

ВІДГУК

офіційного опонента Луціва Ігора Володимировича
на дисертаційну роботу Гасанова Магомедеміна Ісамагомедовича
«Основи процесу відновлення точності та якості крупногабаритних зубчастих
передач із застосуванням методів імітаційного моделювання»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Актуальність теми

Зубчасті передачі знаходять широке застосування в різних галузях промисловості. Ефективність виробництва в гірничодобувній і переробній галузях пов'язана із певним рівнем розвитку машин транспортних і енергетичних систем, приводи яких включають в себе унікальні крупногабаритні зубчасті передачі діаметром до 8,5 метрів і модулем до 65 мм. Гірські і транспортні машини працюють при високих навантаженнях в екстремальних умовах навколишнього середовища, абразивне зношення і вібраційний характер навантаження яких призводить до прискореної втрати функціональних параметрів зубчастих передач, при цьому скорочуються терміни експлуатації приводів.

Практичний досвід показує, що для крупногабаритних зубчастих передач ремонт і відновлення є економічно найбільш доцільними. Сучасний процес ремонту крупногабаритних зубчастих коліс вимагає розробки нових підходів до стратегії відновлення функціональних параметрів, методів формоутворення, забезпечення надійності процесів механічної обробки, верстатів та інструментів.

Важливе значення при цьому мають наукові теоретичні і експериментальні дослідження, покликані підвищити рівень забезпечення експлуатаційних властивостей зубчастих коліс з урахуванням їх несучої здатності і контактної взаємодії, які залежать від стану поверхневого шару в цілому (макровідхилення, хвилястості, шорсткості, фізико-хімічних властивостей), а не тільки від параметрів шорсткості. Тому необхідний комплексний підхід до вивчення зміни форми зубів, зношення і подальшого відновлення. Цьому питанню і присвячена дисертація, що опонується.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Гасанова М.І. є достатньо високим і базується на таких положеннях: аналізі науково-технічних джерел за даною проблемою; обґрунтованій постановці мети і задач дослідження; використанні сучасних підходів та методів наукового дослідження; зіставленні і критичному аналізі отриманих результатів у порівнянні з результатами інших дослідників; якісному формулюванні отриманих висновків.

Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату при правильному розумінні використовуваних наукових підходів (теоретико-ймовірнісного, частотного тощо) і фізичних явищ. Отримані результати перевірені шляхом альтернативного вирішення відповідних задач, порівняння одержаних результатів з аналогічними даними, які наявні в літературних джерелах, що підтверджує обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі результатів дослідження.

Достовірність результатів досліджень

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур математичного аналізу і методів математичної фізики, відповідністю змісту математичних формулювань фізичній суті описуваних процесів. Наукові результати здобувача і практичні рекомендації успішно впроваджені у виробництво. Достовірність отриманих наукових результатів досліджень також підтверджена припустимою розбіжністю між теоретичними та експериментальними даними і використанням сучасного устаткування та приладів, наприклад, динамометра Kistler 9257BA, вимірювача вібрації ГлобалТест AP2043–50, мікротвердоміра ПМТ-3, профілометра–профілографа Mytutoyo SurfTest SJ–301. Окрім того, в роботі використані пакети прикладних програм типу MathCAD, MatLAB, AutoCAD.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести такі:

1. Вперше встановлені і науково обґрунтовані комплексні параметри оцінки стану поверхонь, довговічності, мінімально можливих пластичних деформацій зубів зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс після лезової обробки, що дозволило забезпечити їх якісне відновлення та експлуатаційні властивості.

2. Удосконалено теорію імітаційного моделювання взаємозв'язків якості зубчастого зачеплення крупногабаритних модульних коліс в процесі експлуатації при зношуванні і процесів їх обробки при відновленні, що дозволило оптимізувати параметри різання та якісні властивості відновленого поверхневого шару евольвентного профілю зубчастих коліс.

3. Отримав подальший розвиток вплив питомого зношування зубів в контактній зоні на потужність, затрачену на подолання сил тертя з урахуванням забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубів відновлюваних коліс, що забезпечило збільшення продуктивності обробки.

