені на виробництвах. Таким чином, для обробки за наведеною схемою, достатньо здійснити недорогу модернізацію, замість покупки спеціального обладнання. Також результати дослідження свідчать про можливість застосування недорогих абразивних інструментів на керамічній зв'язці, переважно з увігнутою формою профілю, за умови періодичної правки. Для застосування інструменту з випуклим профілем, необхідна більш міцна гальванічна зв'язка, але зникає необхідність у періодичній правці.

Список литературы

1. Лобастов В. К. А. с. 860956, СССР. Приспособление для обработки зубчатых колес, профили которых очерчены огибающими семейства вневцентроидных эпи- и гипоциклоид и их эквидистантами / В. К. Лобастов. – 1981.
2. Холм. М. Пат. 3817000, США. Пристрій для виготовлення радіусного елемента набору героторної передачі / С. Холм. – 1974.
3. Елбін. С. Чабек. Пат. 4346534, США. Пристрій для хонінгування циклоїдальної поверхні / С. Елбін Чабек. – 1982.
4. Білграм Х. Пат. 1798059А, США. Верстат для виготовлення роторів / Х. Білграм, М. Хіл. – 1931.
5. Харлі Г. Пат. 4058938, США. Метод і пристрій для шліфування внутрішніх зубців зубчатих коліс / Г. Харлі, З. Ізенман. – 1977.
6. Хіл М. Пат. 2578187, США. Метод виготовлення роторів / М. Хіл. – 1951.
7. Добротворський С. С. Комп'ютерне проектування та моделювання технологічних процесів високошвидкісного фрезерування загартованих сталей / С. С. Добротворський, С. В. Басова та ін. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні: збірник наукових праць. – 2015. – № 822. – С. 7–13.
8. Підгаєцький М. М. Пат. 55734А, Україна. Спосіб обробки внутрішніх зубців зовнішнього зубчастого колеса позacentроїдного внутрішнього цівкового зачеплення / М. М. Підгаєцький, О. І. Скібінський, А. О. Валявський. – 2003.
9. Скібінський О. І. Пат. 110823С2, Україна. Спосіб шліфування внутрішнього профілю зовнішнього колеса героторної передачі в умовах планетарного обкату / О. І. Скібінський, А. О. Гнатюк, М. М. Підгаєцький. – 2016.
10. Скібінський О. І. Визначення умов існування спряженої огинаючої сімейства еквідистант до вкорочених епіциклоїд в циклоїдальній передачі внутрішнього зачеплення / О. І. Скібінський, В. І. Гуцул, А. О. Гнатюк. // Вісник НТУУ «КПІ». – Київ, 2014, №1(70) – С. 159-165.
11. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.

References (transliterated)

