

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Морозова Андрія Володимировича
на тему «Метод визначення характеристик динаміки та міцності елементів
конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів з композиційних матеріалів»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 14 Електрична інженерія
за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Актуальність теми дисертації.

У сучасному авіадвигунобудуванні спостерігається стійка тенденція до широкого впровадження композиційних матеріалів (КМ) у конструкції газотурбінних двигунів з метою зниження маси, підвищення експлуатаційної надійності та паливної ефективності. Особливий інтерес викликають тривимірно армовані композити, що демонструють кращу стійкість до міжшарових руйнувань і мають значний потенціал для використання в елементах, які зазнають складних навантажень.

Водночас, структурна складність таких матеріалів, їх анізотропність та нелінійні властивості потребують принципово нових підходів до розрахунку динаміки та міцності елементів конструкцій. Існуючі методи, здебільшого розроблені для ізотропних або ортотропних композитів простої будови, не забезпечують необхідної точності для відповідальних авіаційних деталей, таких як лопатки вентилятора чи елементи повітряного гвинта.

Представлена дисертаційна робота є вкрай актуальною. Запропонований метод чисельного визначення ефективних характеристик пружності та міцності тривимірно армованих КМ дозволяє забезпечити надійне моделювання поведінки матеріалів у складних умовах навантаження; зменшити обсяг експериментальних випробувань, що має суттєве значення в умовах обмежених ресурсів; оптимізувати конструкції на ранніх етапах проєктування, підвищуючи ефективність розробки авіаційної техніки. Крім того, отримані результати можуть бути використані не лише в авіаційній, а й в інших галузях промисловості.

Таким чином, тематика дослідження повністю відповідає актуальним потребам науки та техніки, а запропоновані підходи мають значний потенціал для подальшого розвитку в галузі енергетичного машинобудування.

Обґрунтованість наукових результатів дисертації, їх достовірність та новизна.

В дисертаційній роботі Морозова Андрія Володимировича вирішене науково-практичне завдання з розроблення методу визначення характеристик

динаміки та міцності роторних деталей авіаційних газотурбінних двигунів з композиційних матеріалів за відомими властивостям структурних компонентів (волокон і матриці). Застосування цього методу дозволяє вирішити проблему впровадження роторних деталей з таких матеріалів в конструкцію авіаційних газотурбінних двигунів на підприємстві АТ «Івченко-Прогрес». У дисертаційній роботі проведено аналіз літературних джерел з описом теоретичних і емпіричних методів визначення ефективних пружних сталей композиційних матеріалів. Розглянуто найбільш поширені в інженерній практиці критерії міцності композиційних матеріалів для тривісного напруженого стану. Обґрунтовано використання квадратичного критерію міцності другого порядку, що враховує різницю в границях міцності при розтягу та стиску й не містить надлишкових параметрів. Сформульовано повну систему рівнянь, що описує механічний стан тіла в межах підходу механіки суцільних середовищ за допомогою напружень, деформацій і переміщень точок тіла.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів полягає у такому:

1. Розроблено новий метод визначення ефективних пружних характеристик композиційних матеріалів за відомими пружними властивостями структурних компонентів, який базується на математичному моделюванні представницьких елементів об'ємів для композиційних матеріалів різних структур армування. Визначено ефективні пружні сталі тривимірно армованого композиційного матеріалу.

2. Створено новий метод визначення параметрів критерію міцності композиційних матеріалів, який враховує різницю меж міцності на розтяг та стиск і базується на чисельно-аналітичному аналізі локальних напружень окремо для волокон і матриці. Визначено розрахункові границі міцності та коефіцієнти критерію міцності тривимірно армованого композиційного матеріалу.