4. Вперше визначено сумарне зношення поверхні зуба в контактній зоні в залежності від умов тертя, фази зачеплення і часу контакту, що дозволило збільшити стійкість високопродуктивного швидкісного інструменту.

5. Отримала подальший розвиток математична структурно-параметрична модель процесу обробки крупногабаритних зубчастих коліс, яка забезпечує задані експлуатаційні властивості поверхонь відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс, а також враховує дійсну форму профілю зуба після зношення.

6. Отримала подальший розвиток імітаційна модель управління процесом фінішної лезової обробки зубів відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс, що дозволило забезпечити експлуатаційні властивості в умовах обмежень щодо якості і точності формованих поверхонь зубів.

7. Вперше визначений та математично описаний взаємозв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс на основі оцінки показників якості поверхонь, що дозволило вирішити основну проблему зубообробки – забезпечення продуктивності, точності та якості відновлення крупногабаритних зубчастих коліс.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання

Цінність результатів дисертації для науки – процеси механічної обробки, верстати та інструменти – полягає в розвитку теорії відновлення крупногабаритних зубчастих коліс на основі імітаційного моделювання виробничих процесів, підвищення продуктивності процесу високошвидкісної лезової зубообробки на основі швидкісного зубофрезерування спареними фрезами, що забезпечують якість поверхневого шару в межах $R_z = 10\text{--}20$ мкм, швидкість різання $V = 3\text{--}5$ м/с для зубчастих коліс з модулем зачеплення 12–65 мм.

Для машинобудівних підприємств практична цінність дисертаційної роботи полягає у запропонованій методиці систематизації дефектів і методів їх усунення, методиці розрахунку параметрів стану поверхневого шару відновлюваних поверхонь зубів крупногабаритних коліс в залежності від умов їх обробки, методиках: моделювання взаємозв'язку експлуатаційних властивостей поверхонь зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс з їх показниками якості; вибору і призначення системи параметрів поверхневого шару зношених і відновлюваних крупногабаритних зубчастих коліс.

Результати роботи впроваджені у виробництво на ДП «Завод ім. В. О. Малишева» (м. Харків), ДП «Харківське конструкторське бюро з машинобудування ім. О. О. Морозова» з економічним ефектом 775 тис. 000 грн; ТОВ «Костянтинівський завод механічної обробки» (м. Костянтинівка), при відновленні крупногабаритних зубчастих коліс з сумарним річним економічним ефектом 787 тис. 375 грн; ТОВ «Слобожанська промислова компанія» (м. Харків), при відновленні зубчастих коліс важких тракторів з річним економічним ефектом 495 тис. 240 грн; у навчальному процесі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» (м. Харків).

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основний зміст дисертації відображений у 51 науковій публікації, з них: 23 статті у фахових виданнях України (19 – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз, 2 статті у закордонних фахових виданнях, включених до міжнародної наукометричної бази Scopus), 4 патенти України (3 – на винахід, 1 – на корисну модель); 1 – навчальний посібник; 21 – у матеріалах конференцій.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Гасанова Магомедміна Ісамагомедовича складається зі шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

У **вступі** наведено обґрунтування теми дослідження, сформульовано мету, задачі і методи дослідження. Описано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію матеріалів дисертації і публікації, що відображають її зміст.

У **першому розділі** виконано аналіз оцінки довговічності крупногабаритних зубчастих передач за початковими параметрами евольвентних профілів зубів без урахування забезпечення параметрів стану поверхневого шару зубчастих коліс і відновлених крупногабаритних зубчастих вінців. Це є вельми наближеним, не відображає того факту, що через зношення зубів форма профілю стає відмінною від початкової евольвентної поверхні. В результаті цього змінюються характеристики контакту (щодо навантажень та кінематики), які, в свою чергу, інтенсивно змінюють процес зношування і форму профілів зубів по лінії контакту і в поперечному перерізі.

