

ВІДЗИВ

офіційного опонента **Внукова Юрія Миколайовича**
на дисертаційну роботу Громнюка Сергія Івановича
«Технологічне забезпечення якості нарізання зубчастих коліс радіально-
коловим способом»,

подану до захисту в спеціалізовану вчену раду Д35.052.06
в Національному університеті «Львівська політехніка»
на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.02.08 «Технологія машинобудування»

1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

1.1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Зубчасті передачі та зубчасті колеса широко використовують у всіх галузях машинобудування у коробках зміни швидкостей та подач в транспортному машинобудуванні, приводах різноманітних машин, прокатних станів, підйомних, передавальних і поворотних механізмах тощо. Важливе значення та роль, яку відіграють зубчасті передачі в сучасних машинах пояснюють інтенсивність наукових досліджень у цій галузі, результатами яких стало удосконалення технологій зубообробки та зубчастих зачеплень, створення нових поколінь верстатів з ЧПК, зубонарізних інструментів та їх матеріалів.

Одним із перспективних напрямків удосконалення та підвищення ефективності даних процесів є радіально-коловий спосіб зубооброблення (РК-спосіб). Його суть полягає в нарізанні зубчастих поверхонь дисковим інструментом – тонкою відрізною фрезою при неперервному обкочуванні, як це є у черв'ячному зубофрезеруванні та на аналогічному обладнанні. Проте, на відміну від черв'ячної фрези, яка повинна мати той же модуль, що й нарізані нею зубчасті колеса, одну дискову фрезу можна використовувати для широкого діапазону модулів шляхом зміни ексцентриситету при її установці, тому цей спосіб створює основу високоефективного та ощадного напрямку удосконалення технології виготовлення зубчастих коліс. Використання простого і недорогого дискового інструменту при збереженні основних засад неперервного обкочування дає змогу багатократно підвищити продуктивність і якість зубонарізання та одночасно істотно зменшити витрати на різальні інструменти і технологічне спорядження. Разом з тим, в результаті інтенсифікації робочих режимів, зокрема, збільшення швидкості різання, зростають коливання, вібрації та динамічні навантаження в технологічній системі, які негативно впливають на якість оброблених поверхонь і призводять до виходу з ладу різальних лез твердосплавних пластин, якими оснащують дискову фрезу, а також знижують якість і точність оброблення зубчастих коліс. На сьогодні цей спосіб і його технологія ще недостатньо теоретично розроблені, відсутні обґрунтовані рекомендації для його широкого впровадження, зокрема, не встановлено як

впливають умови перебігу технологічного процесу та його основних чинників на формування параметрів точності та мікронерівності робочих поверхонь зубців.

Приймаючи до уваги ці обставини, тема дисертаційної роботи Громнюка С.І. є актуальною для сучасного машинобудування.

Виконання дисертаційної роботи здійснювалося в період 2010 - 2016 р.р., зокрема, в рамках програм НДР МОН України «Прогресивні енергоощадні технології виготовлення зубчастих передач виробів і обладнання машинобудування, енергетики та транспорту» Держреєстр. № 0113U006296 (термін виконання – з 01.09.2013 р. до 31.12.2015 р.) та госпдоговірної теми ГД 0482 “Розроблення технологічного оснащення для модернізації зубофрезерного верстата моделі 5К32 і технології нарізання зубчастих коліс способом радіально-колового формоутворення», Держреєстр. № 0114U004751 (термін виконання - з 01.06.2014 р. до 15.05.2015 р.).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій та їхня достовірність.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше розроблені та обґрунтовані параметри нового технологічного процесу нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом, які ув'язують початкові умови зубофрезерування і показники якості зубчастих поверхонь, зокрема:

- адаптовано до умов радіально-колового способу методичку математичного описання і відтворення миттєвої перехідної поверхні, в межах якої яких відбувається різання дисковою фрезою в радіально-коловому способі та виведені аналітичні залежності для розрахунку і моделювання параметрів зрізів фрези в активному просторі її роботи і формоутворення зубчастих поверхонь;

- виведено аналітичні вирази для кількісної оцінки середніх та максимальних значень площі поперечного перерізу зрізів на вершинних і бокових лезах, на підставі яких отримано формули для розрахунку сили різання і її складових, які представлені у виді функції від основних чинників технологічного процесу в умовах неперервного обкочування;

- вперше досліджено та узагальнено закономірності зміни сили різання і зумовлених її дією пружних деформацій при різанні в одній впадині за один оберт фрези залежно від величини осьової подачі, діаметра і кількості зубців фрези, модуля і кількості зубців колеса в РК-способі,

