

Теоретичні та експериментальні дослідження показників шорсткості профілю цівкового колеса героторної пари, що забезпечуються шліфуванням в умовах обкату

А.О. Гнатюк • О.І. Скібінський • А.М. Кириченко

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

Received: 14 December 2018 / Accepted: 27 March 2018

Анотація. В роботі представлені результати дослідження шорсткості профілю цівкового колеса героторної пари, що забезпечуються шліфуванням в умовах обкату. Результати включають в себе дані, отримані в ході моделювання формоутворення мікронерівностей, та результати, отримані в ході обмірів параметрів шорсткості цівкових коліс, обробка яких здійснювалась у виробничих умовах. Для здійснення операції шліфування, було застосовано дискові шліфувальні круги, геометрія профілю яких забезпечує неперервний обкат оброблюваного профілю колеса відносно профілю круга. В основу синтезу профілю інструментів покладені опуклі та увігнуті ділянки еквідистанти до епіциклоїди. Отримані теоретичні та експериментальні результати свідчать про перевагу застосування профілю на основі увігнутої ділянки, який забезпечує в 2,5-2,7 рази кращу шорсткість при однакових режимах обробки. Встановлено, що застосування профілю інструменту, який має однаковий знак кривизни із оброблюваним профілем цівки, позитивно впливає на шорсткість поверхні і стійкість інструменту.

Ключові слова: цівкове колесо, героторна пара, шліфування, шорсткість, шліфувальний круг, еквідистанта до епіциклоїди, мікронерівності.

Вступ. Зачеплення героторної пари на основі вкороченої епіциклоїди, знаходить широке застосування в сучасній техніці, зокрема в гідравлічних машинах (насосах, гідромоторах), а також редукторах. До робочих профільних поверхонь коліс зачеплення висуваються високі вимоги по точності, шорсткості, та поверхневій твердості, що обумовлено функціональним призначенням [1, 2]. При цьому сателіт має зовнішній зубчатий вінець, що не обмежує доступ і конструктивне виконання інструменту при його виготовленні. Це робить профіль сателіту технологічним у виготовленні. Геометрія цівкового колеса із внутрішнім профілем, накладає конструктивні обмеження на інструменти і їх доступ до оброблюваної поверхні. Для забезпечення високих якісних вимог і водночас, ефективної обробки нескладними інструментами, було розроблено метод шліфування внутрішнього профілю цівкового колеса в умовах обкату [3]. Схема обробки ґрунтується на принципі обкату центроїди цівкового колеса навколо нерухомої центроїди сателіту. При цьому сателіт, профіль якого окреслено еквідистантою до епіциклоїди, замінюється інструментом – дисковим шліфувальним кругом, профіль якого може бути окреслений опуклою або увігнутою ділянкою еквідистанти до епіциклоїди (УДЕЕ або ОДЕЕ). Інструмент вводиться в порожнину колеса, утворюючи верстатне зачеплення і разом із обертанням, здійснює зворотно-поступальні рухи паралельно вісі колеса. Шліфувальний круг встановлюється в оправку з виносним шпинделем. Зазвичай подібним методом шліфують внутрішні зуб'я методом копіювання [4]. Одночасно, цівкове колесо здійснює планетарний рух обкату. Оскільки розроблений метод обробки потребував досліджень, з цією метою була розроблена і виготовлена спеціальна оснастка, адаптована до вертикально-фрезерного обробного центру Millstar BMV-850. Детальний опис цієї оснастки наводиться в роботі [5]. В цій же роботі представлені основні результати по точності обробки, отримані в ході обробки двох партій цівкових коліс інструментами з профілями на основі ОДЕЕ і УДЕЕ, в умовах обкату. Особливої уваги заслуговують результати отриманої шорсткості профілів цівкових коліс і їх зв'язок із теоретичними дослідженнями розробленого методу обробки.

Метою роботи є оцінка якості розробленого методу шліфування цівкових коліс в умовах планетарного обкату за критерієм шорсткості. Більш детально необхідно оцінити шорсткість, що забезпечується геометрією інструменту з опуклою та увігнутою формою профілю, з послідовним порівнянням. Для теоретичної оцінки шорсткості, що забезпечується різними варіантами геометрії профілю інструменту, було застосовано графічне моделювання контактної взаємодії профілю інструмента з профілем цівки колеса в процесі обкату. Вимірювання

шорсткості шліфованих цівкових коліс у виробництві виконувалось в метрологічній лабораторії, за допомогою профілограф-профілометра Mahr DG-25. Для обробки експериментальних даних, було застосовано ротатбельний центральньо-композиційний план другого порядку.