Розглянуті критерії формування структур і параметрів систем обробки, що забезпечують задані експлуатаційні властивості зубчастих коліс, які зношуються і підлягають відновленню. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що основи забезпечення продуктивності, точності та якості ремонту і відновлення крупногабаритних зубчастих коліс з урахуванням основних показників зубчастих передач регламентують їх надійність, і в значній мірі визначаються експлуатаційними властивостями зубчастих циліндричних коліс (границею витривалості, зносостійкістю, коефіцієнтом тертя, контактною жорсткістю, міцністю).

В першому розділі показано, що експлуатаційні властивості характеризуються станом поверхневого шару зубчастих коліс, який визначається технологією їх виготовлення. Несуча здатність і контактна взаємодія зубчастих коліс залежать від стану поверхневого шару в цілому (макровідхилення, хвилястості, шорсткості, фізико-хімічних властивостей) і тому в роботі і розглянуто комплексний підхід до вивчення стану поверхневого шару.

На підставі проведеного аналізу сформульовані мета і завдання досліджень.

У другому розділі наведено методологію наукових досліджень, яка включає формалізацію опису процесу відновлення функціональних властивостей крупномодульних зубчастих передач. Проведено аналіз експлуатації зубчастих передач. Внаслідок нерівномірного зношення робочих поверхонь зубів, їх профілі перестають бути евольвентними і загальна нормаль до профілів в чіткій відповідності з основним законом зачеплення перетинає лінію центрів в різних точках (миттєвих центрах швидкостей), що викликає скривлення лінії зачеплення. Непостійність положення миттєвого центру швидкостей призводить до того, що значення передатного числа стає змінним. У той же час середнє значення передатного числа залишається незмінним, і дорівнює відношенню числа зубів зубчастих коліс, що знаходяться в зачепленні. У зв'язку з цим, а також з тим, що деякі характеристики зачеплення профілів зі зношеними зубами (наприклад, швидкість ковзання) змінюються незначно, зношені профілі можна назвати квазіспряженими.

В розділі досліджені теоретичні аспекти взаємозв'язку параметрів стану поверхневого шару зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з умовами їх обробки та встановлений взаємозв'язок параметрів стану поверхневого шару зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс з умовами їх обробки. Це показано в математичних рівняннях, які є основою при розробці алгоритмів і програми отримання оптимальних умов обробки з урахуванням забезпечення потрібних параметрів стану поверхневого шару відновлених крупногабаритних зубчастих коліс, виходячи з їх експлуатаційних властивостей.

У розділі 3 виконані дослідження математичної моделі прогнозування структури і параметрів систем зубообробки крупномодульних зубчастих коліс після відновлення. Обґрунтоване використання моделей параметрів поверхневого шару з метою зниження втомного викришування і запобігання поломки зубів відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

Таким чином, в розділі наведені теоретичні та експериментальні розрахунки з визначення оптимальних кутів ковзання $\Psi_{ков}$, при яких встановлюється стабільність процесу зубофрезерування, і необхідних умов по стійкості інструменту і якості оброблюваної поверхні відносно до найбільшого кута зуба фрези Ψ_{max} з оброблюваним зубчастим виробом через коефіцієнт ефективності

формування. Також удосконалена математична модель параметрів поверхневого шару з метою зниження пластичних деформацій і абразивного зношення відновлених крупногабаритних зубчастих коліс.

У розділі 4 удосконалена модель процесу виготовлення циліндричних зубчастих коліс і управлінням процесу формування поверхневого шару загартованих крупномодульних зубчастих коліс. В основі аналізу оптимізації процесу як об'єкта управління і вибору класу математичної моделі лежать закономірності явищ, що протікають у них, а також апріорна інформація про процеси в подібних об'єктах. Також встановлено аналіз взаємних зв'язків, що дозволяє виділити основні особливості динамічної системи верстата, у вигляді замкнутої через процес зубофрезерування багатоконтурної системи з джерелом енергії та впливом основних елементів системи та взаємодією між робочими процесами через пружну систему. У зв'язку з поділом елементами пружної системи ділянок протікання процесів виявляється можливим перейти до еквівалентного подання динамічної системи верстату як одноконтурної системи.