- вперше встановлено вплив умов зубофрезерування, пружних деформацій і коливань в технологічній системі верстата на точність і шорсткість профілів зубців в РК-способі, які дозволяють керувати процесом зубофрезерування та розраховувати раціональні режими різання і параметри інструменту і верстата;

- виконано експериментальні дослідження, в яких використано нові способи визначення сили різання, якими підтверджено теоретичні положення та висновки роботи;

- на основі досліджень, наведених в роботі, сформульовано напрямки удосконалення зубофрезерних верстатів і розширення їх технологічних можливостей на основі засобів програмного керування робочими рухами в радіально-коловому способі зубофрезерування.

Обґрунтованість наукових положень та висновків, сформульованих в роботі забезпечено комплексним підходом до наукового аналізу та експериментальних досліджень, використанням базових положень технології машинобудування, теорії різання, теорії формоутворення поверхонь, теорії зубчастих зачеплень, теорії точності механічного оброблення, математичної статистики, пакетів сучасних комп'ютерних програм. Достовірність результатів, отриманих в роботі підтверджено експериментальними дослідженнями, виконаними в лабораторних та виробничих умовах. Результати роботи в повній мірі викладено в опублікованих автором працях.

1.2. Практичне значення результатів роботи.

Практична цінність дисертаційних досліджень полягає в тому, що вони дають змогу розширити можливості та виявити резерви удосконалення технологічних процесів зубообробки на базі нового технологічного способу зубонарізання, забезпечити можливість керування якістю зубчастих коліс, зокрема:

- вперше на етапі технологічної підготовки виробництва обґрунтовано вибір і розрахунок раціональних параметрів процесу зубофрезерування радіально-коловим способом; розроблено методику визначення робочих режимів для досягнення заданої точності профілів і шорсткості робочих поверхонь;

- створено метод розрахунку параметрів поперечного перерізу зрізів і контакту зубців дискової фрези в кожній частині її робочого простору, який враховує особливості кінематики РК-способу, дозволяє врахувати навантаження на усіх зубцях фрези та виявити нерівномірність сили різання для її вирівнювання і удосконалення процесу зубонарізання циліндричних коліс;

- розроблено новий безконтактний метод визначення складової сили різання за пружними деформаціями дискової фрези;

- розроблено нові компоновальні схеми зубофрезерних верстатів і їх оснащення з керованими від ЧПК приводами рухів різання і зворотно-поступального переміщення фрези для нарізання на одному верстаті одним різальним інструментом зубчастих коліс різних видів зачеплення і профілів зубців.

Отримані результати дисертаційного дослідження актуальні для різних галузей машинобудування, в яких виготовляють зубчасті колеса та передачі – автомобілебудуванні, тракторному і сільськогосподарському машинобудуванні, верстатобудуванні, гірничій промисловості, металургії.

Результати досліджень, наведених в дисертаційній роботі впроваджені у виробництво на ПРАТ «Львівський локомотиворемонтний завод» та в навчальний процес кафедри технології машинобудування НУ «Львівська політехніка»

2. АНАЛІЗ СТРУКТУРИ ТА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Дисертаційна робота складається із Вступу, 6 основних розділів, загальних висновків, бібліографічного списку та Додатків.

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

У першому розділі проаналізовано відомі технології нарізання циліндричних зубчастих коліс, основні методи і способи формоутворення зубчастих вінців. Наведено переваги та недоліки відомих технологічних процесів, охарактеризовано їх межі та галузі використання. Показано, що найбільш розповсюджений та універсальний спосіб - зубофрезерування модульними черв'ячними фрезами характеризується нерівномірністю зрізуваних шарів, коливанням сили різання і пружних деформацій. Цей недолік черв'ячного зубофрезерування не може бути усунений, а його присутність в різанні обмежує продуктивність даного процесу. Окрім того, модульні черв'ячні фрези належать до найскладніших та найбільш вартісних інструментів, в результаті чого собівартість зубчастих коліс є значною.

Описано переваги та можливості нового радіально-колового способу зубонарізання, який характеризується широкою універсальністю та порівняно незначними матеріальними витратами на різальні інструменти, оснащення і верстати. Наведені результати досліджень, виконаних різними авторами та колективами, які стосуються різних аспектів технологічного процесу оброблення зубчастих коліс РК-способом. В результаті вивчення першоджерел показано, що, незважаючи на значні надбання та розвиток теорії і практики в досліджуваній галузі, відомі дослідження не мають комплексного та системного характеру, скеровані на окремі аспекти в дослідженні даної технології і не можуть бути використані для математичного описання, моделювання та покращення даного технологічного процесу.

