

## РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, к.т.н., старшого наукового співробітника

**Руднєва Олександра Віталійовича**

на дисертаційну роботу Федоренка Віталія Сергійовича

**«Підвищення ефективності процесів швидкісного зубофрезерування на основі трибологічних і дисипативних енергетичних моделей»**

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

### 1. Актуальність теми

Зростання ефективності промислового виробництва значною мірою визначається впровадженням та удосконаленням гірничодобувального, переробного обладнання, а також потужних енергетичних і транспортних систем, у конструкцію яких входять великогабаритні машини з приводами, що містять зубчасті передачі з великим модулем ( $m = 12...65$  мм).

Підвищення контактної міцності таких передач безпосередньо залежить від рівня твердості зубчастої поверхні: її збільшення з HRC32 до HRC60 дозволяє зменшити розміри редуктора вдвічі, а його масу — утричі.

Разом із тим, виготовлення загартованих великомодульних зубчастих коліс (ЗКЗК) пов'язане з високою трудомісткістю. Це зумовлено необхідністю знімання значних припусків у процесі зубошліфування з метою усунення дефектів, що виникають після термічної обробки, а також ризиком появи прижогів і мікротріщин. До того ж, зубошліфувальні верстати мають обмеження за розмірами деталей, що підлягають обробці, що стримує широке застосування ЗКЗК.

З іншого боку, використання великомодульних зубчастих коліс без термічної обробки, коли технологічно неможливо виконати зубошліфування, часто призводить до їх виходу з ладу. Зважаючи на великі розміри і масу таких коліс, будь-які позапланові ремонти супроводжуються суттєвими фінансовими витратами.

Виготовлення високоточних ЗКЗК зі ступенем точності 6В–8В за ГОСТ 1643-81, що здатні працювати у широкому діапазоні швидкостей (0,5–30 м/с), потужностей (50–500 000 кВт), з діаметрами до 12 000 мм, шириною вінця до 1200 мм і модулем до 65 мм, часто ускладнюється через нестачу відповідного виробничого обладнання, обмежену номенклатуру інструменту для чистової обробки та відсутність глибоких досліджень щодо формування якісного поверхневого шару під час завершального зубофрезерування.

У зв'язку з цим доцільним є пошук та наукове обґрунтування технологічних шляхів підвищення зносостійкості та міцності зубців шляхом ефективної фінішної обробки ЗКЗК, яка забезпечить оптимальні параметри шорсткості та високу якість обробленої поверхні при одночасному зростанні продуктивності.

Таким чином, формування технологічних засад, що забезпечують високу точність, якість і продуктивність зубофрезерування ЗКЗК, є актуальним завданням важкого машинобудування і визначає головний вектор даного дисертаційного дослідження.

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дослідження проводились на кафедрі «Інтегровані технології машинобудування ім. М.Ф.Семка» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» у співробітництві з підприємствами важкого машинобудування ПАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ), ТОВ «КЗМО» (м. Костянтинівка).

## **3. Наукова новизна одержаних результатів**

Результати досліджень мають наукову новизну. Зокрема до найбільш суттєвих іноваційних доробок роботи можна назвати наступні:

1. Науково обґрунтовано систему інтегральних показників для комплексної оцінки стану поверхні після лезової обробки, прогнозування

довговічності загартованих крупномодульних зубчастих коліс та мінімізації залишкових пластичних деформацій зубців.

2. Створено механізм забезпечення заданих експлуатаційних характеристик поверхні зубців шляхом структурно-параметричного математичного моделювання процесу обробки.

3. Вперше обґрунтовано доцільність використання комплексного параметра стану поверхні зуба в умовах у багатокритеріальній оптимізації дворівневого технологічного процесу. Це дозволило встановити причинно-наслідкові зв'язки між режимами обробки та якісними характеристиками зачеплення циліндричних великомодульних передач.

#### **4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання**

Отримані результати мають суттєву прикладну цінність для підприємств важкого машинобудування, оскільки дозволяють впроваджувати перспективні технологічні схеми швидкісного зубофрезерування, що забезпечують формування якісного поверхневого шару та стабільних експлуатаційних характеристик загартованих крупномодульних зубчастих коліс. Зокрема, мова йде про ті випадки, коли раніше виконати чистову обробку зубців було технічно неможливо.