3. Набув подальшого розвитку метод аналізу характеристик динаміки та міцності роторних деталей авіаційних газотурбінних двигунів виготовлених із композиційних матеріалів. Особливістю методу є те, що ефективні пружні характеристики композиційних матеріалів визначаються чисельним методом та використовуються для роторних деталей в якості розрахункових характеристик еквівалентного гомогенного ортотропного матеріалу, властивості якого задаються в локальних системах координат скінчених елементів в напрямку просторової геометрії конструкції.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Напрямок досліджень у дисертаційній роботі Морозова Андрія Володимировича відповідає стандарту вищої освіти за спеціальністю

142 Енергетичне машинобудування. Дисертація є самостійним завершеним дослідженням, результати якого мають наукову новизну і практичну цінність.

У роботі чітко простежується логічна послідовна структура викладення матеріалу, обґрунтованість постановок задач, вибір методів і аналіз отриманих результатів. Дисертація відповідає принципам академічної доброчесності: відсутні ознаки плагіату, компіляції, фальсифікації чи фабрикації результатів. Усі залучені джерела коректно процитовано, використані матеріали інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота Морозова А. В написана українською мовою, що відповідає загальному стилю наукових досліджень із використанням термінології, що є стандартною для даної області. Дисертаційна робота розкриває головні ідеї та здобутки автора. Структура роботи є логічною та типовою для дисертацій з технічних дисциплін – дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, списків використаних джерел до кожного розділу, загальних висновків, додатку. Вимоги до об'єму дисертації автором витримані.

У *вступі* обґрунтовано вибір теми дослідження, наведені мета і задачі дослідження, методи дослідження, наукова новизна отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація матеріалів дисертації, структура та обсяг дисертації, практичне значення отриманих результатів.

У *першому розділі* виконано аналіз проблеми впровадження деталей із композиційних матеріалів в конструкцію авіаційних двигунів на прикладі широкохордної лопатки вентилятора та лопаті повітряного гвинта (ПГ). Маючи низку переваг, у порівнянні з традиційними металевими конструкційними матеріалами, композити мають анізотропні властивості, що призводить до значного збільшення обсягу кваліфікаційних досліджень матеріалу. Визначення характеристик матеріалу, які використовуються в розрахунках на міцність конструкцій від дії статичних та динамічних навантажень реалізується за двома підходами – феноменологічним та теоретичним. Проведено обґрунтування використання теоретичних методів визначення характеристик пружності та міцності в композитах складної структури армування. Теоретичні методи дозволяють, крім визначення з високою точністю макроскопічних характеристик композиту прогнозувати динамічні характеристики та характеристики міцності конструкції за різних умов експлуатації, а також, оптимізувати просторову структуру композиту для розрахункових випадків навантаження.

У *другому розділі* розроблено чисельний метод визначення ефективних пружних характеристик тривимірно армованих композиційних матеріалів за

відомими властивостям структурних компонентів. Процедура гомогенізації базується на математичному 3 моделюванні представницького елемента об'єму, для якого визначено граничні умови. За допомогою проведення серії чисельних експериментів знайдено ефективні пружні характеристики гомогенного ортотропного матеріалу, еквівалентного тривимірно армованому КМ.

У *третьому розділі* створено аналітично-чисельний метод визначення параметрів квадратичного критерію міцності ортотропного тіла, який ураховує різницю меж міцності при розтягу та стиску. Розроблена процедура базується на математичному моделюванні представницького елемента об'єму тривимірно армованого КМ. Дев'ять з дванадцяти констант критерію однозначно визначаються по результатам одновісних експериментів на розтяг (стиск) та чистий зсув. Останні три константи розраховуються такими, щоб автоматично виконувалася умова існування поверхні міцності еліпсоїдного типу. За допомогою проведення серії чисельних експериментів визначено всі границі міцності та коефіцієнти критерію міцності гомогенного ортотропного матеріалу, еквівалентного тривимірно армованому КМ.

У *четвертому розділі* описано загальну математичну постановку задачі теорії пружності для аналізу динамічних характеристик конструкцій. Проведено геометричне моделювання лопатки вентилятора та лопаті ПГ. Сформульовано повну систему рівнянь, що описує механічний стан тіла в межах підходу механіки суцільних середовищ. Методом скінчених елементів визначено напружено-деформований стан моделей лопатки й лопаті. Пружні характеристики матеріалу для моделей визначено чисельним методом по відомим властивостям компонентів композиту.

