

# **В І Д Г У К**

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора Гриця І.Є.

на дисертаційну роботу Гнатюка Андрія Олександровича

**«Удосконалення процесу фінішної обробки профілю цівкового колеса героторної пари»,**

поданої до захисту у спеціалізовану вчену раду К 23.073.02

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 теми дисертаційної роботи.** Зубчасті колеса і передачі на сьогодні є невід’ємними складовими сучасних машин та механізмів, які виготовляють значними обсягами. До цих деталей належать також колеса героторної пари, які набули найширшого використання в різноманітних гідравлічних машинах – помпах, гідромоторах, а також у редукторах транспортних засобів, бурових установок, тощо. Від якості виготовлення цих деталей залежать показники експлуатаційної надійності машин, в яких вони працюють – довговічність та безвідмовність. Витрати на забезпечення високої якості робочих поверхонь героторної пари, особливо на завершальних етапах технологічних процесів їх виготовлення, значною мірою впливають на показники техніко-економічної ефективності виробництва та вартості машин загалом. Окрім того, внаслідок особливостей будови та складності профілювання цівкового колеса з внутрішнім зачепленням, важливою задачею є також раціональне конструювання колеса та інструментів для його фінішного оброблення. Виходячи з такого стану, тема роботи є актуальною для сучасного машинобудівного виробництва.

Дисертаційна робота виконана в рамках держбюджетної науково-дослідної програми «Оптимізація технологічних процесів обробки робочих поверхонь деталей позacentроїдних епіциклоїдальних передач» (номер держреєстрації 0105U005360).

**1.2. Наукова новизна** отриманих в роботі результатів полягає у тому, що автором вперше:

- обґрунтовано умови існування та розроблено математичну модель неперервної кривої, якою описують контур зубців цівкового колеса внутрішнього зачеплення, в залежності від конструктивних параметрів зачеплення героторної пари;

- отримано математичне описання процесу формоутворення зубців цівкового колеса героторної пари, яке дає змогу проектувати абразивний інструмент для фінішної обробки зміцнених поверхонь зубців, та моделювати якісні показники профілю колеса у вигляді функції від параметрів зачеплення та режимів оброблення;

- отримано залежності похибок оброблення та відхилення показників шорсткості робочих поверхонь цівкового колеса від робочих режимів процесу чистового шліфування, що забезпечило можливість оптимізації якості оброблення;

- доведено теоретично та підтверджено експериментально основи синтезу оптимальної будови шліфувального круга, контур якого описується увігнутою ділянкою еквідистанти до епіциклоїди (яка окреслює западину колеса-сателіта), яка забезпечує покращення шорсткості оброблюваного колеса.

- розроблено математичну модель похибки процесу фінішного шліфування та вирішено зворотну задачу – обґрунтування параметрів верстата та інструменту з умов забезпечення необхідної якості оброблення.

**Обґрунтованість та достовірність** наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі базується на коректності припущень, застосуванні базових положень теорії зубчастих зачеплень, теорії різання та формоутворення складних поверхонь, положень аналітичної геометрії та функційного аналізу, основоположних засад проектування різальних інструментів. Обґрунтованість наукових положень та висновків, сформульованих в роботі підтверджено моделюванням на основі сучасних програмних продуктів, експеримента-

льними дослідженнями, виконаними в лабораторних та виробничих умовах ТОВ Кіровоградський інструментальний завод «Лезо», з використанням універсального і спеціального обладнання та вимірних засобів, адекватністю теоретичних і практичних результатів. Результати роботи в повній мірі викладено в опублікованих автором працях. Частка автора у працях зі співавторами визначальна.

### **1.3. Практичне значення результатів роботи.**

Практична цінність наукових досліджень А.О.Гнатюка полягає в тому, що їх впровадження дозволило удосконалити та підвищити ефективність процесу чистового шліфування робочих поверхонь цівкового колеса героторної пари завдяки наступним результатам:

- розробленню конструкції безпривідної шліфувальної оправки з виносним шпинделем для універсальних обробних центрів з вертикальним розташуванням основного шпинделя;

- розробленню нової компоновальної схеми багатоцільового зубошліфувального оброблювального центру;

- створенню методики проектування та розрахунку черв'ячних інструментів (черв'ячних фрез та шліфувальних кругів) для високопродуктивного оброблення зубчастих вінців коліс-сателітів;

- розробленню інженерної методики проектування та розрахунку параметрів нового інструменту для фінішного шліфування цівкових коліс героторної пари (з прямою і гвинтовою формою зуба);

- обґрунтуванню та доведенню умови вибору раціональних режимів різання, зокрема, подачі на подвійний хід інструменту, що дозволило підвищити точність чистового оброблення зубців;

- підвищено стійкість абразивних інструментів для фінішного шліфування цівкового колеса, за рахунок застосування увігнутої ділянки еквідистанти.

