

ВІДГУК

офіційного опонента Пошивалова Володимира Павловича
на дисертаційну роботу Мартиненка Володимира Геннадійовича
на тему: «МІЦНІСТЬ СКЛАДЕНИХ ТА КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОТОРІВ
З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНОСТІ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ», що
подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.02.09 – динаміка та міцність машин

Актуальність теми. Надійність та міцність роторних машин є критичним фактором безпеки та економічної ефективності їх експлуатації. Аварії, що пов'язані з руйнуванням лопаток (через удар стороннього предмета чи втому) або виходом з ладу підшипникових вузлів, призводять до катастрофічних наслідків та величезних економічних збитків.

Існуючі методи проектування, які розглядають окремо динаміку валопроводу, міцність лопаток та аеродинаміку, вже не відповідають викликам сьогодення. Сучасні машини, що працюють на межі можливостей, з використанням композитів, магнітних підшипників та складних з'єднань, вимагають комплексного підходу до розробки нових конструкційних елементів з біметалічних та композиційних матеріалів, які вирішують конкретні виробничі проблеми, наприклад, абразивний знос.

Тому можна вважати, що дисертаційна робота Мартиненка В.Г., яка спрямована на вирішення науково-практичної проблеми створення методології, що дозволяє адекватно прогнозувати міцність складених та композиційних елементів роторів, враховуючи всю сукупність взаємопов'язаних динамічних чинників, є актуальною як з наукової, так і з прикладної точок зору та сприяє розвитку спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Робота має зв'язок з науковими планами та темами. Дослідження за темою дисертаційної роботи виконувалися в рамках фундаментальних та прикладних держбюджетних тем МОН України «Розробка методів математичного моделювання поведінки нових та композиційних матеріалів для оцінки ресурсу та прогнозування надійності елементів конструкцій» (ДР № 0117U004969), «Розробка математичних моделей та методів розв'язання нелінійних задач динаміки та міцності конструкцій із гомогенних та композиційних матеріалів» (ДР № 0118U002045), «Розвиток методів обчислювального інтелекту в задачах синтезу характеристик відповідальних елементів, підвищення надійності та ефективності інноваційної техніки» (ДР № 0121U100730), «Розробка математичних моделей та методів розв'язання задач динаміки і міцності конструкцій з монокристалічних сплавів та метал-матричних композитів» (ДР № 0124U000975), а також проекту з виконання наукових досліджень і розробок «Передова наука в Україні» Національного фонду досліджень України «Вібраційний захист пристроїв, апаратури, вантажів та людей від динамічних впливів в надзвичайних умовах на основі дослідження нелінійних коливань систем складної структури з керованими і пасивними елементами» (грант НФДУ № 2023.03/0255).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та достовірність результатів досліджень. Обґрунтованість та достовірність результатів дисертації забезпечується вдалим поєднанням глибокого теоретичного моделювання та цілеспрямованого натурного та чисельного експерименту.

Автор не обмежується суто теоретичними викладками, а доводить працездатність своїх методів на аналізі реальних промислових об'єктах та задачах. Ключовим фактором достовірності результатів досліджень можна вважати наступне.

1. **Пряма експериментальна валідація.** Розроблені чисельні моделі пройшли перевірку практикою. Модель міцності нового кінцевого з'єднання була перевірена випробуваннями на стенді до повного руйнування, причому

розрахункове руйнівне навантаження (213 кН) виявилось дуже близьким до усередненого експериментального (230 кН), а характер руйнування (зрив болтів та пластикація хвостовика) повністю співпав. Аналогічно, модель міцності біметалічної лопатки була підтверджена експериментами на розрив.

2. **Валідація на основі аналізу відмов.** Модель удару птаха якісно підтверджена фотографіями реальних пошкоджень лопаток турбовентиляторного двигуна. Методика аналізу динамічної втоми успішно застосована для пояснення реальної аварії на ТЕС, коректно визначивши причину руйнування лопаток (поєднання зносу пазів диска та пошкодження напрямного апарату).

Наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

Дисертаційна робота В.Г. Мартиненка містить низку нових наукових положень, які мають безпосереднє практичне застосування. Новизна полягає не стільки у відкритті нових фізичних законів, скільки у створенні нових інженерних методів та конструктивних рішень на стику різних дисциплін.

З точки зору проектування. Запропоновано вдосконалену узагальнену методику проектування, яка дозволяє у замкненому циклі пройти шлях від вимог технічного завдання до конструкції з підтвердженою міцністю, враховуючи аеродинаміку, міцність та динаміку.

З точки зору вирішення проблеми зносу. Вперше розроблено та доведено ефективність нових конструкцій лопаток для умов абразивного середовища:

- біметалічна лопатка (сталь-алюміній) з унікальним остовом, що дозволяє дешево замінити зношене алюмінієве перо;
- біматеріальна лопатка (сталь – метал-матричний композит), що поєднує ремонтпридатність біметалічної конструкції з високою зносостійкістю композиційного матеріалу на основі металевої матриці з армуючими елементами з карбїду бору;

- композиційна лопатка (полімерний армований композит) з ребрами жорсткості, що забезпечує низьку вагу та достатню міцність і стійкість.

З точки зору аналізу аварій. Розроблено та експериментально підтверджено високоточні моделі для «віртуальних випробувань» на екстремальні впливи:

- модель удару птаха дозволяє прогнозувати руйнування лопаток вентилятора турбовентиляторного двигуна, замінюючи дорогі натурні випробування;
- модель аналізу втомного руйнування дозволяє точно встановлювати причини аварій турбін, враховуючи сукупність їхніх дефектів.

З точки зору експлуатації підшипників. Розроблено методики розрахунку динамічних коефіцієнтів опор, які дозволили:

- діагностувати реальну проблему відмови допоміжного вентилятора, пов'язану з недовантаженням;
- обґрунтувати перехід на активні магнітні підшипники та розрахувати їх оптимальні параметри;
- визначити поріг стійкості руху роторів у ялинкових рифлених газових підшипниках, довівши перевагу обертових канавок, що є критично важливим для проектування безмасляних турбомашин.

Практичне значення роботи підтверджено актами впровадження від провідних вітчизняних та світових промислових (ТОВ «ІТЦ «Донвентилятор», SKF Eurotrade AB) та інжинірингових (SoftInWay, Inc., ТОВ «Передові цифрові рішення») компаній.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях. Основні результати дисертації висвітлені у 61 науковій праці, серед яких 21 основна публікація (включно з 5 статтями у виданнях Q1-Q3 баз Scopus/WoS) та 40 тез і статей апробаційного характеру (включно з 27 у виданнях Scopus/WoS). Географія та

спрямованість публікацій (ASME Turbo Expo, Defence Technology, Advances in Engineering Software) свідчить про високий міжнародний рівень досліджень. Повнота викладення є вичерпною.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертація логічно структурована і містить 425 стор.

У **вступі та першому розділі** чітко окреслено проблему досліджень. Показано, що існуючі моделі міцності та динаміки роторів занадто роз'єднані для сучасних складних машин. Автор слушно виділяє три ключові сфери, що потребують інтеграції: композитні матеріали, контактні з'єднання та підшипникові опори.

Другий розділ присвячений навантаженням. Розглядаються не лише стандартні відцентрові сили, але й складніші випадки: аеродинамічні сили від пошкодженого статора та ударні навантаження. Результати моделювання удару птаха, співставні з реальними пошкодженнями, є сильною стороною роботи.

Третій розділ присвячений контактним з'єднанням та матеріалам. Тут автором розроблено та, що найважливіше, експериментально перевірено на стенді нове конічне з'єднання лопатки. Цей підхід (модель + експеримент) є «золотим стандартом» інженерних досліджень. Застосування розроблених методів до аналізу реальної аварії на ТЕС, де враховано знос пазів диска, демонструє високу практичну компетенцію здобувача.

Четвертий розділ присвячений опорам роторів турбомашин. Автор розробляє власні уточнені моделі для визначення динамічних коефіцієнтів шарикових, активних магнітних та ялинкових рифлених газових підшипників. Найбільш показовим є аналіз причин відмови допоміжного вентилятора: діагностика проблеми (недовантаження шарикових підшипників, що веде до проковзування) та її вирішення (перехід на активні магнітні підшипники з розрахованими параметрами) є завершеним інженерним завданням. Аналіз стійкості ротора в газових підшипниках

та підтвердження переваги обертових канавок також є важливим практичним результатом.

