

ВІДГУК

офіційного опонента Ярошевича Миколи Павловича

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

Сучасна інженерія характеризується переходом до складних мультифізичних задач, де поведінка системи визначається взаємодією процесів різної природи. Роторні машини є яскравим прикладом таких систем. Адекватне прогнозування їх міцності вимагає одночасного розгляду механіки деформівного твердого тіла (включно з нелінійною пластичністю та контактною взаємодією), динаміки рідини та газу (CFD), теплопередачі та теорії автоматичного управління (у випадку активного магнітного підшипника – АМП).

Дисертаційна робота В.Г. Мартиненка є актуальною, оскільки вона спрямована на розробку та інтеграцію обчислювальних методів для вирішення саме таких зв'язаних задач. Особливої гостроти проблема набуває при використанні нових матеріалів (композитів з анізотропними пружними та в'язкопружними властивостями) та опор з яскраво вираженою нелінійною характеристикою (газових підшипників, активних магнітних підшипників), для яких стандартні лінеаризовані підходи є непридатними. Автор фокусується на створенні високоточних обчислювальних моделей, що є пріоритетним напрямком розвитку механіки та інженерії.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість наукових положень дисертації базується на коректному застосуванні сучасного апарату обчислювальної механіки. Автор демонструє вільне володіння різними чисельними методами (метод скінченних елементів – МСЕ; метод

скінченних різниць – МСР; метод скінченних об’ємів – МСО; гідродинаміка згладжених часток – smoothed-particle hydrodynamics, SPH; метод пружно-гідродинамічного змащування – elasto-hydrodynamic lubrication, EHL, тощо) та їх комбінаціями (взаємодія рідини та газу – fluid-structure interaction, FSI).

Ключовим елементом обґрунтованості є багаторівнева верифікація та валідація моделей, а саме:

1. Чисельна верифікація, при якій проводиться контроль збіжності сіток для МСЕ та МСО (див. п. 2.2.1.4, 2.4.2, 3.4). Моделі явної динаміки верифікуються шляхом порівняння з квазістатичними та неявними динамічними розв’язками (див. п. 2.5, 3.1).

2. Перехресна верифікація методів, при якій моделі підшипників верифікуються порівнянням різних підходів (напр., EHL порівнюється з МСЕ-контакт, рис. 4.3; нелінійна динаміка ялинкового рифленого газового підшипника – ЯРГП – порівнюється зі стаціонарним розв’язком, п. 4.2.2).

3. Експериментальна валідація, при якій найскладніші нелінійні моделі – удар птаха (див. п. 3.1, рис. 2.48, 3.8), статичне руйнування конічного з’єднання (див. п. 3.4, рис. 3.20, 3.21) та міцність біметалічного з’єднання (див. п. 5.3, рис. 5.21) – підтвержені прямими експериментальними даними, що свідчить про високу достовірність результатів.

Висновки роботи логічно випливають з отриманих та перевірених чисельних та експериментальних даних.

3. Наукова новизна отриманих результатів

Дисертація містить низку нових наукових результатів у галузі обчислювальної механіки та динаміки машин. До найбільш значущих належать:

1. Вперше розроблено та експериментально валідовано високоточну обчислювальну модель удару птаха об лопатки турбовентиляторного двигуна, що об’єднує: явну динамічну постановку за допомогою МСЕ, гідродинамічну SPH модель

птаха, нелінійну модель матеріалу лопатки (Джонсона-Кука з руйнуванням) та рівняння стану (Мурнагана).

2. Дістав подальшого розвитку метод накладених сіток (МНС), який узагальнено до методу конденсованих сіток (МКС) та вперше надано його теоретичне обґрунтування для розв'язання лінійних та нелінійних динамічних задач анізотропної в'язкопружності, що дозволяє моделювати такі складні матеріали у стандартних МСЕ-пакетах.