Основна частина. Теоретичне дослідження шорсткості, що досягається методом [3], здійснювалось на основі графічного моделювання. В даному випадку слід розрізняти шорсткість, що залежить від зернистості круга і шорсткість, що забезпечується особливостями схеми формоутворення. Оскільки перший тип шорсткості регламентується стандартом (ISO 8486-1: 1996), де зазначені рекомендації по вибору зернистості для досягнення необхідної шорсткості поверхні, дослідженню підлягає другий тип шорсткості. В силу нерівномірної кривизни профілів інструментів, можна припустити, що висота мікронерівностей уздовж профілю цівки в процесі обкату також буде нерівномірною. Причому профілі на основі ОДЕЕ і УДЕЕ по-різному впливатимуть на характер розподілу. Схема моделювання утворення мікронерівностей і вимірювання їх висоти, представлена на рис. 1. Подібна схема моделювання є загальновідомою, прикладом може слугувати наведена в роботі [6] схема утворення мікронерівностей лезовим інструментом. Також заслуговує уваги оригінальна методика дослідження параметрів шорсткого шару поверхні та 3D моделювання шорсткості, що подана в роботі [7]. Моделювання не враховує фактори, що супроводжують динаміку формоутворення – стійкість інструмента, його знос, а також не враховує неточності, породжені пружними силами [8, 9]. Його основна задача – оцінити вплив геометрії профілю інструменту на характер розподілу висоти мікронерівностей і їх величину, при різних режимах обробки.

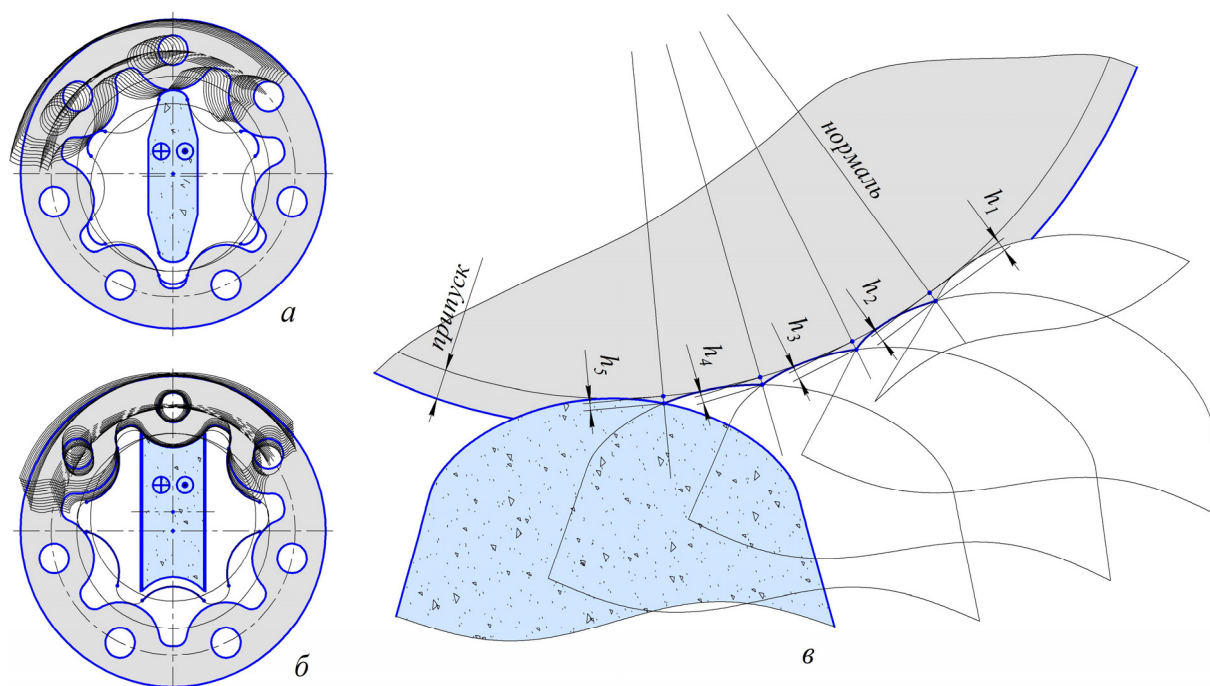


Рис. 1. Схема обкату і контактної взаємодії цівкового колеса з профілем шліфувального круга: а – обкат інструменту з профілем на основі ОДЕЕ; б – обкат інструменту з профілем на основі УДЕЕ; в – утворення мікронерівностей в процесі обкату

Фактори, що впливатимуть на шорсткість – режими обробки n_{ex} (вхідна частота обкату – частота обертання центру цівкового колеса по колу обкату навколо вісі обкату) і $V_{з.п.}$ (швидкість зворотно-поступальних рухів інструменту). Частота n_{ex} буде визначати величину подачі на подвійний хід інструменту. Параметри впливу n_{ex} і $V_{з.п.}$ зручно виразити через співвідношення $n_{ex}/V_{з.п.}$. Таким чином, суть дослідження зводиться до визначення висоти мікронерівностей, які утворюватимуться уздовж шліфованої дуги цівки в різних фазах обкату, при різних значеннях $n_{ex}/V_{з.п.}$. Побудова положень інструменту у верстатному зачепленні проводилась в САД-системі Компас 3D графік. Побудову виконано для 5-ти значень $n_{ex}/V_{з.п.}$ (2/45; 2/60; 1,5/60; 1,5/80; 1/80), які задають дискретність положень інструменту. Для кожного із цих значень було побудовано індивідуальний графік (рис. 2).