Запропоновано універсальну методику визначення параметрів стану поверхневого шару залежно від умов механічної обробки. Це дозволяє здійснювати прогнозування працездатності поверхонь та адаптувати технологію до конкретних вимог навантаження.

Створено систему комплексних критеріїв оцінки стану зубцевих поверхонь, яка враховує такі чинники, як мінімізація залишкових пластичних деформацій що впливає на довговічність роботи передачі, а також оптимізація дворівневого технологічного забезпечення експлуатаційних характеристик зубчастих коліс у багатокритеріальному середовищі.

Розроблено спеціалізоване технологічне оснащення та інструментальні рішення, що сприяють високопродуктивній обробці зубчастих коліс. Зокрема, реалізовано оптимізацію довжини головних різальних кромки фрез і запропоновано немодульні дискові фрези, які забезпечують стабільну якість обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс. Це призвело до помітного зростання продуктивності, точності та стабільності обробки.

Практичне впровадження результатів дослідження здійснено на таких підприємствах:

- ПАТ “Новокраматорський машинобудівний завод” (м. Краматорськ),
  - ТОВ “Костянтинівський завод механообробки” (м. Костянтинівка),
- а також у навчальному процесі Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

#### **5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором.**

За результатами дослідження дисертаційної роботи опубліковано 5 наукових праць, з них у фахових наукових виданнях України – 4, у реферативній базі Scopus – 1, наукових праць, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації – 5. Зазначене вище дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота є самостійним, завершеним науковим дослідженням, результати якого мають значення для зубообробної галузі машинобудування.

#### **6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації**

Робота Федоренка В.С. є завершеною науковою роботою, містить анотацію – українською та англійською мовами, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і два додатка.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності, точності та якості обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс. Досягнення цієї мети забезпечується вдосконаленням процесів зубофрезерування – зокрема, технологічних підходів, кінематики взаємодії інструмента з заготовкою, а також створенням відповідного оснащення. Це має забезпечити керовану якість поверхневого шару зубців і, як наслідок, покращені експлуатаційні характеристики зубчастих передач.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси, пов'язані з обробкою зубчастих коліс великого модуля.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показана її наукова і практична цінність, сформульовані мета і задачі дослідження, які необхідно вирішити для її досягнення, описано зв'язок дисертації з науковими планами та темами, приведена апробація дисертаційної роботи та інформація про авторський внесок здобувача в публікаціях.

У *першому розділі* проведено аналіз сучасного стану технологій обробки поверхневого шару зубців крупномодульних загартованих зубчастих коліс, з акцентом на можливість формування евольвентної поверхні, необхідної для забезпечення надійних експлуатаційних характеристик зубчастих передач у важкому машинобудуванні. Окрему увагу приділено існуючим рішенням для обробки крупногабаритних зубчастих передач з великою масою та розмірами. Встановлено, що подальше підвищення міцності таких коліс стримується недостатнім розвитком високоточних технологічних процесів чистової обробки після загартування.

У *другому розділі* дисертації представлено підхід до підвищення ефективності управління якістю та продуктивністю обробки загартованих зубчастих коліс великого модуля.

У *третьому розділі* обґрунтовано підходи до прогнозування структури та параметрів технологічних систем зубообробки важконавантажених загартованих зубчастих коліс на основі трибологічних і дисипативних енергетичних моделей. Виконано дисипативне та інформаційне моделювання

процесів різання, що дало змогу встановити зв'язки між технологічними параметрами та станом оброблюваної поверхні. Запропоновано системну модель технологічного забезпечення експлуатаційної надійності зубчастих передач.

У *четвертому розділі* подано моделювання взаємозв'язків між технологічними параметрами обробки та якістю зачеплення крупномодульних загартованих зубчастих коліс. Обґрунтовано вибір технологічного й метрологічного забезпечення, сформульовано комплексні показники стану поверхні та довговічності, а також досліджено вплив чистової обробки на якість поверхневого шару.

У *п'ятому розділі* розглянуто інструментальне забезпечення високопродуктивної обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс. Проведено оптимізацію геометрії ріжучого інструменту, досліджено точність обробки з урахуванням профілювання твердосплавних фрез, а також обґрунтовано ефективність технології швидкісного зубофрезерування з подальшим її впровадженням у виробництво.