У *п'ятому розділі* виконано верифікацію моделі представницького елемента об'єму тривимірно армованого КМ шляхом проведення випробувань натурних зразків на розтяг і чистий зсув. Більша різниця у верифікації чисельного та експериментального дослідження становить – для модулів пружності 7,57 % (E_x), для границь міцності 6,13 % (σ_y^*). Здійснено верифікацію моделі лопаті ПГ за допомогою експериментального дослідження перших п'яти власних форм і частот коливань натурної лопаті ПГ. Більша різниця у верифікації чисельного й експериментального дослідження становить 4,11 % для частоти четвертої форми коливань.

Висновки відповідають сформульованим завданням дослідження та є стислим висвітленням одержаних здобувачем результатів.

Дисертаційна робота оформлена у повній відповідності до вимог, зазначених у наказі МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

За результатами досліджень опубліковано п'ять наукових праць, у тому числі чотири статті у журналах, включені до переліку наукових фахових видань України, один з яких реферується в наукометричній базі даних Scopus. З них три публікації – одноосібні. Одна стаття в неперіодичному науковому виданні, проіндексованому в базі даних Scopus. У статтях написаних у співавторстві, проведення чисельних досліджень і аналіз результатів здійснені автором особисто; формулювання задач досліджень та висновків виконано з науковим керівником і частково за участю співавторів. Усі ці публікації безпосередньо пов'язані із дисертацією, в них не виявлено порушень принципів академічної доброчесності та плагіату. Тож результати, що наведені в дисертації, належним чином висвітлені у публікаціях здобувача та апробовані.

Недоліки та зауваження щодо дисертаційної роботи.

1) У роботі відсутня інформація про визначення ефективних пружних властивостей шаруватих композиційних матеріалів, які використовуються в компонентах лопаті повітряного гвинта (обшивка, лонжерон), хоча запропонованим методом їх визначення за пунктом 2.2.2 знаходяться властивості лише одного шару композита.

2) У роботі відсутня інформація щодо характеристик матеріалу (в'язучого) тривимірно армованого композиційного матеріалу на с. 87 і с. 88.

3) У пункті 4.2 вказано кількість елементів та вузлів для моделей лопатки вентилятора (62828 елементів, 302844 вузлів) та лопаті ПГ (529301 елемент, 959365 вузлів). Однак, не надано обґрунтування, чому саме така щільність сітки є оптимальною. Для модального аналізу, особливо для вищих форм коливань, які мають складніші вузлові лінії та коротші довжини хвиль, недостатня щільність сітки може призвести до значних похибок у визначенні власних частот та форм. Доцільно було б включити короткий аналіз збіжності сітки.

3) У п'ятому розділі наведено кількісні розбіжності між чисельними та експериментальними результатами (наприклад, 7,57 % для модуля пружності E_x , 6,13% для границі міцності σ_y^* , 4.11% для четвертої частоти коливань). Хоча ці розбіжності є прийнятними для розрахунків, проте відсутній аналіз можливих причин цих розбіжностей.

Втім, вказані недоліки та наведені зауваження не зменшують загалом позитивну оцінку дисертації, не ставлять під сумнів її наукову новизну та практичну цінність.

Загальний висновок.

На мій погляд, дисертаційна робота Морозова Андрія Володимировича на тему «Метод визначення характеристик динаміки та міцності елементів конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів з композиційних матеріалів» є завершеним дослідженням, яке виконане на високому науковому рівні, що не порушує принципів академічної доброчесності. Дисертація містить нові теоретичні та практичні результати, що відносяться до галузі знань 14 Електрична інженерія. Дисертація присвячена розв'язанню актуальної задачі та відповідає вимогам, що зазначені в п. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Тож вважаю, що здобувач Морозов Андрій Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології виробництва
авіаційних двигунів Національного
аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

Олександр ШОПІНОВ