Аналізуючи отримані графіки (рис. 2), відмічаємо особливий характер зміни висоти мікронерівностей h . Нерівномірний розподіл висот мікронерівностей обумовлений нерівномірною кривизною профілів інструментів. В роботі [10] представлена залежність радіусу кривизни еквідистанти до епіциклоїди ρ від параметру побудови φ . Графіки залежностей $h(\theta)$ мають схожість із графіком $\rho(\varphi)$. Кожна із залежностей на рис. 2, а, б, має пікове значення h_{max} . Для рис. 2, а, це значення відповідає області взаємодії дуги цівки з ділянкою профілю шліфувального круга з мінімальним радіусом кривизни. На рис. 2, б, пікове значення h_{max} припадає на

центральносиметричну фазу. Поняття “фази обкату” притаманне одночасно двом переміщенням точки контакту інструмента і цівки – уздовж дуги цівки і уздовж профілю інструменту. Фаза обкату уздовж дуги цівки задаватиметься кутовим кроком θ . Одночасно, кутова фаза, що визначає положення точки контакту уздовж профілю інструменту (еквідистанти до епіциклоїди), визначатиметься параметром φ . Для зручності, подані на рис. 2 графіки, виражають залежність h від θ , хоча можуть бути представлені як $h(\varphi)$.

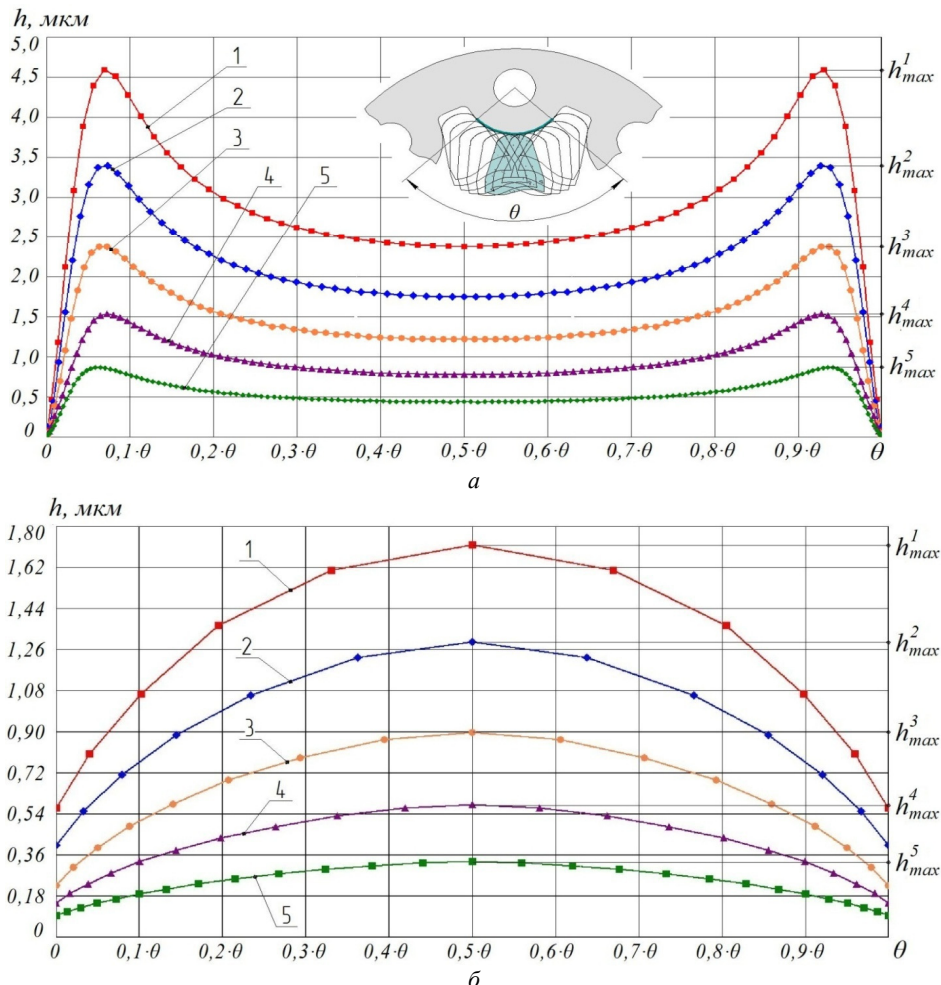


Рис. 2. Графіки розподілу висоти мікронерівностей h уздовж активної ділянки дуги цівки, для різних значень $n_{ex}/V_{z.n.}$: а – обкат інструменту з профілем на основі ОДЕЕ; б – обкат інструменту з профілем на основі УДЕЕ (1 – графік що відповідає співвідношенню технологічних параметрів $n_{ex}/V_{z.n.}=2/45$; 2 – для $n_{ex}/V_{z.n.}=2/60$; 3 – $n_{ex}/V_{z.n.}=1,5/60$; 4 – $n_{ex}/V_{z.n.}=1,5/80$; 5 – $n_{ex}/V_{z.n.}=1/80$)

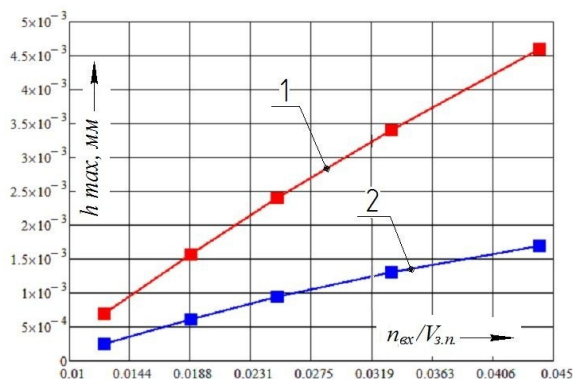


Рис. 3. Графіки залежностей максимальної висоти мікронерівностей h_{max} від співвідношення $n_{ex}/V_{z.n.}$ (1 – графік що відповідає ОДЕЕ; 2– для УДЕЕ)

Визначивши значення h_{max} , побудуємо графіки їх залежності від $n_{ex}/V_{z.n.}$ (рис 3).