На основі виконаних в цьому розділі огляду, досліджень та аналізу стану у вказаних питаннях сформульовано задачі досліджень, які треба вирішити в дисертаційній роботі.

У другому розділі вирішується задача дослідження параметрів зрізів дискової фрези в процесі зубонарізання за РК-способом, викладена загальна методологія описання процесу різання при усуненні припуску із впадини між

зубцями та виведено основні залежності для розрахунку параметрів зрізів дискової фрези в РК-способі.

Процес різання і формування синусоїдальних профілів розглядається в послідовних кутових положення фрези φ_i , які визначаються її кутовим кроком, в усіх положеннях від входження до виходу фрези із впадини між зубцями. Процесу усунення припуску є таким, що відбувається у певній перехідній поверхні між поверхнею, з якої вже знято припуск та необробленою частиною впадини між зубцями. Автор використовує методику описання цієї перехідної поверхні для черв'ячного зубофрезерування, привівши її до умов фрезерування РК-способом, який характеризується іншою кінематикою. На основі цього підходу отримано залежності для розрахунку миттєвих значень у вказаних положеннях фрези параметрів зрізів, виконуваних окремими лезами та зубцями на куті повороту фрези 360° , протягом якого усувається частина припуску між зубцями колеса, що нарізається.

Отримані залежності дали змогу змодельовати, відтворити та проаналізувати закономірності зміни товщини, ширини і площі зрізів на зубцях та лезах дискової фрези при неперервному обточуванні інструменту і заготовки вивести залежності їх коливання в межах одного оберту фрези від низки параметрів технологічного процесу – модуля, кількості зубців фрези, її зовнішнього діаметра, осьової подачі, кількості зубців колеса, яке нарізають. На основі аналізу цих закономірностей виведені узагальнені залежності для розрахунку середніх і максимальних значень площі зрізів фрези. Ці дані необхідні для визначення умов навантаження і роботи інструменту та створили підстави для математичного описання сили різання і її складових.

У третьому розділі розглянуто питання теоретичних досліджень і моделювання сили різання та аналізу впливу основних параметрів процесу на її величину і закономірності зміни в циклі фрезерування.

При моделюванні сили різання враховано що ця сила є функцією параметрів зрізів, вона виникає на зубці фрези в момент врізання, змінюється за певним законом, який визначається зміною площі та товщини зрізів за оберт фрези. Разом з тим, остаточною силою, яка діє на фрезу, визначається сумою сил на усіх зубцях фрези, які одночасно перебувають в контакті з заготовкою, а її величина і напрямок дії за час контакту з заготовкою непостійні. Головну складову сили різання на одному зубці представлено функцією міцності оброблюваного матеріалу, площі поперечного перерізу зрізів та інтенсивності зсуву при різанні у виді коефіцієнта осадження стружки та/або кута зсуву. Враховано, що для дискової фрези, як багатозубчастого інструменту на довжині контакту з заготовкою присутні декілька зубців, тому фактична сила різання представлена сумою сил на всіх активних зубцях.

Отримані аналітичні залежності дали змогу визначити, як змінюється сила різання по куту повороту фрези при зміні основних чинників та

параметрів зубофрезерування та виявити узагальнені закономірності силового навантаження в радіально-коловому способі зубофрезерування.

В розділі 4 наведено результати дослідження пружних деформацій дискової фрези та їх впливу на точність нарізання зубчастих вінців, а також на величину мікронерівностей робочих поверхонь зубців в РК-способі. Автор встановив що в структурі сумарної похибки найбільший вплив на зниження точності обробки мають відхилення, викликані періодичними пружними коливаннями в технологічній системі зубофрезерного верстата. Тут розглянено три види похибок, зумовлених пружними деформаціями: деформації фрези в осьовому напрямку і в радіальному напрямку, та крутильні деформації на осі стола верстата з заготовкою зубчастого колеса.

Показано, що найбільшу похибку створює сила різання, яка виникає на бокових вхідних лезах і скерована в напрямку осі фрези, а періодичні пружні деформації змінюються в часі одного оберта фрези за закономірностями зміни площі перерізу зрізів на цих лезах. Виведено аналітичні залежності для розрахунку деформації фрези в її осьовому та в радіальному напрямках, а також крутильних деформацій на осі стола з частотою, рівною кількості зубців інструменту. Побудовані графіки залежності похибок обробки та відхилень профілів зубців від номінальних внаслідок дії цих чинників та виконано аналіз цих закономірностей для різних початкових даних технологічного процесу зубонарізання.