1. Lobastov V. K. *Prisposoblenie dlya obrabotki zubchatyih koles, profili kotoryih ochercheni ogibayuschimi semeystva vnetsentroidnyih epi- i gipotsikloid i ih ekvidistantami* [Device for processing gears profiles of which delineated tangent curves of the cycloidal curves family and their equidistant]. USSR author's certificate, no. 860956, 1981.
2. Holm S. *Pristrlly dlya vigotovlennya radlunogo elementa naboru gerotomoyi peredachi* [Apparatus for producing the ring member of a gerotor gear set]. USA Patent, no. 3817000, 1974.
3. Albin S. *Czubak. Prystriy dlya honinguwannya tsikloyidalnoy poverhni* [Apparatus for honing cycloidal surfaces]. USA Patent, no. 4346534, 1982.
4. Bilgram H. *Verstat dlya vigotovlennya rotoriv* [Machine for making rotors] USA Patent, no. 1798059, 1931.
5. Harle. H. *Method i pristriy dlya shlifuvannya vnutrishnih zubtsiv zubchatih kolls* [Method and apparatus for grinding the tooth flanks of internally-toothed gear wheels]. USA Patent, no 4058938, 1977.
6. Hill M. *Metod vigotovlennya rotoriv* [Method for making rotors]. USA Patent, no. 2578187, 1951.
7. Dobrotvorsky S.S., Basova E.V., ets. *Komp'yuterne proektuvannya ta modelyuvannya tehnologichny`x procesiv vy`sokoshvy`dkisnogo frezeruvannya zagartovany`x* [Computer design and simulation processes high-speed milling hardened steels] *Visnyk Nacional'nogo universy`tetu «Lviv'ska politexnika». Seriya: Optymizaciya vy`robnny`chy`x procesiv i texnichny`j kontrol` u mashynobuduvanni ta pry`ladobuduvanni : zbirnyk naukovy`x prac`.* 2015. No 822. pp. 7–13.
8. Pidgaetskyi M. M., Skibinskyi O. I., Valyavskiy O. A. *Sposib obrobky vnutrishnih zubtsiv zovnishnogo zubchastogo kola posatsentroidnogo vnutrshnogo tsvkovogo zacheplennya* [Method for processing internally toothed of internal profile of external gear wheel in center cycloidal transmission]. UA patent, no. 55734A, 2003.
9. Skibinskyi O. I., Gnatyuk A. O., Pidgaetskyi M. M. *Sposib shlifuvannya vnutrshnogo profilu zovnyshnogo kola gerotomoyi peredachi v umovah planetarnogo obkату* [Method for grinding internal profile of external gear wheel of gerotor]. UA patent, no. 110823C2, 2016.
10. Skibinskyi O. I. *Vyznachennya umov isnuvannya spryazhenoyi ohynayuchoy simeystva ekvidystant do vkorochenykh epitsykloyid v tsykloyidalniy peredachi vnutrishnoho zacheplennya* [Conditions determination of existence of tangent curve to family of equidistant curves of the shortened epicycloids in epicyclic transmission internal gear] / O. I. Skibinskyi, V. I. Gutsul, A. O. Gnatyuk // *Visnyk NTUU "KPI"* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI"]. Kyiv, NTUU "KPI" Publ., 2014, no. 1(70), pp. 159–165.
11. Spiridonov A. A. *Planyrovanye eksperymenta pry yssledovanyi tekhnologicheskyykh protsessov* [Planning an experiment of research technological processes] / A. A. Spiridonov // *M.: Mashinostroenie Publ.*, 1981, 184 p.

Поступила (received) 10.12.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Експериментальні дослідження показників точності при шліфуванні профілю цівкового колеса героторної пари в умовах планетарного обкату / А. О. Гнатюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – X. : НТУ «ХПІ», 2017. – № 17 (1239). – С. 18–25. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-004X.

Експериментальные исследования показателей точности при шлифовании профиля цевочного колеса героторной пары в условиях планетарной обкатки / А. А. Гнатюк // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – №17 (1239). – С. 18–25. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0023.

Research precision parameters for generating gear grinding bobbin wheel profile of gerotor / A. Gnatyuk // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Techniques in a machine industry. – Kharkov : NTU "KhPI", 2017. – No. 17 (1239). – P. 18–25. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0023.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гнатюк Андрій Олександрович – аспірант Центральноукраїнського (Кіровоградського) Національного технічного університету, м. Кропивницький (Кіровоград); тел.: (066) 437-50-30; e-mail: andrej.gnatyuk@gmail.com;

Гнатюк Андрей Александрович – аспірант Центральноукраїнського (Кіровоградського) Національного технічного університета, г. Кропивницький (Кіровоград); тел.: (066) 437-50-30; e-mail: andrej.gnatyuk@gmail.com;

Gnatyuk Andriy Oleksandrovych – Postgraduate Student of Central Ukrainian (Kirovograd) National Technical University, Kropyvnytskyi (Kirovograd), tel.: (066) 437-50-30; e-mail: andrej.gnatyuk@gmail.com.