

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу

**Мартиненка Володимира Геннадійовича**

на тему: «Міцність складених та композиційних елементів роторів з урахуванням взаємопов'язаності динамічних процесів», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

### **1. Актуальність теми**

Дисертаційна робота В.Г.Мартиненка присвячена вирішенню фундаментальної науково-прикладної проблеми в галузі динаміки та міцності машин – розробці узагальненого підходу до визначення міцності складених та композиційних елементів роторів турбомашин під дією стаціонарних і нестаціонарних динамічних чинників різної природи. Спільна дія сил інерції, сил тяжіння, складальних та температурних навантажень зумовлює виникнення низки динамічних процесів, що протікають під час роботи турбомашин. Такі динамічні процеси, як коливання валу, аеропружна поведінка лопаток, нелінійні ефекти в опорах, контактна взаємодія у вузлах кріплень, виявляються тісно взаємопов'язаними. Взаємообумовлений характер цих процесів призводить до необхідності їх інтегрованого аналізу. Водночас традиційні методи аналізу міцності, що здебільшого враховують окремі чинники ізольовано, не дозволяють досягти потрібної точності у розрахунках.

Сучасний розвиток турбомашинобудування характеризується впровадженням нових матеріалів, зокрема полімерних і метал-матричних композитів, а також інноваційних конструктивних рішень — безконтактних підшипникових опор, удосконалених систем кріплення лопаток та інших складних конструкційних елементів. Це формує нові виклики у забезпеченні надійності та довговічності роторних систем.

У зв'язку з цим, актуальність дисертаційної роботи Мартиненка Володимира Геннадійовича «Міцність складених та композиційних елементів роторів з

урахуванням взаємопов'язаності динамічних процесів», спрямованої на вирішення проблеми раціонального проектування турбомашин через розробку ефективної методології визначення їх міцності, що ґрунтується на принципі взаємопов'язаності динамічних процесів, не викликає сумнівів.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в рамках фундаментальних та прикладних держбюджетних тем МОН України (ДР № 0117U004969, ДР № 0118U002045, ДР № 0121U100730, ДР № 0124U000975), а також проекту Національного фонду досліджень України «Вібраційний захист пристроїв, апаратури, вантажів та людей від динамічних впливів в надзвичайних умовах на основі дослідження нелінійних коливальних систем складної структури з керованими і пасивними елементами» (грант НФДУ № 2023.03/0255), в яких здобувач був виконавцем окремих розділів. Крім того, результати досліджень впроваджені у виробничо-практичну діяльність ряду підприємств, зокрема, ТОВ «ІТЦ «Донвентилятор» (м. Харків, Україна), ТОВ «Передові цифрові рішення» (м. Харків, Україна), SoftInWay Inc. (Burlington, USA), SKF Eurotrade AB (Україна), що підтверджується відповідними актами впровадження [с.416-425].

**1. Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій** є високим. Теоретичні розробки базуються на фундаментальних положеннях механіки деформівного твердого тіла, теорії пружності та пластичності, механіки композиційних матеріалів, теорії коливальних, динаміки роторів, механіки рідини та газу, а також чисельних методах.

Достовірність отриманих результатів забезпечується кількома ключовими факторами, а саме:

- **Коректним застосуванням математичного апарату:** автор коректно формулює математичні моделі, починаючи від класичних рівнянь (Нав'є-

Стокса, Рейнольдса) до складних конститутивних моделей матеріалів (Джонсона-Кука, Хашина) та нелінійних рівнянь динаміки.

- **Верифікацією чисельних моделей:** проводиться ретельна верифікація розрахункових моделей шляхом порівняння з результатами, отриманими за іншими методиками (наприклад, верифікація моделі пружно-гідродинамічного змашування для шарикових підшипників шляхом порівняння з методом скінченних елементів, [с.209-212]; верифікація моделі газових підшипників з рівнянням стану Редліха-Квонга-Анг'є шляхом порівняння з моделлю ідеального газу, [с. 230-232]).
- **Експериментальною перевіркою:** ключові нові конструктивні рішення та складні моделі перевірені експериментально. Зокрема:
  - моделі удару птаха (пр.2.5,3.1) перевірені шляхом якісного порівняння розрахункових деформацій та картин руйнування з фотографіями реально пошкоджених лопаток турбовентиляторного двигуна (рис.2.48,3.7,3.8);
  - розроблена модель статичної міцності нового конічного з'єднання лопатки (пр.3.4) пройшла повну експериментальну перевірку на спеціально створеному стенді, яка підтвердила розрахункове навантаження руйнування та його локалізацію (рис.3.19-3.21);
  - концепція біметалічної лопатки (пр.5.3) також пройшла експериментальну перевірку на розрив, підтвердивши міцність з'єднання алюмінієвого профілю та сталевого остову (рис.5.17,5.21).