Розроблена математична модель і структура об'єкта управління з оцінкою адекватності математичної моделі ідентифікованого об'єкта з урахуванням забезпечення параметрів поверхневого шару загартованих циліндричних зубчастих коліс та процес імітаційного моделювання роботи циліндричних зношених та відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс у порівнянні з результатами теоретичних досліджень і даними, отриманими на експериментальних установках з урахуванням масштабного фактора. При цьому визначені оптимальні значення параметрів стану робочих поверхонь циліндричних зношених та відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс, що забезпечують необхідні експлуатаційні властивості.

У розділі 5 виконані експериментальні дослідження точності і якості процесу зубофрезерування при відновленні зношених великогабаритних зубчастих коліс. Розроблений процес моделювання роботи зношених і відновлюваних великогабаритних зубчастих коліс та створені високопродуктивні схеми формування зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс, які базуються на комплексному використанні основних принципів, а саме відсутності жорсткого кінематичного зв'язку між рухом різання – обертанням

інструменту - і рухами формоутворення; обґрунтовані застосування дискових спеціальних немодульних фрез діаметром 300 ... 450 мм, а також оптимізація процесів зубообробки варіюванням коефіцієнта профільного формоутворення з урахуванням жорсткості динамічної верстатної системи. Вперше визначено і математично описано взаємозв'язок експлуатаційних властивостей поверхонь зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс на основі оцінки показників якості поверхонь, що дозволило вирішити основну проблему зубообробки – забезпечення продуктивності, точності та якості відновлення великогабаритних зубчастих коліс. Для цього розроблено методику забезпечення якості обробленої поверхні, виключення рисок, відшаровування поверхневого шару, забезпечення рівноважного стану поверхневого шару з регламентуванням кута ковзання $\Psi_{ск}$, для чого розглянуті фізико-хімічні процеси механіки взаємодії оброблюваних зубчастих виробів та інструменту.

Удосконалено розрахунок залишкових напружень, зумовлених структурними і фазовими перетвореннями, що ґрунтується на розрахунку температурних залишкових напружень і залишкових напружень, зумовлених силовим впливом на поверхневий шар.

У розділі 6 представлено інструментальне оснащення для інтенсивної і високоякісної зубообробки встановлених загартованих крупномодульних зубчастих коліс. Виявлений взаємозв'язок між залишковими напруженнями і показниками зміцнення.

Розроблений регламент вибору і призначення параметрів обробки при зубофрезеруванні з урахуванням забезпечення необхідних параметрів поверхневого шару зношених і відновлених великогабаритних зубчастих коліс, що встановлює оптимальні умови зубофрезерування, при яких забезпечується повна участь у зніманні припуску при зубофрезеруванні всіх зубів фрези. Запропоновані альтернативні зубошліфувальні процеси, які дозволяють значно підвищити якість поверхневого шару і точність зубообробки крупномодульних загартованих зубчастих коліс, знизити трудомісткість операцій остаточної обробки зубів лезовим інструментом без придбання унікальних дорогих зубошліфувальних верстатів.

Розроблені та впроваджені високошвидкісні фрезерні супорти зубостругального і вертикально–зубофрезерного верстату зі спеціальними твердосплавними фрезами і дисковими немодульними фрезами, оснащеними різальною керамікою. Також створено гаму універсальних немодульних лезових інструментів для обробки крупномодульних загартованих зубчастих коліс.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

У додатках наведені види зношення великогабаритних зубчастих коліс з аналізом загальних висновків щодо вибору і призначення системи параметрів поверхневого шару відновлених великогабаритних зубчастих коліс. Наведені дослідження конструкторсько–технологічних особливостей застосування вихідних контурів українського, англійського, німецького, французького і американського стандартів зубчастих передач у ремонтному виробництві.

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває внесок здобувача в наукову новизну та практичну цінність роботи.