У цьому розділі також виявлено закономірності виникнення мікронерівностей профілів на зубцях внаслідок осьового переміщення інструменту, а також дискретності різів фрези в умовах неперервного обкочування.

У п'ятому розділі наведено результати експериментального дослідження процесу зубофрезерування РК-способом, тут встановлено залежності осьової складової сили різання від чинників РК-способу зубонарізання та виконано перевірку достовірності теоретичної моделі сили різання. Дослідження виконувалися за розробленою методикою, згідно якої сила різання вимірювалася безконтактно з допомогою електроіндуктивного давача, яким фіксувалися пружні коливання інструменту. Для цього попередньо тарувалися дискові фрези, а навантаження тарування здійснювалися з допомогою пневмоциліндра з системою регулювання тиску, а також з допомогою лабораторного динамометра, закріпленого на супорті токарного верстата. Порівняння теоретичних і експериментальних графіків зміни осьової складової сили різання в одній впадині між зубцями засвідчили про співпадіння теоретичних і дослідних результатів.

Експериментальні дослідження базувалися на методах повного факторного експерименту типу 2^2 , а змінними чинниками вибрано модуль ($m = 1$ мм - 3 мм) та кількість зубців фрези ($Z_{fp} = 45 - 72$). За результатами експериментів отримано узагальнену залежність для осьової складової сили різання.

Опрацювання результатів експериментальних досліджень за методикою ПФЕ показало відтворюваність дослідів за дисперсією відтворюваності і значенням критерією Кохрена. Перевірку значимості знайдених коефіцієнтів функції відгуку виконано з допомогою критерія Студента, а адекватність моделі підтверджено за значенням дисперсії адекватності та критерієм Фішера.

Мінімальні відхилення теоретичних значень осьової сили від експериментальних підтвердило достовірність теоретичної залежності та можливість її використання для вибору режимів різання, а також для розрахунку конструктивних і технічних параметрів фрези та верстата в радіально-коловому способі нарізання зубчастих коліс.

У шостому розділі описано методику вибору параметрів процесу зубофрезерування з урахуванням пружних деформацій та обґрунтовано напрямки удосконалення радіально-колового способу на основі отриманих залежностей і теоретичних положень дисертації. Важливість задачі вибору раціональних параметрів технологічного процесу підтверджено фото типових видів втрати працездатності дискових фрез внаслідок неправильно вибраних умов обробки нераціональних і завищених режимів різання, неправильно підібраних кількості зубців фрези та її діаметра.

Залежності, отримані в роботі та підтвержені експериментально містять параметри, які характеризують початкові умови. Це дало змогу вирішити зворотню задачу, що виникає на етапі технологічного проектування – розрахувати та обґрунтувати значення конструктивних, технічних і технологічних параметрів процесу РК зубофрезерування, які здатні забезпечити технічні умови на виготовлення зубчастого колеса – дотримання допуску на відхилення профілю зубців і забезпечення необхідної величини параметра шорсткості поверхонь зубців. Параметрами, значення яких можна регулювати є зовнішній діаметр фрези D_f ; кількість зубців фрези Z_f ; товщина фрези b ; радіальна жорсткість технологічної системи J_y ; крутильна жорсткість стола верстата G ; величина осьової подачі s_o . Також наведено методику вибору раціональних параметрів технологічного процесу на основі використання системи динамічного імітаційного моделювання Simulink MATLAB.

В шостому розділі окреслено можливості покращення радіально-колового способу зубонарізання та розроблено напрямки удосконалення кінематики зубофрезерного верстата, що працює за РК-способом. Автором обґрунтовано, що технологічні можливості РК-способу дозволяють нарізати колеса будь-яких профілів шляхом зміни закону руху інструмента модернізацією зубофрезерного верстату і використанням для переміщення фрези керованих від системи ЧПК, або комп'ютера приводів та наведено варіанти удосконалення зубофрезерних верстатів. Зокрема, розроблена компонувальна схема, в якій обертання дискової фрези надається від окремого серводвигуна, керованого системою ЧПК, або контролером. Числове програмне керування двома координатами – швидкістю різання і

швидкістю осьового переміщення фрези дозволяє нарізати зубчасті поверхні будь-яких профілів – евольвентних, зачеплення Новикова, аркових та ін. зміною швидкості переміщення (закону руху) інструментальної каретки.