Таким чином, поєднання теоретичного аналізу, чисельного моделювання та цілеспрямованого експерименту забезпечує високу достовірність наукових положень і висновків дисертації.

### **3.Наукова новизна отриманих результатів**

Наукова новизна дисертації полягає у розробці та обґрунтуванні нового узагальненого підходу до визначення міцності складних та композиційних елементів

роторів турбомашин, який, на відміну від існуючих, базується на комплексному врахуванні взаємопов'язаності динамічних процесів, що протікають в опорах, валу, вузлах кріплень та аеродинамічних профілях під дією експлуатаційних навантажень.

До найбільш суттєвих наукових результатів, що характеризуються новизною, слід віднести:

- Запропоновано класифікацію та експериментально перевірені методики моделювання повного спектру навантажень на лопатки роторів, що включають не лише інерційні та стаціонарні аеродинамічні, але й нестационарні аеродинамічні (від парціальності потоку та пошкоджень напрямного апарату) та ударні (удар птаха) навантаження у різних постановках (квазістатичній, неявній та явній динамічній) [с.116-156].
- Розроблено та експериментально перевірено високоточну розрахункову модель процесу удару птаха об лопатки вентилятора турбовентиляторного двигуна, що адекватно відтворює процеси пластичного деформування та руйнування [с.163-176].
- Розроблено метод моделювання міцності конічного з'єднання лопатки ротора турбомашини, який враховує нелінійну контактну взаємодію та переднатяг болтових з'єднань [с.190-195].
- Розвинуто теоретичні основи методу накладених сіток шляхом його узагальнення до методу конденсованих сіток, що дозволило теоретично обґрунтувати його застосування для розв'язання нелінійних динамічних задач анізотропної в'язкопружності композитів [с.177-182].
- Створено та застосовано нові підходи до розрахунку динамічних коефіцієнтів підшипникових опор, а саме:
  - аналітична методика визначення жорсткості кулькових підшипників на основі методу пружно-гідродинамічного змашування (EHL) з урахуванням невизначеності положення тіл кочення [с.206-208];

- скінченно-різницева методика визначення коефіцієнтів газових підшипників на основі рівняння Рейнольдса та рівняння стану реального газу Редліха-Квонга-Анг'є [с.213-215];
- аналітична методика визначення частотно-залежних коефіцієнтів активних магнітних підшипників через передатні функції компонентів [с.218-221].
- На основі розроблених моделей опор вирішено актуальні науково-прикладні задачі динаміки роторів: виявлено причину відмови допоміжного вентилятора через недовантаження кулькових підшипників [с.247-251] та запропоновано його модернізацію з активними магнітними підшипниками [с.252-253]; розв'язано нелінійну задачу динаміки ротора в газових підшипниках з обертовими канавками та ідентифіковано поріг стійкості руху, що підтверджено експериментальними даними [с.254-266].
- Розроблено, експериментально та чисельно досліджено нові конструкції складених лопаток ротора: біметалічну (сталь-алюміній) з унікальною формою сталевого остову [с.287-299] та біматеріальну (сталь – метал-матричний композит Al-B<sub>4</sub>C) [с.305-312], а також лопатку з полімерного армованого композиту з ребрами жорсткості [с.304-313].

#### **4. Практичне значення отриманих результатів**

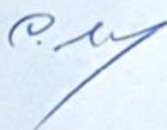
Практична цінність роботи полягає у створенні науково-обґрунтованих методик та інженерних рішень, що безпосередньо впроваджені або готові до впровадження у практику проектування, модернізації та експлуатації турбомашин.