*Висновки*, сформульовані у роботі, висвітлюють результати дослідження як вирішення висунутих в дисертації завдань. В цілому висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

*Список літератури* широко охоплює предметне поле дослідження, певною мірою відображає опрацювання автором значної кількості вітчизняних та закордонних джерел.

*Додаток А* містить список наукових праць автора дисертації.

*Додаток Б* містить інформацію про практичне впровадження результатів дисертації.

## **7. Достовірність отриманих результатів та висновків**

Достовірність отриманих результатів зумовлено поставленими метою та завданнями, а також використанням відповідної методології дослідження. Крім того, достовірність заявлених положень обґрунтовується комплексним підходом у вивченні визначеного об'єкта, що також зумовлює і низку певних методів, які були використані в процесі дослідження.

## **8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Дисертація виконана з дотримання вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Основні ідеї автора та результати дослідження викладено у чотирьох фахових статтях, однієї закордонної статті, а також дисертант активно приймав участь в українських та закордонних конференціях, де була проведена апробація ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

## **9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. В пункті 1.2 «Функціональний аналіз взаємодії поверхонь контакту загартованих циліндричних зубчастих коліс великого модуля» було розглянуто питання сил тертя, що виникають при контактній взаємодії ЗК, а саме тертя ковзання та кочення. Не цілком зрозуміло під які саме умови був описаний аналіз контактної взаємодії та по якій схемі.

2. В пункті 2.3 «Дослідження механізмів деформації та руйнування зрізаного шару при швидкісному зубофрезеруванні на основі атомарного підходу» не до кінця зрозуміло чи можна розглядати процес швидкісного зубофрезерування для зубчастих коліс з іншим профілем зуба, а не тільки прямозубих.

3. В пункті 3.2 «Дисипативне моделювання технологічних систем при зубообробці важконантажених зубчастих коліс» система «інструмент – заготовка» було описано доволі широко, але не вистачає конкретики. Оскільки не дисипативне моделювання охоплює велику кількість факторів, тому добре було б побачити більш детальний опис.

4. В пункті 3.4 «Системна організація моделювання технологічного забезпечення експлуатаційної надійності поверхонь загартованих зубчастих коліс великого модуля» зазначено, що для зменшення схильності зубів до викришування досягається шляхом формування рівномірного контактного шару та оптимізації шорсткості евольвентної поверхні, а саме за рахунок контрольованого формоутворення, де використовується ріжучий інструмент з обґрунтованим радіусом заокруглення різальної кромки і мінімізованим кутом ковзання в зоні обробки. Але не вказано з яким саме радіусом краще застосовувати інструмент, та як мінімізувати кут ковзання в зоні обробки.

5. На сторінці 102 в описі рисунка 3.22 вказано залежність функції щільності  $\Phi(Kx)$  де параметр  $P(K)$  залежить від комплексного параметра  $K$ . Але для самого параметра  $K$  не до кінця вказаний ліміт.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи. Дисертація є актуальною і має високу наукову цінність та практичну значимість.

## **10. Висновки**

Дисертаційна робота Федоренка В.С. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 13 – «Механічна інженерія» та спеціальності 131 – «Прикладна механіка».

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та певну практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Федоренка Віталія Сергійовича «Підвищення ефективності процесів швидкісного

зубофрезерування на основі трибологічних і дисипативних енергетичних моделей» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам автор, Федоренко В.С., заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 131 «Прикладна механіка».

Рецензент – кандидат технічних наук,

старший науковий співробітник

кафедри інтегровані технології

машинобудування ім. М.Ф. Семка

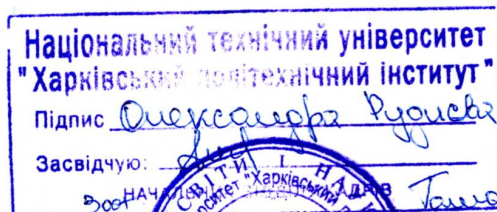
Національного технічного університету

«Харківський Політехнічний Інститут»

31.07.2025 р.



Олександр РУДНЕВ



Тамара Кошару