Графіки демонструють класичну залежність висоти мікронерівностей від режимів обробки. Збільшення частоти n_{ex} (а відповідно і подачі на подвійний хід інструменту) супроводжується ростом h в будь-якій фазі обкату і навпаки. Збільшення $V_{z.n.}$ має зворотній ефект. Слід додати, що в результаті взаємодії профілю ШК на основі ОДЕЕ з цівкою, маємо чітко виражені гребінці шорсткості. Для профілю ШК на основі УДЕЕ, рельєф шліфованої поверхні має вигляд огранки з менш вираженими гребінцями шорсткості. Кількість гребінців відповідатиме кількості подвійних ходів за час шліфування дуги цівки і відповідно, виражатиметься у кількості точок побудови графіків на рис. 2, а, б.

Аналіз отриманих графіків (рис. 3.15, 3.16) дозволяє зробити висновки:

- при обробці кругом з профілем на основі УДЕЕ досягається шорсткість в 2,5-2,8 рази менша, ніж при обробці кругом з профілем на основі ОДЕЕ, при однакових значеннях $n_{ex}/V_{z.n.}$;
- висота мікронерівностей змінюється пропорційно зміні кривизни профілю круга, причому для профілю на основі ОДЕЕ – оберненопропорційно, для УДЕЕ – прямопропорційно.

Експериментальні дослідження здійснювались за програмою ротатбельного центрально-композиційного плану [11]. Обробка здійснювалась на обробному центрі BMW-850 MILLSTAR, який було додатково оснащено пристроями для відтворення руху обкату і для шліфування внутрішніх профільних поверхонь. Детальний опис конструкції наведених пристроїв подано в роботі [5] Керовані фактори, які впливають на досліджувані параметри – вхідна частота n_{ex} (X_1), швидкість зворотно-поступальних рухів інструменту $V_{z.n.}$ (X_2) і частота обертання круга $n_{ш.к.}$ (X_3). Рівні та інтервали варіювання факторів представлені в таблиці 1. Матриця ротатбельного плану приведена в таблиці 2.

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання факторів

Найменування фактору	Позначення	Кодовані рівні факторів				
		0	+1	-1	Зіркові точки	
						+1,682
Натуральний масштаб						
Вхідна частота обкату (X_1)	n_{ex} (хв ⁻¹)	1,5	2	1	2,34	0,66
Швидкість зворотно-поступального руху (X_2)	$V_{z.n.}$ (п.х./хв)	60	80	40	93,63	26,36
Частота обертання круга (X_3)	$n_{ш.к.}$ (хв ⁻¹)	8000	9000	7000	9681,8	6318,2

Таблиця 2

Матриця ротатбельного плану

№	X_0	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3	Y_1 , ОДЕЕ (Ra , мкм)	Y_2 , УДЕЕ (Ra , мкм)
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	1.88	0,68
2	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	1.74	0,66
3	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	1.33	0,55
4	+1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	1.27	0,54
5	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	2.05	0,83
6	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	2.11	0,73
7	+1	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	1.56	0,60
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	1.51	0,62
9	+1	-1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0	0	1.37	0,56
10	+1	+1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0	0	1.92	0,67
11	+1	0	-1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0	1.73	0,63
12	+1	0	+1,68	0	0	+2,83	0	0	0	0	1.48	0,56
13	+1	0	0	-1,68	0	0	+2,83	0	0	0	1.62	0,78
14	+1	0	0	+1,68	0	0	+2,83	0	0	0	1.75	0,61
15	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.66	0,64
16	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.84	0,61
17	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.63	0,65
18	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.78	0,60
19	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.72	0,62
20	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.67	0,59

Фрагменти обробки цівкового колеса шліфувальними кругами з опуклою та увігнутою формою профілю представлені на рис. 4. Зміна частоти n_{ex} здійснювалась за допомогою лабораторного автотрансформатора ЛАТР-1М, шляхом плавної зміни живлячої напруги. Точне значення частоти обертання на валу мотор-редуктора встановлювалось за допомогою оптичного тахометру DT-2234С. Забезпечення можливості зміни частоти обертання $n_{ш.к.}$, досягається за допомогою частотного перетворювача Danfoss VLT AQUA Drive FC202. Зміна $V_{z.n.}$ досягається програмно, задаючи швидкість лінійної інтерполяції по вісі Z.