- **У галузі проектування:** розроблений комплексний підхід (п.2.1,5.1) та вдосконалена методика проектування (рис.2.1) дозволяють на ранніх етапах оцінити взаємний вплив конструктивних рішень (матеріали лопаток, тип опор, вузли кріплення) на міцність та динамічну надійність ротора.
- **У галузі експлуатації та ремонту:**

- розроблені нові конструкції лопаток (біметалічна, біматеріальна з ММК) вирішують гостру промислову проблему абразивного зносу лопаток промислових вентиляторів, знижуючи експлуатаційні витрати [с.287-320];
- методика аналізу відмов (на прикладі парової турбіни, п.3.5) дозволяє точно встановлювати першопричини аварій, пов'язаних із втратою матеріалу, враховуючи як експлуатаційні (пошкодження напрямного апарату), так і ремонтні (зношення пазів диска) фактори [с.197-203].
- методика аналізу динаміки ротора в опорах дозволила виявити причину відмови допоміжного вентилятора (недовантаження шарикових підшипників) та запропонувати обґрунтовану модернізацію з активними магнітними підшипниками [с.252-253].
- У галузі чисельного моделювання: розроблені методики моделювання та розрахункові моделі впроваджені у практику провідних інженерних компаній (SoftInWay, Inc., ТОВ «Передові цифрові рішення») та промислових підприємств (ТОВ «ІТЦ «Донвентилятор», SKF Eurotrade AB (Ukraine)), що підтверджено відповідними актами [с.416-419].
- Результати дисертації також впроваджені у науково-дослідні роботи НТУ «ХПІ» за держбюджетними темами МОН України та грантом НФДУ, а також у навчальний процес [с.420-425].

### **5. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях**

Основний зміст дисертаційної роботи повно та всебічно викладено у 61 науковій праці [с. 404–415]. Серед них 21 публікація безпосередньо розкриває основні наукові результати, у тому числі 5 статей у провідних закордонних наукових виданнях, індексованих у базах Web of Science Core Collection та/або Scopus (квартилі Q1–Q3), 15 статей у фахових наукових виданнях України, а також 1 розділ у колективній монографії, проіндексованій у базі Scopus.



Результати досліджень пройшли апробацію на 40 міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях високого рівня, зокрема на провідному світовому форумі в галузі турбобудування — ASME Turbo Expo (2023–2025 рр.), а також на численних конференціях під егідою IEEE, що свідчить про високий рівень визнання отриманих наукових результатів міжнародною науковою спільнотою.

Кількість та якість публікацій у повній мірі відповідають вимогам МОН України до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

### **6. Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота складається з анотацій двома мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (438 найменувань) та додатків. Загальний обсяг роботи – 425 сторінок.

У **Вступі** [с.12-32] автором обгрунтовано актуальність темидисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача у роботи, що виконані у співавторстві, наведено відомості про апробації та впровадження результатів досліджень.

**Перший розділ** [с. 32-69] присвячено аналізу сучасних методів визначення міцності композиційних елементів роторів з урахуванням впливу динамічних чинників, зокрема динамічних навантажень, а також руху роторів у підшипникових опорах різних типів. Проведено огляд застосування композиційних матеріалів у конструкціях роторів турбомашин, зокрема, розглянуто методи їх з'єднання, критерії міцності (пр. 1.1) та теоретичні підходи до моделювання анізотропних, зокрема в'язкопружних, властивостей композитів. Обгрунтовується необхідність розвитку методу конденсованих сіток (пр. 1.2). Значну частину розділу присвячено огляду існуючих підходів до моделювання підшипникових опор (контактних – шарикові

підшипники, та безконтактних – активні магнітні та газові підшипники) та їх інтеграції в моделі динаміки роторів (пр. 1.3).

За результатами аналізу (пр. 1.4) встановлено відсутність єдиного комплексного підходу до спільного моделювання динамічної поведінки та міцності роторів турбомашин з урахуванням взаємопов'язаності процесів у лопатках, роторі та підшипникових опорах, що й зумовило необхідність розробки нового узагальненого підходу, подальша схема реалізації якого наведена наприкінці розділу(рис. 1.5).

**Другий розділ** [с. 70-162] присвячено розробці методик моделювання впливу динамічних чинників на міцність елементів роторів. Розглянуто типовий замкнений цикл проєктування ротора турбомашини з використанням CAD/CFD/CAE-технологій (пр. 2.1), особливості проєктування та екстенсивні шляхи вдосконалення відцентрових (п. 2.2.1) та осьових (п. 2.2.2) машин. Розроблено методики врахування інерційних та теплових навантажень (пр.2.3). Сформульовано удосконалену методику побудови скінченно-об'ємної сітки для визначення стаціонарних аеродинамічних навантажень (пр.2.4.2). Методика поширена на випадок нестационарних навантажень, спричинених дефектами проточної частини (пр.2.4.3). Окремо розглянуто задачу удару птахів об лопатки вентилятора турбовентиляторного двигуна із застосуванням квазістатичного силового методу (п. 2.5.2), динамічного неявного методу (пп. 2.5.2.3) та повноцінної явної динамічної моделі з використанням методу гідродинаміки згладжених часток SPH (п. 2.5.3). Виконано чисельну верифікацію моделей на основі співставлень результатів із результатами квазістатичних та неявних динамічних розрахунків, а також валідацію шляхом порівняння залишкових пластичних деформацій вхідних кромek лопаток із деформуванням реальних лопаток після потрапляння в них птахів. Локалізація деформацій співпала з експериментом, що підтвердило адекватність розробленої математичної моделі.