3. Вперше запропоновано та реалізовано нові обчислювальні моделі для визначення динамічних коефіцієнтів підшипникових опор:

- a. Модель шарикових підшипників, що поєднує теорію ЕНЛ з урахуванням невизначеності положення тіл кочення (навантаження «на шарик» / «між шариками»).
 - b. Скінченно-різницева модель ЯРГП, що вперше використовує рівняння стану реального газу Редліха-Квонга-Анг'є у зв'язці з рівнянням Рейнольдса.
 - c. Аналітична модель АМП на основі повного набору передатних функцій пропорційно-інтегрально-похідного – PID – контролера та компонентів, що дозволяє розраховувати частотно-залежні матриці жорсткості та демпфування.
4. Вдосконалено розв'язання нелінійної задачі динаміки ротора в ЯРГП з обертовими канавками (для яких не існує стаціонарного стану і лінеаризованих коефіцієнтів) шляхом зв'язаного розв'язку рівнянь динаміки ротора (МСЕ) та рівняння Рейнольдса (МСП) у часовій області, що дозволило ідентифікувати поріг стійкості руху ротора в підшипниках за швидкістю обертання.
5. Вперше розроблено та експериментально валідовано обчислювальні моделі нових конструкцій елементів роторів: конічного з'єднання (див. п. 3.4), біметалічної лопатки (сталь-алюміній, див. п. 5.3) та біматеріальної лопатки (сталь-метал матричний композит – ММК – Al-B₄C, п. 5.5), що враховують

складну контактну взаємодію, переднатяг та пружно-пластичну поведінку матеріалів.

4. Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання

Наукова значимість роботи полягає у створенні нових та вдосконаленні існуючих обчислювальних методів для мультифізичного аналізу роторних систем. Розвиток МКС (див. п. 3.2) робить внесок у механіку композитів. Модель ЯРГП з реальним газом (див. п. 4.1.2) є новим інструментом для аналізу турбомашин, що працюють на не-повітряних середовищах (наприклад, в кріогеніці). Розв'язання нелінійної задачі стійкості ротора в ЯРГП (див. п. 4.3.3) є вагомим внеском у нелінійну динаміку роторів.

Практична значимість полягає у створенні валідованих «віртуальних стендів» для проектування та аналізу відмов. Модель удару птаха (див. п. 3.1) дозволяє сертифікувати двигуни з меншими витратами на натурні випробування. Моделі підшипників (див. п. 4.1) та методика аналізу їх відмов (див. п. 4.3.2) є готовим інструментом для діагностики та модернізації промислового обладнання. Розроблені конструкції лопаток (див. п. 5.3, 5.5) безпосередньо вирішують проблему абразивного зносу на підприємствах гірничої галузі. Впровадження результатів у комерційне програмне забезпечення (SoftInWay, Inc., ТОВ «Передові цифрові рішення») та інжинірингову практику (SKF, ТОВ «ІТЦ «Донвентилятор») підтверджує їх високу практичну цінність.

5. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Результати дисертації представлені у 61 науковій праці, з яких 32 індексуються у базах Scopus та/або Web of Science. 5 статей опубліковано у провідних міжнародних журналах з квантилями Q1-Q3 (Advances in Engineering Software, Defence Technology, Journal of the Institution of Engineers (India), Polymers and Polymer Composites, Journal

of Engineering for Gas Turbines and Power). Апробація на конференціях найвищого рівня (зокрема, ASME Turbo Expo) свідчить про міжнародне визнання отриманих результатів.

Таким чином вимоги МОН України щодо кількості та якості публікаційної діяльності для висвітлення результатів та апробації дисертації на здобуття наукового ступеня доктора наук виконано.

6. Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертація логічно побудована та демонструє глибоке розуміння автором проблематики розглянутого напрямку:

Розділ 1 проводить компетентний огляд складних питань механіки композитів (включно з анізотропною в'язкопружністю, див. п. 1.2) та динаміки роторів в опорах, коректно ідентифікуючи розрив між ізольованими моделями та необхідністю комплексного підходу.

Розділ 2 присвячений методам моделювання навантажень. Особливу цінність має розробка методики на основі МСО (див. п. 2.4.2) для точного захоплення пристінкового шару та пульсацій тиску. Методологічно важливим є порівняння трьох підходів до моделювання удару (див. п. 2.5): квазістатичного, неявного динамічного та явного динамічного SPH.

Розділ 3 є центральним з точки зору обчислювальної механіки матеріалів та контакту. Теоретичне обґрунтування МКС (див. п. 3.2), що доводить еквівалентність суми функціоналів, є важливим доповненням для теорії МСЕ. Практичне застосування нелінійного контактного аналізу (див. п. 3.3, 3.4) з верифікацією на експерименті демонструє високий рівень володіння нелінійним МСЕ.

