

25006, м. Кропивницький,
пр. Університетський, 8
ЦНТУ
Вченому секретарю
спеціалізованої вченої ради
К 23.073.02
Дідику О.К.

ВІДГУК

офіційного опонента, кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника Кривошеї Анатолія Васильовича на дисертаційну роботу Гнатюка Андрія Олександровича на тему «Удосконалення процесу фінішної обробки профілю цівкового колеса героторної пари», яка подана до спеціалізованої вченої ради К 23.073.02 Центральноукраїнського національного технічного університету на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – Процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1.1 Актуальність роботи

Сучасний рівень розвитку техніки характерний істотним збільшенням використання в різних галузях народного господарства механізмів вищих кінематичних пар з деталями зі складними формами робочих поверхонь. і одночасним підвищенням вимог до їх функціональних, експлуатаційних, економічних, екологічних та габаритних показників. Прикладами таких кінематичних пар являються зубчасті передачі різних класів, видів і типів. Не є виключенням і складнопрофільні зубчасті передачі, які утворюють внутрішнє зачеплення героторної пари, яка знайшла широке застосування в сучасній техніці.

Для України в умовах ринкової економіки важливість проектування і якісного виготовлення зубчастих передач зі складними робочими поверхнями пояснюється такими причинами:

- у зв'язку з масовим придбанням машин і механізмів імпортного виробництва (комбайни, трактори, автомобілі, верстати з ЧПУ, редуктори та ін.), простежується велика імпортозалежність і значні витрати валютних коштів при придбанні запчастин, особливо зубчастих передач з нестандартним вихідним контуром. Так, за весь період експлуатації машин і механізмів, витрати на їх ремонт і технічне обслуговування у зв'язку із зносом деталей, в кілька разів перевищують вартість самих машин і механізмів;

- низька конкурентоспроможність вітчизняних машин і механізмів через низькі експлуатаційні та ін., показники деталей цих машин і механізмів особливо зубчастих передач складної форми від яких багато в чому залежить якість машини або механізму в цілому;

- в даний час проблема якісного виготовлення зубчастих передач складної форми для імпортних машин і механізмів та вітчизняних, виготовлених для

експорту вирішується закупівлею імпортного обладнання і технології (включаючи закупівлю складнопрофільних інструментів для їх чорнової та чистової обробки, при необхідності зубошліфувальних інструментів та алмазних інструменти для їх правки), а також вимірювальної техніки. І знову ж, використання імпортної техніки і технології вимагає значних валютних витрат на придбання швидкозношувального складнопрофільного імпортного ріжучого, абразивного і правлячого алмазного інструменту. Тому робота присвячена покращенню якісних показників складнопрофільної зубчастої поверхні цівкового колеса героторної пари є актуальною.

Зачеплення героторної зубчастої пари, винайдене на початку ХХ сторіччя, сьогодні широко використовується в гідравлічних машинах, редукторах та механізмах де необхідно досягти високих передатних відношень, буровому устаткуванні, тощо. Але питання якісної обробки функціональних поверхонь зубчастих коліс героторної пари залишається проблематичним.

Показники зачеплення (кінематична точність, плавність ходу, дотримання фіксованих значень зазорів в точках спряження, шумові характеристики, надійність та безвідмовність, ККД) безпосередньо залежать від точності виготовлення складнопрофільних робочих поверхонь коліс, їх шорсткості та поверхневої твердості. Тому особливу зацікавленість викликають точні, фінішні методи обробки профілів цівкових коліс, які є менш технологічними у порівнянні з фінішними методами обробки сателіту зовнішнього зачеплення.

Аналіз літературних джерел стосовно особливостей проектування зачеплення та технології виготовлення цівкових коліс, дозволив виявити основні недоліки проведених раніше досліджень:

- обмеженість інформації щодо вибору раціональних параметрів внутрішнього зачеплення, та недосконалість математичного опису кривих, що окреслюють профілі коліс;
- обмежена кількість методів формоутворення профілю цівкового колеса (особливо фінішної обробки загартованих коліс);
- відсутність в літературних джерелах результатів ґрунтовних досліджень стосовно процесів формоутворення складнопрофільної поверхні цівкового колеса, та показників його якості (точності та шорсткості), які забезпечуються відомими методами обробки.

На основі аналізу літературних і патентних джерел та виявлених недоліків автором вірно сформульовані задачі досліджень.