В представленій докторській дисертації Гасанова М.І. не використано результатів його кандидатської дисертації.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. На стор. 25 дисертації вказано, що несуча здатність і зносостійкість зубчастих передач приводу визначається рівнем конструктивних рішень щодо забезпечення оптимальних умов роботи передач, якістю їх виготовлення і ступенем відповідності умов експлуатації, режимів, прийнятих при їх проектуванні, але не враховуються параметри ступеню точності зубчастих коліс 6ВГОСТ1643-81, 7ВГОСТ1643-81, 8ВГОСТ1643-81, 9ВГОСТ1643-81.

2. На стор.78 дисертації згадано, що у загальному випадку на утворення хвилястості поверхонь циліндричних зношених і відновлених крупногабаритних зубчастих коліс при зубообробці впливають такі чинники: початковий стан

поверхневого шару наплавленої поверхні; точність базування і закріплення заготовки зубчастого колеса і фрези; геометрія фрези і кінематика переміщення фрези і оброблюваного циліндричного зношеного і відновленого крупногабаритного зубчастого колеса, але не зазначається точність та жорсткість верстатного обладнання.

3. Відомо, що під остаточної обробки припуск залишають або на евольвентній поверхні зуба, або по всьому контуру профілю зуба. Перехідні поверхні зуба в ряді випадків теж обробляються після термообробки. Однак не зрозуміло є прийнята схема формоутворення впадини зуба.

4. У дисертації не розглянуті особливості операції остаточної обробки модифікованих зубчастих коліс, а також коліс із фланкуванням тощо. Можливо, при остаточної обробці таких зубчастих коліс на ділянках фланкування теж є перехідні евольвенти, які впливають на плавність, що не розглянуто в дисертації.

5. На стор. 81 дисертації при обробці складова H_3 особливо проявляється при переривчастому швидкісному зубофрезеруванні у вигляді так званої кінематичної хвилястості, але було би доцільно показати вплив параметрів різання та параметрів швидкісних фрез на зміну кінематичної хвилястості.

6. На стор. 112 дисертації співвідношення між кутом ковзання $\Psi_{ков}$ і найбільшим кутом контакту зуба фрези Ψ_{max} з оброблюваною поверхнею дозволяє встановити ефективність процесу зубообробки через коефіцієнт функціонального формування поверхневого шару K_p . Не зрозуміло, чи це співвідношення між кутом ковзання $\Psi_{ков}$ і найбільшим кутом контакту зуба фрези Ψ_{max} , має тільки геометричний вплив?

7. На стор. 191 дисертації на підставі аналізу конструкції зубчастої передачі визначено відхилення відстані між осями обертання коліс в напрямку осі Y . Але не зрозуміло, як впливає швидкість обертання на відхилення відстані між осями обертання коліс в напрямку осі Y .

8. У дисертації є деякі стилістичні та орфографічні помилки.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Гасанова Магомедміна Ісамагомедовича «Основи процесу відновлення точності та якості крупногабаритних зубчастих передач із застосуванням методів імітаційного моделювання» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. Дисертація є завершеною науково-дослідною працею, яка розв'язує важливу наукову-технічну проблему, суть якої полягає в узагальненні досвіду відновлення крупногабаритних зубчастих коліс, вимог до важконавантажених і відповідальних зубчастих передач з реалізацією принципів відновлення функціональних властивостей крупногабаритних зубчастих коліс на основі імітаційного моделювання високоякісної обробки, що дозволяють інтенсифікувати процес відновлення зуба в умовах обмежень на якість його поверхневого шару. Дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» від 24 липня 2013 р. № 567 щодо докторських дисертацій, а здобувач Гасанов Магомедмін Ісамагомедович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти.

Офіційний опонент,

Заслужений працівник освіти України,
завідувач кафедри конструювання
верстатів, інструментів та машин
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
доктор технічних наук, професор



Луців І.В.

Підпис д.т.н., проф. І. В. Луціва засвідчую:

Проректор з наукової роботи ТНТУ ім. І. Пулюя




Рогатинський Р.М.