Розділ 4 демонструє сильні компетенції автора в моделюванні підшипників. Розробка моделі шарикових підшипників на основі EHL (див. п. 4.1.1) є нетривіальною. Введення рівняння стану реального газу Редліха-Квонга-Анг'є у рівняння Рейнольдса (див. п. 4.1.2) є новим підходом. Найбільш вражаючим є

розв'язання зв'язаної нелінійної задачі динаміки ротора в ЯРГП у часовій області (див. п. 4.3.3), що дозволило валідувати модель за експериментальними даними.

Розділ 5 успішно інтегрує напрацювання попередніх розділів для вирішення складної інженерної проблеми. Аналіз біметалічної (див. п. 5.3) та біматеріальної (див. п. 5.5) лопаток є гарним прикладом комплексного аналізу, що включає нелінійний контакт, пластичність та переднапружений модальний аналіз (див. п. 5.5). Фінальний аналіз коректно враховує жорсткості опор, розраховані за розробленою в розділі 4 методикою ЕНЛ, в тривимірній скінченно-елементній моделі ротора, що демонструє взаємопов'язаність змодельованих процесів.

7. Академічна доброчесність

Дисертація та публікації здобувача відповідають принципам академічної доброчесності. Текст роботи є оригінальним, посилання оформлені коректно.

8. Зауваження та дискусійні питання

Незважаючи на високу якість роботи, є декілька питань, що потребують уточнення або є дискусійними:

1. Про модель ЯРГП (п. 4.1.2):

Для розв'язання рівняння Рейнольдса (4.13) був обраний МСР. Водночас, для розв'язання рівняння Рейнольдса (4.9) в літературі часто застосовують МСЕ, який дозволяє легше працювати зі складною геометрією канавок. Чому автор обрав саме МСР, і які переваги чи недоліки цього вибору порівняно з МСЕ для даної задачі?

2. Про зв'язування МСР та МСЕ (п. 4.3.3):

При розв'язанні нелінійної задачі динаміки ротора в ЯРГП (система 4.22) відбувається зв'язування МСЕ-моделі ротора та МСР-моделі плівки газу. Як технічно реалізовано передачу сил та перемішень між вузлами сітки МСЕ та вузлами сітки МСР, які, ймовірно, не збігаються?

3. Про модель АМП (п. 4.1.3):

Розрахунок коефіцієнтів АМП (4.41) базується на припущенні $s = i\Omega$, тобто на аналізі синхронного відгуку. Однак АМП також використовуються для гасіння субсинхронних коливань (наприклад, при проходженні критичних швидкостей). Чи коректно використовувати ці синхронні коефіцієнти для аналізу стійкості руху, яка зазвичай пов'язана з субсинхронною прецесією?

4. Про EHL модель шарикових підшипників (п. 4.1.1):

Модель EHL (4.7) враховує швидкість обертання. На графіках (рис. 4.5, 4.6) видно, що зі збільшенням швидкості обертання жорсткість зростає. Було би цікаво побачити обговорення, чим пояснюється таке зростання жорсткості зі швидкістю.

5. Про повноту зв'язаності:

Дисертація проголошує врахування взаємопов'язаності. Однак, у більшості випадків (наприклад, п. 5.5) використовується послідовний або слабкий зв'язок (односпрямований FSI): CFD \rightarrow Навантаження \rightarrow МКЕ. Чи не призводить це до втрати точності у випадках, коли деформація лопатки є значною і може, у свою чергу, змінити поле потоку, що зазвичай моделюється за допомогою двоспрямованого FSI)?

Ці зауваження мають на меті поглиблення наукової дискусії та не впливають на високу загальну оцінку дисертаційної роботи.

9. Висновок

Дисертаційна робота Мартиненка Володимира Геннадійовича «Міцність складених та композиційних елементів роторів з урахуванням взаємопов'язаності динамічних процесів» є завершеною науковою працею, що представляє собою вирішення важливої науково-прикладної проблеми розробки комплексного обчислювального підходу до аналізу міцності та динаміки роторних машин. У роботі розроблено низку нових, експериментально валідованих обчислювальних моделей для опису нелінійних матеріалів, складних контактних взаємодій та сучасних підшипникових опор.

Дисертація «Міцність складених та композиційних елементів роторів з урахуванням взаємопов'язаності динамічних процесів» відповідає всім вимогам пунктів 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №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,
 професор кафедри галузевого машинобудування
 Луцького національного технічного університету

Микола ЯРОШЕВИЧ



ВІРНО:
 Начальник відділу кадрів
 "19" листопада 2021 р.



Провідний фахівець ВК
 О. Манзук