Таким чином, проектування і виготовлення зубчастих передач на машинобудівних підприємствах України підвищеної якості, надійності і довговічності, з використанням універсальних модернізованих верстатів та сучасних вітчизняних інструментів для їх обробки є актуальною народногосподарською проблемою, а її рішення дозволить заощадити значні валютні кошти і виробляти вітчизняні конкурентоспроможні машини і механізми.

1.2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність

Достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій представленої на розгляд дисертації сумнівів не викликають. Отримані результати базуються на теоремах аналітичної геометрії та аналізу функцій, теорії зубчастих зачеплень та

теорії різання, теорії проектування інструменту. Для моделювання та обчислень використано CAD-систему «SOLIDWORKS». Експериментальні дослідження були проведені згідно програми ротатабельного багатofакторного плану. Розглянутий в роботі метод обробки і його вдосконалений варіант було реалізовано на виробництві ТОВ Кіровоградський інструментальний завод «ЛЕЗО».

1.3. Наукова новизна отриманих в роботі результатів полягає у тому що автором:

- вперше встановлено вплив конструктивних параметрів зачеплення героторної пари на появу «вироджених ділянок» (ділянок самоперетину) еквідистанти до епіциклоїди;

- вперше отримано раціональний опис профілю цівкового колеса у вигляді єдиної неперервної кривої, отриманої в результаті розв'язання задачі формоутворення обвідної сімейства профілів сателіту;

- вперше синтезовано профіль інструменту на основі увігнутої ділянки еквідистанти для повноцінного формоутворення активної ділянки зуба цівкового колеса, що дозволило суттєво покращити параметр шорсткості (в 2,5-2,8 разів);

- вперше отримано математичну модель процесу формоутворення профілю цівкового колеса інструментами що мають профілі на основі опуклої і увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди, яка також враховує параметри зачеплення і технологічні режими обробки;

- вперше отримано теоретичний прогноз похибки форми зуба цівкового колеса, яка обумовлена нерівномірною кривизною інструментальних профілів і має систематичну повторюваність незалежно від режимів обробки.

1.4. Практичне значення результатів роботи полягає в наступному:

- розроблено інженерну методику синтезу і розрахунку профілю шліфувального круга на основі увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди, визначено область застосування даного інструменту в залежності від конструктивних параметрів оброблюваного колеса;

- розроблено методику побудови увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди, що дає змогу покращити точність профілювання абразивного інструменту в процесі його виготовлення або правки.

- отримано теоретичний прогноз похибки профілю цівкового колеса (в межах однієї цівки), як результату пружних деформацій елементів технологічного оснащення під дією сил різання. Це дозволило ідентифікувати фактори, які впливають на відхилення (конструкція шліфувальної оправки з виносним шпинделем, нерівномірна кривизна профілю інструменту, зміна сил різання по величині і напрямку), та надати відповідні рекомендації щодо усунення та мінімізації впливу зазначених факторів.

- доведено підвищену стійкість інструменту з увігнутим профілем за рахунок більш міцної структури масиву ріжучих зерен, що дає можливість застосовувати абразивний інструмент на керамічній зв'язці, який відрізняється низькою собівартістю.

- розроблено конструкцію пристрою для шліфування внутрішніх поверхонь (зубчастих, шліцьових, складнопрофільних отворів), який дозволяє розширити технологічні можливості обробних центрів;

- розроблено багатофункціональну компоновку зубошліфувального обробного центру для фінішної обробки широкого спектру зубчастих коліс з евольвентним і відмінним від нього профілем зубців (зовнішнього і внутрішнього зачеплення);

- представлено оригінальну технологію обробки сателіту комплексом черв'ячних інструментів, представлено методику розрахунку початкового інструментального контуру наведених інструментів, а також введено гвинтову канавку в конструкцію черв'ячної фрези з метою розвантаження процесу різання увігнутою ділянкою контуру.

1.5. Повнота викладення основних результатів дисертації

За результатами роботи опубліковано 15 наукових праць, із них: 9 статей у фахових наукових виданнях України, матеріали 4-х доповідей на наукових конференціях, отримано 2 патенти України на винахід. Із них 5 статей включені до міжнародних наукометричних баз (у тому числі Scopus).

2. АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 132 найменувань на 15 сторінках та 6 додатків на 35 сторінках. Основний текст дисертації викладений на 153 сторінках, повний обсяг дисертації становить 224 сторінки, включаючи 69 рисунків та 10 таблиць.