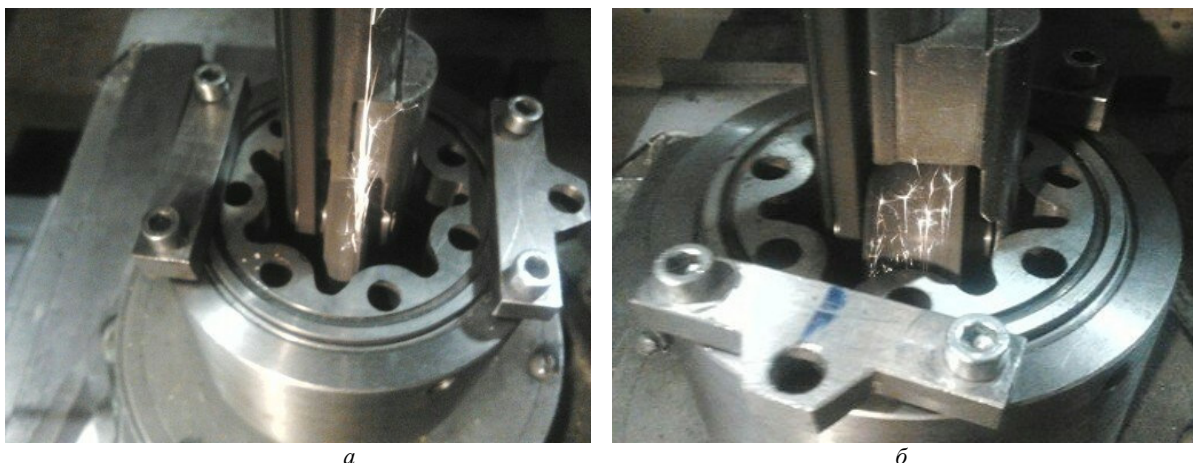


Рис. 4. Фрагменти обробки внутрішнього профілю цівкового колеса в умовах обкату: а – при шліфуванні кругом з профілем на основі ОДЕЕ; б – для круга з профілем на основі УДЕЕ

Вимірювання шорсткості проводилось на профілограф-профілометрі Mahr GD 25. Технічні можливості даного вимірювального приладу, дозволяють вести вимірювання шорсткості лише в одній площині. Це означає, що вимірювання шорсткості циліндричної поверхні цівки уздовж дуги, вимагає розрізання деталей. Для забезпечення доступу щупу до поверхні цівки, одночасно уникаючи розрізання, вимірювання велись за спеціальною схемою, яка представлена на рис 5. Цівкове колесо закріплюють в лещатах у вертикальному положенні і позиціонують таким чином, щоб між напрямком руху щупа і торцем деталі утворився кут $\sim 30^\circ$. Щуп в процесі вимірювання рухається по еліптичній траєкторії, уздовж діагоналі до поверхні цівки. Отримані результати вимірювань наведені в таблиці 2. Згідно цих даних були побудовані гістограми розсіювання параметрів шорсткості (рис. 5, в, г).