Основні технічні рішення захищені деклараційними патентами України №110823 та №4113461. Результати досліджень впроваджено у виробництво на ТОВ Кіровоградський інструментальний завод «Лезо».

## 2. АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та Додатків. Основний зміст дисертації викладено на 153 сторінках, він містить 69 рисунків, 10 таблиць та перелік першоджерел із 132 найменувань; обсяг Додатків – 35 с.

**У вступі** автор обґрунтовує актуальність проблеми та обраного для дослідження напрямку, формулює мету і задачі дослідження, визначає наукову новизну, наводить дані про апробацію роботи, її практичну цінність, показує зв'язок з науковою тематикою, дає список публікацій автора за темою дисертації.

**У першому розділі** виконано огляд літературних джерел, які стосуються тематики роботи. Описано будову та конструктивне виконання героторних пар, переваги епіциклоїдальних зубчастих зачеплень порівняно з іншими видами, сфери ефективного застосування даних передач, проаналізовано особливості розрахунку, традиційні підходи і недоліки існуючих методів проектування епіциклоїдальних поверхонь. Детально розглянуто методи і технології нарізання, формоутворення та чистового оброблення цівкових коліс, конструкції і особливості використання зубонарізного обладнання, інструментів та спорядження для їх виробництва. На основі аналізу стану проблеми в галузі оброблення робочих профілів планетарних коліс героторних передач сформульовано мету і задачі досліджень дисертаційної роботи.

**Другий розділ** дисертації присвячено визначенню умов існування кривих-профілів коліс, а також представлено та обґрунтовано спосіб удосконалення одного з відомих методів шліфування цівкового колеса. Зокрема, визначено умови появи ділянок самоперетину еквідистанти до вкороченої епіциклоїди, та представлено математичне описання обвідної сімейства еквідистант до епіциклоїд. На підставі аналізу відомої з теорії формоутворення умови існування обвідної сімейства плоских кривих, отримано систему рівнянь, яка дає змогу описати спряжений профіль зубців цівкового колеса у виді єдиної неперервної кривої. Перевірка спряження та умови відсутності інтерференції профілів цівкового колеса і

сателіта, показала виконання умов зубчастого зачеплення і правильність синтезу робочих профілів. Таким чином, підтверджено можливість практичного використання отриманих залежностей для проектування героторних пар та розроблення програмного забезпечення для автоматизації проектування таких передач.

Іншою задачею, яка вирішена в цьому розділі, є синтез робочих поверхонь шліфувальних інструментів для чистового оброблення профілів цівкових коліс в умовах обкочування. Новим вирішенням є запропонована схема шліфування, яка базується на розділенні операції на два переходи, в ході яких окремо шліфуються випуклі і увігнуті ділянки зубчастих вінців цівкового колеса (для випадку коли профіль цівкового колеса окреслено неперервною обвідною). Шліфування виконується різними інструментами з протилежною кривизною робочих профілів (опуклим та увігнутим), що дало змогу значно підвищити якість поверхонь, особливо на вершинах зубців. З аналізу контакту абразивних зерен з оброблювальними поверхнями зроблено висновок про підвищену стійкість та надійність інструменту з однаковою кривизною формотворного профілю і оброблюваної цівки.

Для двох видів шліфувальних кругів проаналізовано кінематичні схеми процесу обкочування, та виявлено методологічні похибки профілювання, які визначаються умовами обкочування випуклими та увігнутими робочими абразивними поверхнями і зроблено висновки про переваги та недоліки кожної зі схем. З дослідження умов роботи героторних пар, локалізовано ділянки активних поверхонь зубців цівкових коліс, що дало змогу розробити методику проектування шліфувальних кругів з увігнутим профілем. Аналітично обґрунтовано форму профілю круга, за якої можливе оброблення усієї активної частини дуги цівки, яке виключає шліфування западини, без втрати якості зачеплення. Таке рішення дозволяє зменшити витрати на шліфувальний інструмент, реалізацію даного процесу, та зменшити собівартість цівкових коліс.

**У третьому розділі** наведено опис та аналіз кінематичних схем, які реалізують рухи взаємного обкочування сателіта і цівкового колеса. Виведено аналітичні вирази для описання зміни положення координатних осей, проекцій швидкостей руху цівкового колеса та результуючої швидкості точки контакту

профілю інструменту з профілем цівки. Це дало змогу встановити зміну колової подачі (швидкості обкату) в часі, та заключити, що величина шліфованої ділянки за подвійний хід (осциляція дискового інструменту) в процесі шліфування зубців буде змінюватись. Перехід до просторової схеми шліфування з урахуванням усіх кінематичних рухів процесу та відмінностей в формі робочої поверхні кругів випуклої та увігнутої, дозволив відтворити закономірності формоутворення ділянок радіусних поверхонь в процесі їх чистового оброблення.