В першому розділі проведено аналіз конструкції зачеплення героторної пари, проаналізовано технологічність виготовлення коліс, та розглянуто відомі методи обробки цівкового колеса, яке має низку технологічних складностей виготовлення. Відсутність ґрунтовних досліджень і рекомендацій стосовно проектування зачеплення, та істотні недоліки відомих методів обробки, дозволили сформулювати відповідні задачі, вирішення яких спрямоване на вдосконалення існуючих та створення новітніх методів обробки профілю цівкового колеса. Зокрема, особливу увагу приділено заключним (фінішним) методам обробки, які визначатимуть в подальшому експлуатаційні характеристики зачеплення. Обґрунтовано актуальність та сформульовано мету досліджень.

У другому розділі вирішено задачі синтезу кривих-профілів коліс зачеплення, а також представлено та обґрунтовано спосіб удосконалення одного з відомих методів шліфування цівкового колеса. Визначено умови існування еквідистанти до епіциклоїди в придатному для застосування вигляді. Встановлено, що некоректні значення конструктивних параметрів зачеплення обумовлюють появу ділянок само перетину зазначеної кривої. Отримано раціональне математичне описання профілю цівкового колеса у вигляді єдиної неперервної кривої. В результаті аналізу відомих методів обробки, був обраний прогресивний метод шліфування, при якому цівкове колесо здійснює рух планетарного обкату. Профіль інструменту повторює профіль виступу внутрішнього колеса-сателіта. З метою вдосконалення, запропоновано задіяти для профілювання інструменту увігнуту ділянку. Моделювання утворення мікронерівностей уздовж профілю цівки показує, що застосування увігнутої ділянки дозволяє досягти шорсткості в 2,5-2,8 рази меншої у порівнянні з

опуклою, при однакових значеннях дискретності побудови. Для успішного застосування увігнутої ділянки розроблена спеціальна методика побудови повноцінного формотворного профілю шліфувального круга та визначено взаємозв'язок параметрів інструменту і конструктивних параметрів зачеплення.

В третьому розділі досліджено кінематику формоутворення профілю цівкового колеса, виконано моделювання похибок обробки, та представлено метод підвищення точності профілювання увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди. Зокрема, проаналізовано шість схем формоутворення, які поєднують в собі різні за складністю технологічні рухи. Виконано дослідження ковзання профілів інструменту і колеса в процесі обкочування, та моделювання просторової траєкторії точки взаємодії. Це дозволяє моделювати поверхню цівки та проводити оптимізацію режимів обробки для досягнення мінімальної шорсткості. Встановлено, що в залежності від системи відліку, точка контакту одночасно рухається уздовж еквідистанти і профілю цівки. Якщо профіль круга адекватний опуклій ділянці, то вектори швидкостей направлені зустрічно, якщо увігнутий – попутно. Відповідно змінюється схема різання і умови взаємодії профілів під час обробки. Швидкості змінні в часі, що спричинятиме зміну подачі на подвійний хід круга в процесі обкочування. Запропоновано стабілізувати дане негативне явище шляхом приведення швидкості обкату до незмінної в часі величини.

Розглянувши жорсткість елементів технологічної системи при шліфуванні цівкового колеса встановлено, що найбільш піддатливим до дії сил різання елементом технологічного оснащення є оправка з виносним шпинделем. Отримавши формулу радіальної складової сили різання, яка враховує динамічну зміну параметрів різання, на основі моделювання деформацій оправки було отримано теоретичний прогноз похибки обробки інструментами, які мають опуклий і увігнутий профіль. Встановлено, що пікові значення відхилення для увігнутої форми перевищують в 2,5-3 рази цей показник для опуклої, що пояснюється значно більшими значеннями площ контакту опуклої і увігнутої поверхні. Нерівномірна кривизна профілю інструменту обумовлює відхилення заданої форми, характер якого має повторюваність незалежно від режимів обробки.