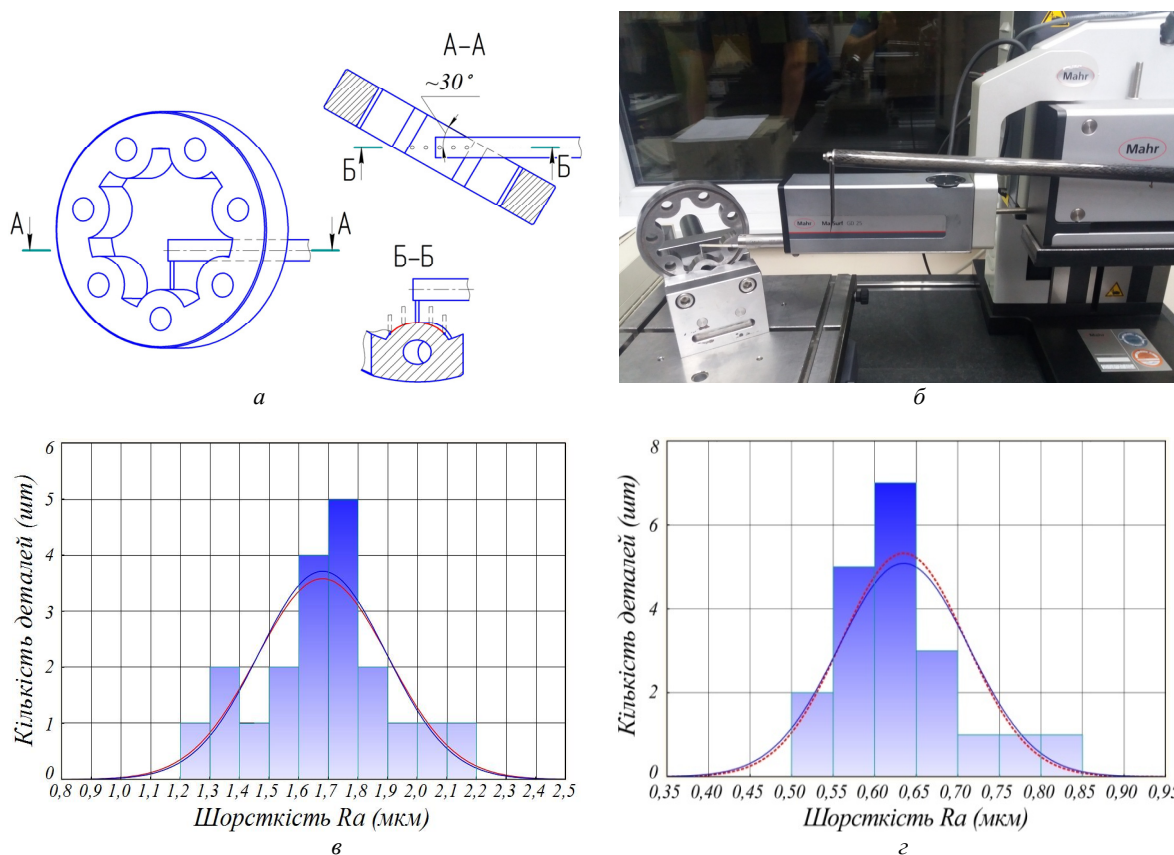


Рис. 5. Вимірювання шорсткості профілю цівкового колеса: а – схема вимірювання; б – процедура вимірювання на профілограф-профілометрі Mahr DG-25; в – гістограма розсіювання показників шорсткості при шліфуванні кругом з профілем на основі ОДЕЕ; г – гістограма розсіювання показників шорсткості при шліфуванні кругом з профілем на основі УДЕЕ

Аналіз гістограм розсіювання (рис. 5, в, г) показує, що зміна технологічних факторів в заданих межах має суттєвий вплив на величину поля розсіювання показників шорсткості. Поле розсіювання параметру шорсткості Ra для інструмента на основі ОДЕЕ – 1,27-2,11 мкм, для УДЕЕ – 0,54-0,83 мкм. Геометрія профілю шліфувального круга опуклий – увігнутий, також має суттєвий вплив на шорсткість обробки. На рис. 6 представлені фрагменти обробленої поверхні з високою деталізацією.

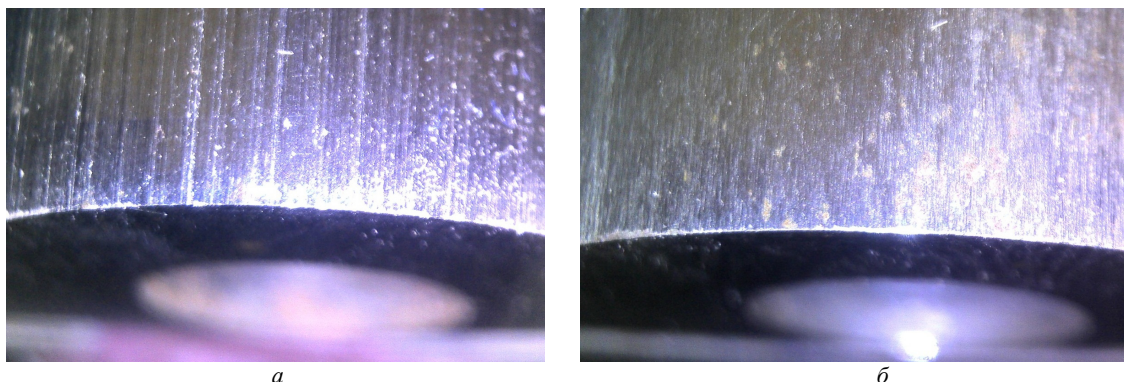


Рис. 6. Оброблена поверхня цівки після шліфування в умовах обкату з однаковими режимами різання: а – при шліфуванні кругом з профілем на основі ОДЕЕ; б – при шліфуванні кругом з профілем на основі УДЕЕ

На основі експериментальних даних, були отримані математичні моделі впливу технологічних факторів на параметр оптимізації Y , у вигляді поліномів другого порядку:

- модель відхилення параметру шорсткості при обробці кругом з профілем на основі ОДЕЕ:

$$Y_1 = 1,715 + 0,142 \cdot X_1 - 0,185 \cdot X_2 + 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot X_3 - 8,75 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,026 \cdot X_1 \cdot X_3 - 3,75 \cdot 10^{-3} \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,017 \cdot X_1^2 - 0,031 \cdot X_2^2 + 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot X_3^2 \quad (1)$$

- модель відхилення параметру шорсткості при обробці кругом з профілем на основі УДЕЕ:

$$Y_2 = 0,612 - 0,039 \cdot X_1 - 0,052 \cdot X_2 - 0,022 \cdot X_3 - 0,011 \cdot X_1 \cdot X_2 - 6,25 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,016 \cdot X_2 \cdot X_3 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot X_1^2 - 1,07 \cdot 10^{-3} \cdot X_2^2 + 0,024 \cdot X_3^2 \quad (2)$$

Перевірка за критерієм Стьюдента вказує, що найбільший вплив на шорсткість має швидкість $V_{з.п.}$. Наступними за ступенем впливовості є частота обкату $n_{ex.}$ і частота обертання круга $n_{ш.к.}$. Після виключення статистично не значимих факторів і переходу до натуральних величин, маємо моделі шорсткості, які супроводжуються поверхнями відгуку (рис. 7).