Для реалізації шліфування за запропонованою схемою з використанням консольної оправки, виконано дослідження дії сили різання при шліфуванні інструментами з різними знаками робочих формотворних профілів. Розглянуто варіанти рухомого контакту робочої поверхні інструментів з поверхнями зубців в різних фазах. Визначено чинники, які характеризують товщину зрізу одиничним зерном, та виведено залежності для розрахунку сил різання як функції сумарної площі контакту зерен і параметрів структури абразивного круга. З використанням сучасних комп'ютерних програм та засобів встановлено вплив сили різання на величини пружних деформацій оправки з інструментом, які визначатимуть похибку оброблення зубців цівкового колеса. На основі отриманих результатів та їх аналізу, обґрунтовано раціональні конструктивні параметри інструменту, значення робочих режимів процесу шліфування, а також зкореговано отримані раніше рівняння еквідистанти до епіциклоїди.

В **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень параметрів точності та шорсткості зубчастих поверхонь з метою підтвердження отриманих математичних моделей та теоретичних залежностей. Автор описує обладнання та оснащення, яке використовувалося для експериментів в умовах діючого виробництва – 3-х координатний оброблювальний центр та оригінальні конструкції верстатних пристроїв: для профільного шліфування зубчастого вінця, та для забезпечення планетарного руху заготовки. Вимірювання контрольованих параметрів колеса здійснювалося з використанням високоточних сучасних приладів та засобів – координатно-вимірювальній машини фірми «Карл Цейс», профілографа-профілометра, зубчастого мікрометра та оптичного

профілешліфувального верстата. Дослідження виконані на основі розробленого плану повнофакторного експерименту з багатократним повторенням дослідів. Одночасно з перевіркою достовірності теоретичних розрахунків визначався дійсний період стійкості шліфувальних кругів. Перевірка адекватності підтвердила правильність отриманих результатів.

**П'ятий розділ** присвячено розробленню перспективних конструкцій інструментів та спорядження для удосконалення розроблених в дисертації схем чистового оброблення коліс героторних пар. Заслуговують уваги для впровадження та практичного використання у виробництві конструкція оправки, в якій привід головного руху шліфувального круга реалізовано безпосередньо від шпинделя оброблювального центра. Її будова, в поєднанні з можливостями сучасних ОЦ дає змогу використовувати такі оправки для шліфування не лише різноманітних видів зубчастих поверхонь внутрішнього зачеплення, а також для оброблення різноманітних некруглих отворів, у тому числі у важкодоступних місцях деталей машин складної форми.

Новизною характеризується розроблене автором компоновання зубошліфувального багатоопераційного шліфувального верстата з ЧПК з розширеними технологічними можливостями, який передбачається оснастити двома інструментальними поворотними супортами для шліфування зубців цівкових коліс та сателітів планетарних передач. При цьому спеціалізація верстату не обмежується колесами героторної пари і передбачає можливість обробки евольвентних зубчастих коліс. На додаток до ідей, які реалізовані в дисертації, автор також пропонує конструкцію удосконаленої черв'ячної фрези із гвинтовими розвантажувальними канавками для оброблення зубчастих поверхонь сателітів героторних пар. При цьому неповністю видалений припуск при вершині зубців видалятиметься на послідуючій операції зубошліфування черв'ячним кругом. Отримано вихідні формотворні контури зазначених черв'ячних інструментів. Синтезовано принципово нову конструкцію глобоїдного шліфувального круга для оброблення внутрішніх зубців цівкового колеса, обґрунтовану теоретичними розрахунками всіх необхідних параметрів для проектування та виготовлення натурального зразку.

### 3. ЗАУВАЖЕННЯ ПО РОБОТІ

3.1. Відмічено, що шліфування кругом з увігнутим профілем дає змогу до 2,8 р. покращити якість поверхні за параметром шорсткості (роз.2.3), проте іншою стороною цього рішення буде істотне зростання площі контакту інструменту з оброблювальною поверхнею, пришвидшена втрата різальних властивостей круга («засалювання»), а також збільшення сили різання шліфування.