*Р. С.*

**Третій розділ** [с.163-205] фокусується на моделюванні матеріалів та контактної взаємодії. Детально описано повну модель пластичності та руйнування Джонсона-Кука для титанових сплавів (пр.3.1). Представлено теоретичне обґрунтування методу конденсованих сіток для розв'язання задач анізотропної в'язкопружності (пр.3.2), що є вагомим теоретичним внеском. На прикладі складної інженерної конструкції (п.3.3) розроблено раціональні підходи до поєднання лінійних та нелінійних формулювань контактів для управління обчислювальною складністю. Ці підходи застосовано для створення та експериментальної перевірки моделі нового конічного з'єднання лопатки (пр.3.4). Узагальненням стає застосування розроблених методів моделювання нелінійних контактів (зазори через знос) та нестационарних навантажень (дефекти напрямного апарату) для аналізу реальної промислової аварії – руйнування лопаток парової турбіни (пр.3.5).

**Четвертий розділ** [с.206-268] присвячено розробці адекватних моделей підшипникових опор та їхньому впливу на динаміку ротора. Автор послідовно розробляє та верифікує моделі для:

- Шарикових підшипників (ШП) (п.4.1.1,4.2.1) – на основі методу пружно-гідродинамічного змащування при невизначеності положення тіл кочення.
- Ялинкових рифлених газових підшипників (ЯРГП) (п.4.1.2,4.2.2) – на основі методу скінченних різниць з урахуванням рівняння стану реального газу.
- Активних магнітних підшипників (АМП) (п.4.1.3,4.2.3) – на основі розгляду передатних функцій компонентів у частотній області.

Розроблені моделі застосовано для вирішення двох практичних задач:

1) Виявлення причини відмови допоміжного вентилятора (недовантаження гарикових підшипників) та розробка варіанту модернізації з АМП (п.4.3.2).

2) Аналіз нелінійної динаміки та стійкості ротора мікровентилятора в ЯРГП з обертовими та необертовими канавками, результати якого збігаються з експериментальними даними (п.4.3.3).

П'ятий розділ [с.269-337] є синтезом усіх попередніх напрацювань. Формулюється повна система рівнянь (5.1), що описує взаємопов'язану проблему. На прикладі промислового осьового вентилятора, що зіткнувся з проблемою абразивного зносу лопаток (пр.5.2), розробляються та всебічно аналізуються три інноваційні конструкції лопаток:

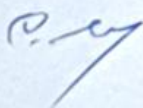
- Біметалічна (сталь-алюміній) зі сталевим остовом (п.5.3), для якої проведено розрахунок та експериментальне дослідження міцності з'єднання.
- Полімерна армована композиційна з ребрами жорсткості (пр.5.4), для якої проведено аналіз міцності за критерієм Хашина, конструкційної стійкості та модальний аналіз.
- Біматеріальна (сталь – метал-матричний композит Al-B<sub>4</sub>C) (п.5.5). Для цього варіанту проведено повний комплексний аналіз міцності та динаміки ротора в контактних роликів опорах (з використанням розробленої ЕНЛ-моделі), що демонструє застосування узагальненого підходу дисертації.

У висновках [с.338-347] коротко представлені основні наукові і практичні результати, отримані автором дисертації. Вони логічно витікають зі змісту розділів, є обгрунтованими та повною мірою відображають вирішення поставлених завдань і досягнення мети дисертації.

### **7. Академічна доброчесність**

Аналіз змісту дисертаційної роботи та наукових публікацій здобувача свідчить про дотримання ним принципів академічної доброчесності. Порушень, пов'язаних із академічним плагіатом, фабрикацією чи фальсифікацією наукових результатів, не виявлено. Усі використані запозичення супроводжуються належними бібліографічними посиланнями.