$$Ra = 1,811 + 0,283 \cdot n_{ex.} - 9,2 \cdot 10^{-3} \cdot V_{з.п.}$$

$$Ra = 2,312 - 0,078 \cdot n_{ex.} - 2,6 \cdot 10^{-3} \cdot V_{з.п.} - 4 \cdot 10^{-4} \cdot n_{ш.к.} + 2,32 \cdot 10^{-8} \cdot n_{ш.к.}^2$$

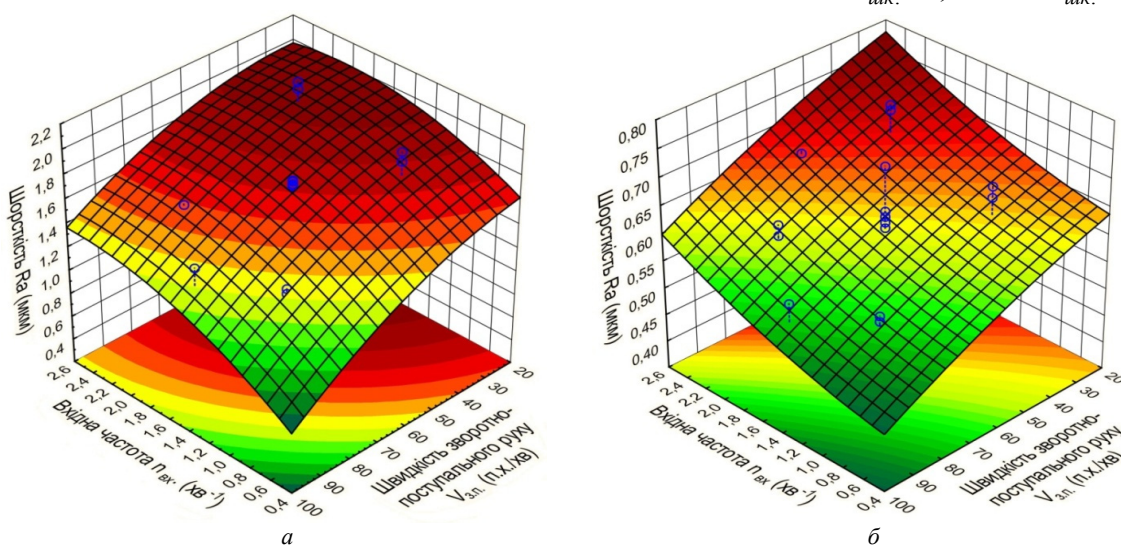


Рис. 7. Вплив швидкості зворотно-поступальних рухів інструменту $V_{з.п.}$ і вхідної частоти $n_{ex.}$ на шорсткість поверхні Ra : а – залежність Ra від $n_{ex.}$ і $V_{з.п.}$ при обробці кругом з профілем на основі ОДЕЕ; б – залежність Ra від $n_{ex.}$ і $V_{з.п.}$ при обробці кругом з профілем на основі УДЕЕ

Поверхні відгуку повторюють тенденцію зміни шорсткості, відповідно до графіка рис. 3. При чому, згідно результатів моделювання, шорсткість для інструменту на основі ОДЕЕ перевищує в 2,5-2,8 разів шорсткість для УДЕЕ. Для результатів експериментальних досліджень, відмінність складає 2,5-2,7 разів. Експериментальна стійкість круга з профілем на основі ОДЕЕ склала 4 безперервно оброблені цівки. Стійкість круга з профілем на основі УДЕЕ склала 12 цівок. Увігнута форма профілю абразивного інструменту має позитивний вплив на параметр шорсткості. Застосування кругів з профілем на основі ОДЕЕ доцільно за умов їх якісного виготовлення і високої стійкості до викришування зерен. Підвищена стійкість і прийнятні показники шорсткості, вказують на можливість застосування кругів з профілем на основі УДЕЕ на керамічній зв'язці. Абразивні інструменти на керамічній зв'язці є дешевими і широко розповсюдженими. Метод шліфування [3] з використанням кругів з увігнутих профілем, доцільно здійснювати в одиничному та дрібносерійному виробництві, за умови активного контролю профілю та можливості контурної правки круга.

Висновки. Результати графічного моделювання утворення мікронерівностей показали, що їх висота змінюється в межах активної дуги цівки, пропорційно кривизні взятої за основу ділянки еквідистанти до епіциклоїди. Отримані результати шорсткості для інструменту на основі ОДЕЕ перевищують в 2,5-2,8 разів шорсткість для профілю на основі УДЕЕ. Результати експериментальних досліджень підтвердили результати моделювання. Таким чином встановлено, що застосування профілю інструменту, який має однаковий знак кривизни із оброблюваним профілем цівки, позитивно впливає на шорсткість поверхні і стійкість інструменту, що підтверджено в умовах моделювання і експериментально. Підвищена стійкість та менші значення шорсткості, дають змогу виготовляти круги з увігнутою формою профілю із дешевих та розповсюджених абразивів на керамічній зв'язці.