3.2. В розділі 3.4 складові сили різання розглядаються в рухомій системі координат, прив'язаній до профілю поверхні зубця (цівки), а напрямок, який обрано для аналізу похибки оброблення – радіальний відносно цівки. Разом з тим, пружне деформування оправки буде мати місце одночасно у двох площинах відносно самої оправки: в площині симетрії шліфувального круга, в напрямку до центра його обертання (радіальне деформування оправки) і в тангенційному напрямку (перпендикулярно до площини симетрії круга – осьове деформування оправки). В такому разі сумарні сили, які діють в обох площинах будуть визначені як суми проєкцій сил  $P_x$  і  $P_y$  на відповідні напрямки, з урахуванням їх знаків, а обидві складові пружного деформування оправки з інструментом від цих сумарних сил необхідно було б привести до радіальної площини цівки, в якій вони викликають найбільшу похибку оброблення. Виходячи з таких міркувань видається недостатньо обґрунтованими рекомендації щодо оптимізації конструкції оправки з виносним шпинделем за критерієм жорсткості (розд.3.5).

3.3. У пункті 3.6 представлено спосіб підвищення точності побудови увігнутої ділянки еквідистанти до епіциклоїди шляхом рівномірного розподілу точок побудови, натомість дану задачу більш доцільно було б вирішувати збільшенням загальної кількості точок побудови кривої.

3.4. Попри позитивні технічне рішення, запропоновано в розділі 5.3 для шліфування сателітів і цівкових коліс в умовах неперервного обкочування, проблемою для реалізації запропонованих конструкцій інструментів та схем фінішного шліфування можуть бути складності виготовлення таких інструментів, особливо – затилування черв'ячних фрез з епіциклоїдальним початковим контуром



та гвинтовими розвантажувальними канавками, а також профілювання та правлення глободних шліфувальних кругів.

3.5. Не цілком зрозуміло, чому в оглядовій і теоретичній частині дисертації фігурують два варіанти профілю цівкового колеса, які відрізняються конструктивним виконанням міжцівкової западини, проте в експериментальній частині розглядається лише варіант конструкції, в якому профіль западини не контактує з інструментом.

#### **4. ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК ПО ДИСЕРТАЦІЙНІЙ РОБОТІ**

4.1. Загалом, дисертаційна робота Гнатюка А.О. є завершеною науковою працею, яка характеризується актуальністю, науковою новизною, сукупністю вагомих теоретичних і наукових положень та одержаних практичних результатів. Основні положення роботи, що виносяться на захист, та які підтверджені експериментально, створюють наукову та прикладну основу для удосконалення процесу чистового шліфування зубчастих профілів коліс героторних пар, та обґрунтовують раціональні засади профілювання їх зубчастих поверхонь, ефективні робочі режими даного процесу і конструктивно-технічні параметри обладнання і оснащення для їх реалізації. Отримані математичні моделі контактної взаємодії поверхонь шліфувальних кругів з випукло-увігнутими поверхнями зубців, силового навантаження, пружних деформацій елементів верстата і спорядження, їх впливу на точність та якість поверхонь, які підлягають обробленню, а також конструктивні рішення, які випливають з розроблених моделей, дають змогу істотно удосконалити будову верстатів та спорядження, розширити їх технологічні можливості, підвищити розмірну точність і покращити якість виготовлення цівкових коліс героторних пар та, загалом, підвищити ефективність процесу їх фінішного оброблення. Основні результати роботи впроваджені у виробництво.

4.2. В авторефераті достатньо точно і повно відображено основні положення та висновки, ступінь новизни, сутність та практичне значення результатів досліджень. Внесок автора у підготовку публікацій, відображених в авторефераті, є визначальним. Зміст автореферату відповідає дисертації.

4.3. Основні положення, результати досліджень та висновки дисертації опубліковані у п'ятнадцяти наукових працях, серед яких 9 статей – у фахових виданнях України, 5 наукових статей – в періодичних виданнях, що входять до системи міжнародних наукометричних баз даних, 4 – тези у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій; отримано два патенти України на винахід.

4.5. Зауваження, зроблені до дисертації та автореферату, в цілому, не зменшують наукової новизни та практичної цінності одержаних результатів, які виносяться дисертантом на захист, а дисертаційна робота заслуговує позитивної оцінки.

4.6. Зазначене вище дає підстави вважати, що дисертаційна робота Гнатюка А.О. «Удосконалення процесу фінішної обробки профілю цівкового колеса героторної пари» є завершеною самостійною науковою працею, яка відповідає вимогам п.11 «Порядку присудження наукових ступенів» та вимогам Департаменту атестації кадрів Міністерства освіти і науки України щодо кандидатських дисертацій, а її автор – Гнатюк Андрій Олександрович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

Завідувач кафедри  
технології машинобудування  
НУ «Львівська політехніка»  
д.т.н., професор



**Грицай І.Є.**

Підпис Грицай І.Є. засвідчую:  
Вчений секретар  
НУ «Львівська політехніка»



**Брилинський Р.Б.**