### **8. Зауваження та дискусійні питання**



Незважаючи на високий науковий рівень дисертаційної роботи, повноту та достовірність результатів, у процесі її аналізу виникли наступні зауваження та дискусійні питання:

1. Визначити об'єкт дослідження, означає дати відповідь на запитання, що розглядається у дослідженні. В усіх науках об'єктами дослідження є або тіла, або процеси, або явища. Тому, формулювання автором об'єкта досліджень, як «статична та динамічна міцність і динамічні процеси...» вважаю не вірним. На мій погляд, об'єктом досліджень цієї дисертаційної роботи є складені та композиційні елементи роторів турбомашин.
2. При моделюванні удару птаха (підрозділ 3.1) використовується повна модель Джонсона-Кука (3.1)-(3.3). Ця модель включає термічне розм'якшення. Важливо було б зазначити, чи враховувалось у моделі адіабатичне нагрівання матеріалу лопатки внаслідок швидкої пластичної деформації при ударі, і якщо так, то наскільки суттєвим був цей ефект.
3. У підрозділі 3.5 представлено оцінку втомної довговічності лопатки в зоні галтельного переходу полиць хвостовика. Слід зазначити, що під дією відцентровихта газових сил ця область зазнає багатоосьового нерегулярного навантаження. Тому, застосована автором методика розрахунку на втому, зокрема формули (3.30) і (3.31), які є справедливими для одноосьового навантаження, виглядає занадто спрощеною. Крім того, оцінка границі витривалості за формулою  $\sigma_{-1} = 0,2 \cdot \sigma_m$  є надто приблизною.
4. У підрозділі 5.5 проводиться комплексний аналіз біматеріальної лопатки (ММК Al-V<sub>4</sub>C). Головною причиною переходу до цього матеріалу була його висока зносостійкість (абразивний знос). Однак, у самому аналізі (таблиця 5.11, рис. 5.37-5.39) досліджуються лише параметри міцності (напруження, деформації) та динаміки (власні частоти). Було б доречним розширити розгляд в роботі на моделювання або хоча б порівняльний аналіз саме абразивного зносу алюмінієвого профілю та профілю з ММК.

5. Запропоновані біметалічні та композитні лопатки вирішують проблему зносу, але їх виготовлення (лиття алюмінію на сталевий остов, робота з метал-матричним або полімерним армованим композитом) є значно складнішим і дорожчим порівняно з алюмінієвою лопаткою. Чи є доцільною за сьогонішнього рівня виробництва заміна дешевих алюмінієвих лопаток на дорогі композитні?
6. Останнє зауваження стосується не тільки автора цієї роботи, воно є притаманним для більшості українських науковців. На жаль, ми мало що знаємо про вклад вітчизняних науковців у світову науку, і часто вслід за іноземними авторами це ігноруємо. Зокрема, це стосується критерію Губера-Мізеса. У 1904 році професор Львівської політехніки Максиміліан Титус Губер сформулював гіпотезу, за якою досягнення граничного стану пов'язується з питомою потенціальною енергією зміни форми, накопиченою zdeформованим тілом. Цей підхід був пізніше розвинений в працях Річарда фон Мізеса (1913).

Зазначені зауваження та дискусійні питання не зменшують високої наукової та практичної цінності дисертаційної роботи, а лише свідчать про багатогранність дослідженої проблеми.

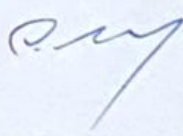
## 9. Висновок

На основі вивчення змісту дисертаційної роботи, автореферату і публікацій вважаю, що дисертаційна робота Мартиненка Володимира Геннадійовича «Міцність складених та композиційних елементів роторів з урахуванням взаємопов'язаності динамічних процесів» відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій містяться нові наукові результати, спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми, яка полягає у розробці узагальненого підходу до визначення міцності елементів роторів турбомашин на основі комплексного моделювання

взаємопов'язаних динамічних процесів в їхніх опорах, кріпленнях та аеродинамічних профілях.

Результати дисертаційної роботи є оригінальними, обґрунтованими і викладені в публікаціях автора як у міжнародних, так і фахових виданнях України. Автореферат у повному обсязі відображає зміст дисертації.

За актуальністю теми, ступенем обґрунтованості, науковою новизною, достовірністю та практичним значенням отриманих результатів, а також повнотою викладення в опублікованих працях, дисертація повністю відповідає вимогам пунктів 7,8,9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197, 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,  
професор кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут ім.І.Сікорського»  Сергій ШУКАЄВ

«27» листопада 2025 р.

Підпис д.т.н., проф. Шукаєва С.М. засвідчую,  
Учений секретар КПІ ім. Ігоря Сікорського

Холявко В.В.