Четвертий розділ містить детальний опис обладнання та технологічного оснащення для проведення експериментальних досліджень, методику та результати досліджень. Було спроектовано та виготовлено оснащення, адаптоване до вертикального обробного центру Millstar BMV850, яке включає в себе шліфувальну оправку з виносним шпинделем і пристрій для надання цівковому колесу руху обкату. Оправка зі шліфувальним кругом вводиться в порожнину колеса, утворюючи зачеплення. Методика експериментального дослідження передбачає реалізацію базового методу шліфування, а також його вдосконаленого варіанту у виробничих умовах, з послідуєчим вимірюванням якісних показників в метрологічній лабораторії. Після реалізації методу шліфування цівкового колеса та послідуєчих вимірів було встановлено, що поле розсіювання параметру відхилення заданого профілю при обробці кругом з опуклим профілем знаходиться в межах 6,5-35,9 мкм, а застосовуючи увігнутий профіль – 5,7-38,3 мкм. В той же час, шорсткість оброблених поверхонь для опуклого профілю знаходиться в межах 1,27-2,11 мкм, для увігнутого –

0,54-0,83 мкм. Аналіз отриманих даних свідчить про достатньо високі показники якості обробки, попри наявні недоліки - низьку стійкість інструментів, складність конструкції пристроїв, складність налагодження, та невідпрацьовану технологію вцілому.

У п'ятому розділі наведені допоміжні технічні рішення та розробки, спрямовані на спрощення технічної реалізації та впровадження у виробництво зазначеного методу шліфування. Сюди слід віднести компоновку зубошліфувального обробного центру, пристрою для шліфування внутрішніх зачеплень, черв'ячні інструменти для високоефективної обробки профілю колеса-сателіту і методики їх розрахунку, а також новий інструмент для високоефективної фінішної обробки цівкових коліс в умовах обкату.

3. ЗАУВАЖЕННЯ ДО ДИСЕРТАЦІЇ І АВТОРЕФЕРАТУ

1. У другому розділі при визначенні обвідної сімейства поверхонь краще було б використовувати кінематичний метод і вирішувати рівняння зачеплення чисельним методом на ПЕОМ, без розрахунку аналітичних залежностей.

2. У підрозділі 3.5 моделювання пружних відтисків здійснювалось як низка окремих статичних локальних досліджень дії сил різання, натомість процес шліфування необхідно досліджувати як динамічно неперервний.

3. На рис. 4.10 поля розсіювання геометричного відхилення профілів цівкових коліс, при обробці кругами, які мають опуклий та увігнутий профіль, не вказують на явну перевагу увігнутого профілю над опуклим, що теоретично прогнозовано автором у другому розділі.

4. Незрозуміло звідки взято параметри цівкового колеса на рис.4.6. і чому саме ці параметри взяті для порівняння з експериментально отриманими показниками.

5. В конструкції безпривідної шліфувальної оправки на рис. 5.1 застосовано конічну передачу з круговим зубом, яка являє собою джерело вібрацій, що може негативно вплинути на якість обробки.

6. Відсутні дослідження температурних процесів, що мають місце в зоні контакту шліфувального круга з цівкою.

7. На сторінках 47, 129, 130 є посилання на «ГОСТ», замість яких необхідно використовувати посилання на ДСТУ.

8. В роботі і навіть в її назві автор використовує вираз «обробка профілю цівкового колеса», що є некоректно. Необхідно використовувати вираз «обробка складнопрофільної поверхні зуба цівкового зубчатого колеса».

Вважаю, що зазначені вище недоліки суттєво не впливають на позитивну оцінку роботи.

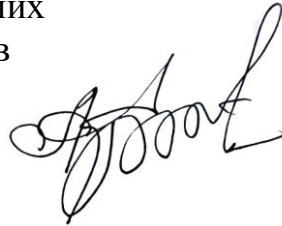
4. ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА РОБОТИ

Дисертаційна робота «Удосконалення процесу фінішної обробки профілю цівкового колеса героторної пари» є закінченою науково-дослідною роботою, в якій висвітлено вирішення проблеми підвищення якості обробки функціональних поверхонь колеса із внутрішнім зубчатим вінцем. Враховуючи наукову новизну, практичну цінність, результати апробації, кількість публікацій, вважаю, що дисертаційна робота повністю відповідає вимогам Порядку присудження

наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., а її автор, Гнатюк Андрій Олександрович, заслуговує присвоєння наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти».

Офіційний опонент:

старший науковий співробітник відділу формування
прецизійних елементів складнопрофільних
виробів Інституту надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля Національної
академії наук України, к.т.н.



А.В. Кривошея

Підпис Кривошеї А.В. засвідчую :

Учений секретар Інституту надтвердих
матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України,
к.т.н.



В.В. Смоквина