3. ПОВНОТА ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

За результатами досліджень, викладених у дисертаційній роботі опубліковано 17 наукових статей, з яких 8 у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у виданні, яке включене до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття в іноземному виданні, 1 стаття в іншому виданні, 5 – у матеріалах науково-технічних конференцій; 1 патент України на корисну модель.

Теоретичні положення і практичні результати оригінальні, взаємопов'язані та отримані на основі системного аналізу, поставлені в роботі задачі послідовно вирішені автором. Загалом, досягнуто поставлену мету в роботі дослідження: обґрунтовано призначення раціональних конструктивних, технічних і технологічних параметрів, які забезпечують задану якість зубчастих поверхонь в процесі радіально-колового способу зубофрезерування на підставі наскрізного комплексного моделювання і врахування впливу пружних деформацій на точність зубооброблення.

4. ЗАУВАЖЕННЯ ПО ЗМІСТУ І ОФОРМЛЕННЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА АВТОРЕФЕРАТА

1. У реальному процесі, при врахуванні радіального руху, при кожному черговому врізанні буде змінюватися довжина дуги контакту фрези з поверхнею западини зуба нарізуваного зубця, і як наслідок, буде змінюватися кількість зубців, які беруть участь в зрізанні припуску. У роботі цей момент не розглядається.

2. З роботи не зрозуміло, як величина модуля колеса, яке нарізають, пов'язана з умовами обробки дисковою фрезою, товщина якої значно менша від ширини впадини нарізуваного зубця по ділильному колу, а також без врахування величини радіальної подачі, яка формує висоту зубця.

3. Не ясно, чому при одному оберті осцилюючої фрези спостерігаються два максимуми при визначенні товщини зрізу, сили різання і пружних деформацій фрези, якщо швидкість обертання фрези значно перевищує швидкості радіальної і осьової подач.

4. На рис.3.4 невірно вказані напрямки складових сили різання. Необхідно показати $P_z = P_o$ як у формулі (3.1), а P_y є радіальною складовою. Замість P_z необхідно позначити: P_h - горизонтальна складова, а замість P_y – P_v , вертикальна складова.

5. Оскільки РК метод є чорновим процесом усунення матеріалу з западин нарізуваного колеса, то, на думку опонента, вивчення пружних деформацій доцільно було б розглядати не з точки зору точності

нарізуваного профілю, а з точки зору умов руйнування дискової фрези.

6. На стор.115 зазначено, що для нарізання різних профілів зуба колеса необхідно керувати швидкостями різання та подачі. На думку опонента, профіль зуба у РК обробленні залежить від співвідношення, швидкості обертання колеса, що нарізається, і швидкості радіальної подачі.

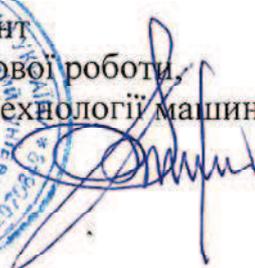
Вказані зауваження, в цілому, не зменшують наукової новизни та практичної цінності одержаних результатів, які виносяться дисертантом на захист.

5. ОЦІНКА ЗМІСТУ ДИСЕРТАЦІЇ І ЇЇ ЗАВЕРШЕНСТІ

Загалом дисертаційна робота Громнюка С.І. 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 науково-прикладну основу обґрунтування необхідних технологічних, конструктивних і технічних параметрів процесу зубофрезерування радіально-коловим способом для забезпечення заданої якості зубчастих коліс. Практичні результати дисертації дозволяють використовувати розроблені наукові засади для комплексного та системного теоретичного і експериментального аналізу технологічного процесу зубофрезерування з забезпеченням його максимальної ефективності.

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 у авторефераті, є визначальним. За змістом дисертація і автореферат – ідентичні.

Зазначене вище дає підставу вважати, що дисертаційна робота Громнюка С. І. «Технологічне забезпечення якості нарізання зубчастих коліс радіально-коловим способом» є завершеною самостійною науковою працею, яка відповідає вимогам п.11 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника" та вимогам Департаменту атестації кадрів Міністерства освіти і науки України щодо кандидатських дисертацій, а її автор – Громнюк Сергій Іванович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 «Технологія машинобудування».

Офіційний опонент
проректор з наукової роботи,
професор каф. «Технології машинобудування»
д.т.н. професор  Внуков Ю.М.