Теоретические и экспериментальные исследования показателей шероховатости профиля цевочного колеса героторной пары, которые обеспечиваются шлифованием в условиях обкатки

А.А. Гнатюк, А.И. Скибинский, А.Н. Кириченко

Аннотация. В работе представлены результаты исследования шероховатости профиля цевочного колеса героторной пары, которые обеспечиваются шлифованием в условиях обкатки. Результаты включают в себя данные, полученные в ходе моделирования формообразования микронеровностей и результаты, полученные в ходе обмеров параметров шероховатости цевочных колес, обработка которых осуществлялась в производственных условиях. Для осуществления операции шлифования, были применены дисковые шлифовальные круги, геометрия профиля которых обеспечивает непрерывную обкатку обрабатываемого профиля колеса относительно профиля круга. В основу синтеза профиля инструментов положены выпуклые и вогнутые участки эквидистанты к эписциклоиде. Полученные теоретические и экспериментальные результаты свидетельствуют о преимуществе применения профиля на основе вогнутого участка, который обеспечивает в 2,5-2,7 раза лучшую шероховатость при одинаковых режимах обработки. Установлено, что применение профиля инструмента, который имеет одинаковый знак кривизны с обрабатываемым профилем цевки, положительно влияет на шероховатость поверхности и стойкость инструмента.

Ключевые слова: цевочное колесо, героторная пара, шлифование, шероховатость, шлифовальный круг, эквидистанта к эписциклоиде, микронеровности.

Theoretical and experimental research of roughness parameters of the lantern wheel profile of gerotor, that are provided by grinding in continuously gear generating conditions

A. Gnatyuk, O. Skibinskiy, A. Kyrychenko

Abstract. The paper presents the results of the research of roughness parameters of the lantern wheel profile of gerotor, that are provided by grinding in continuously gear generating conditions. The results include the data obtained during the modeling of micro unevennesses forming and the results, that are obtained of measuring parameters of the roughness of the lantern wheels, the processing of which was carried out in the manufacturing. To perform the grinding operation, were used disc grinding wheels, the profile geometry of which provides gear generating continuous of the wheel profile with respect to the grinding wheel profile. To design of the tool profile, were involved a convex and a concave sections of the equidistant to epicycloid. The received theoretical and experimental results testify to advantage using of a profile on the basis of a concave site which provides in 2,5-2,7 times the best roughness at identical parameters of processing. It is established that the application of the tool profile, which has the same sign of curvature with the machined profile, positively influences for the surface roughness and tool durability.

Keywords: lantern wheel, gerotor, grinding, roughness, grinding wheel, equidistant to epicycloid, micro unevennesses.

References

1. Prakash H. Design and analysis of gerotors of main gear box lubricating oil pump / H. Prakash, S. Manjula. // *International Journal of Engineering and Technical Research*. – 2014. – Vol. 2, Issue 5. – P. 79–81.
2. Patel J. Design, development and experimental investigation of epitrochoid internal lobe pump / Jayesh Patel. // *International Journal of Technical Innovation In Modern Engineering & Science*. – 2015. – Vol. 1, Issue 2. – P. 72–78.
3. Пат. 110823 Україна, МПК В24В 5/36, В21К 1/30, В23Р 15/14, В24В 19/08. Спосіб шліфування внутрішнього профілю зовнішнього колеса героторної передачі в умовах планетарного обкату. / Скібінський О. І., Гнатюк А. О., Підгаєцький М. М.; заявник і патентотримач Кіровоградський національний технічний університет. Заявка № а2013130050; заявл. 11.11.2013; опубл. 12.05.2015. Бюл. № 9.
4. Производство зубчатых колес: Справочник / [С. Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган и др.]. – М: Машиностроение, 1990. – 464 с.
5. Гнатюк А. О. Експериментальні дослідження показників точності при шліфуванні профілю цівкового колеса героторної пари в умовах планетарного обкату / А. О. Гнатюк // *Вісник НТУ «ХП»*: Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Технології в машинобудуванні». – Харків: НТУ «ХП», 2017. – № 17 (1239). – С. 18-25.
6. Кривий П. Д. Геометричні та математичні моделі формування шорсткості циліндричних поверхонь при точінні та розточуванні / П. Д. Кривий, В. В. Крупа. // *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*. – Житомир: ЖДТУ, 2010. – №2 (53). – С. 44–55.
7. До питання 3D-моделювання шорсткого шару поверхні після шліфування кругами із НТМ [Текст] / В. І. Лаврінченко, О. О. Пасічний, Г. А. Петасюк, В. В. Смоквіна // *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. — 2010. — № 4. — С. 77-85.
8. Моделирование динамики формообразования криволинейного профиля при шлифовании / В. Н. Ананченко, А. И. Ананченко, И. К. Цыбрий, В. В. Головкин // *Вестник ДГТУ*. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2007. – Т. 7. – №1. – С. 54–69.
9. Investigations of the cutting forces in creep-feed surface grinding process / [M. Gostimirovic, D. Rodic, P. Kovac and others.]. // *Journal of Production Engineering*. – 2015. – Vol. 18, No.2. – P. 21–24.
10. Скібінський, О. І. Дослідження умов існування робочого профілю деталей позацентридних епіциклоїдальних цівкових передач внутрішнього зачеплення / О. І. Скібінський, В. І. Гуцул, А. О. Гнатюк // *Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація: зб. наук. пр.* – Кіровоград: КНТУ, 2012. – Вип. 25, ч. 1. – С. 238-241.
11. Спиридонов А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 184 с.