У п'ятому розділі застосовані всі розроблені методики (аналіз міцності, динаміки, контактів, опор) для вирішення конкретної промислової проблеми – абразивного зносу лопаток великого промислового вентилятора. Автор пропонує інноваційні рішення: біметалічну та біматеріальну лопатки. Він проводить їх повний розрахунковий аналіз (статика, модальний аналіз, динаміка ротора з урахуванням пружності опор) та експериментально доводить міцність з'єднання, що демонструє повний цикл розробки нової продукції.

Висновки та додатки повністю відповідають змісту роботи.

Реферат містить усі основні положення й висновки дисертаційної роботи, є ідентичним основним положенням дисертації і відповідає встановленим вимогам.

Академічна доброчесність. Дисертація В.Г. Мартиненка виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності. Текст є оригінальним, посилання на джерела – коректними. Слід відзначити велику кількість одноосібних публікацій (9 з 21 основної), що підтверджує особистий внесок здобувача.

Зауваження та дискусійні питання

З огляду матеріалів дисертації та реферату можна зробити такі зауваження.

1. Автор обґрунтовано застосовує рівняння стану реального газу для моделювання газових підшипників. Однак у верифікаційному прикладі для повітря різниця між моделями реального та ідеального газу є мінімальною (менше 1-2%). При розгляді реальних промислових задач (наприклад, з вуглекислим газом або холодоагентами), де ця різниця була б суттєвою і виправдовувала б ускладнення моделі, доцільно було більш детально продемонструвати використання розробленої моделі.

2. Проведений аналіз доводить, що поєднання зношених пазів диска та пошкодженого напрямного призводить до перевищення границі витривалості. Виникає питання, чи достатньо лише цих двох факторів для руйнування за 339 годин (при 14 пусках), чи в реальній аварійній конструкції могли бути присутні інші, не враховані в моделі, фактори (наприклад, неякісний матеріал лопаток).
3. Дослідження міцності конічного з'єднання проводилось під дією статичного навантаження. Проте в роторі лопатка зазнає також динамічних, зокрема, втомних навантажень. Хотілось би зрозуміти, наскільки результати статичного випробування на розрив корелюють з поведінкою з'єднання в умовах вібрацій.
4. У силовому методі сила удару визначається з простого імпульсу. Це припущення ігнорує деформацію самої лопатки під час удару, що могло б зменшити пікову силу. Вочевидь такий квазістатичний підхід можна вважати консервативним.
5. При аналізі динаміки ротора в шарикових підшипниках враховується лише їхня жорсткість. Хоча демпфування в підшипниках кочення мале, воно не нульове. Відкритим залишається питання, чи не вплинуло ігнорування демпфування на розрахункові амплітуди та критичні швидкості.

Зазначені зауваження є дискусійними та не применшують загальної високої оцінки роботи.

Загальний висновок по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота В.Г. Мартиненка «Міцність складених та композиційних елементів роторів з урахуванням взаємопов'язаності динамічних процесів» є завершеним науковим дослідженням, що вирішує важливу науково-прикладну проблему розробки комплексних методів розрахунку міцності та динаміки сучасних роторних машин. Розроблені автором нові конструкції елементів (біматеріальні лопатки, конічне з'єднання), уточнені моделі екстремальних навантажень (удар птаха, абразивний знос) та інноваційні моделі підшипникових опор, що враховують

пружність змашування, рівняння стану реального газу, електродинамічні властивості системи управління, мають значне практичне значення для промисловості.

Дисертація відповідає вимогам п. 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» (Постанова КМУ №1197 від 17.11.2021 р.), а здобувач **Мартиненко Володимир Геннадійович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Офіційний опонент,

доктор технічних наук, професор,

член-кореспондент НАН України

директор Інституту технічної механіки

НАН України і ДКА України



Володимир ПОШИВАЛОВ

26.11.2025