

ВІДГУК

офіційного опонента, д.т.н., професора Долгова Миколи Анатолійовича
на дисертаційну роботу Морозова Андрія Володимировича
«Метод визначення характеристик динаміки та міцності елементів конструкцій
авіаційних газотурбінних двигунів з композиційних матеріалів»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування

Актуальність теми дослідження.

Дисертаційна робота присвячена актуальній задачі розробки методу визначення характеристик динаміки та міцності авіаційних конструкцій, виготовлених з полімерних композиційних матеріалів тривимірно армованої структури армування. Оцінювання міцності елементів конструкцій з композиційного матеріалу, що експлуатуються в умовах тривісного напруженого стану, зазвичай здійснюється за феноменологічними критеріями, що включають компоненти тензорів напружень та константи матеріалів, які визначаються після проведення потрібних експериментів. Наразі існують добре розроблені методики визначення характеристик міцності та пружності односпрямованих композиційних матеріалів, але для композитів з ортотропними властивостями вони мало розроблені, оскільки потребують складних експериментальних випробувань та пов'язаних із цим суттєвих витрат ресурсів.

Тому альтернативним підходом є скінченне-елементне моделювання композиційних матеріалів з певними граничними умовами на базі відомих механічних властивостей волокон і матриці.

У зв'язку з цим дисертаційна робота Морозова Андрія Володимировича, яка створює єдиний підхід для оцінки динамічних та міцнісних властивостей роторних деталей авіаційних газотурбінних двигунів на базі характеристик волокон і матриці є актуальною.

Достовірність результатів досліджень та ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Достовірність отриманих результатів дисертаційної роботи зумовлено використанням фундаментальних теоретичних засад механіки суцільних середовищ. Характеристики динаміки та міцності лопаток вентилятора та лопатей повітряних гвинтів, виготовлених з композиційних матеріалів тривимірної структури армування, розглянуто комплексно з використанням певних методів дослідження. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій базується на застосуванні методів скінченних елементів та методу вільних коливань. Розрахункові значення характеристик верифіковано шляхом їх порівняння з результатами експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів.

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 константи для тривимірно армованого композиційного матеріалу.

2. Створено новий метод визначення параметрів критерію міцності композиційних матеріалів, який враховує різницю границь 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 для 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 як розрахункові характеристики еквівалентного гомогенного ортотропного матеріалу, властивості якого

задаються в локальних системах координат скінчених елементів в напрямку просторової геометрії конструкції.

Практичне значення отриманих результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання.

Практичне значення отриманих результатів підтверджено Актом про впровадження результатів дисертаційного дослідження. Результати досліджень використовуються на підприємстві АТ «Івченко-Прогрес» для дослідження характеристик динаміки та міцності лопаток вентилятора й лопатей повітряних гвинтів, виготовлених з композиційних матеріалів.

Отримані результати дисертаційного дослідження можуть бути використані в організаціях, котрі спеціалізуються на вивченні статичної та динамічної міцності конструкцій із композиційних матеріалів.

Повнота викладення наукових положень та результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні ідеї автора та результати досліджень опубліковані у 5 наукових працях, серед яких: 4 статті у наукових фахових виданнях України, одне з яких реферується в наукометричній базі даних Scopus, одній публікації в неперіодичному виданні, яке реферується в наукометричній базі даних Scopus. Також автор брав участь у міжнародних конференціях, на яких основні результати дисертаційної роботи були апробовані та отримали позитивну оцінку.

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.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

У дисертаційній роботі Морозова Андрія Володимировича проведено аналіз літературних джерел з описом теоретичних і емпіричних методів

визначення ефективних пружних характеристик та критеріїв міцності 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 та не містить надлишкових параметрів.

В межах підходу теорії пружності розв'язано наступні типові задачі:

- проведено геометричне моделювання представницьких елементів об'єму композиційних матеріалів різної структури, лопатки вентилятора та лопаті повітряного гвинта;
- запропоновано процедуру формування граничних умов для виконання мікромеханічного аналізу скінченно-елементних моделей;
- сформульовано повну систему рівнянь, що описує механічний стан тіла.

За результатами моделювання створено метод розв'язання задач чисельної гомогенізації композиційних матеріалів різної структури армування та чисельно-аналітичний метод знаходження параметрів квадратичного критерію міцності ортотропного тіла, який враховує різницю границь міцності при розтягу та стиску.

Проведено аналіз напружено-деформованого стану моделей лопатки та лопаті при визначенні власних частот і форм коливань з особливостями, які потрібно враховувати під час чисельного моделювання конструкцій із композиційних матеріалів. Досліджено залежність значень власних частот коливань лопатки від частот обертання вентилятора для перших п'яти форм та визначено зміну значень власних частот коливань лопатки вентилятора зі зміною осей симетрії еквівалентного гомогенного ортотропного матеріалу.

Виконано верифікацію моделі представницького елемента об'єму тривимірно армованого композиційного матеріалу за допомогою експериментального дослідження натурних зразків під час випробувань на розтяг і чистий зсув. Здійснено верифікацію моделі лопаті за допомогою експериментального дослідження перших п'яти форм та частот власних коливань натурної лопаті.

У дисертаційній роботі обґрунтовано актуальність теми, показана її наукова та практична цінність. Основний зміст роботи викладено структуровано та послідовно. Висновки до розділів за результатами дисертаційного дослідження представлено точно та узгоджено зі змістом дисертації.

Дотримання вимог академічної доброчесності.

Дисертація виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності.

Всі результати, подані автором на захист, отримані ним самостійно та оприлюднені в опублікованих працях. У роботах, створених у співавторстві, використані лише ті положення та ідеї, які є результатом власних наукових досліджень автора.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Для визначення міцності волокна та матриці в межах представницького елемента об'єму використовується критерій еквівалентних напружень за Мізесом. Цей підхід є виправданим для металів, але його застосування до полімерної матриці та волокна є суттєвим спрощенням. У полімерної матриці міцність в умовах стиску значно вища, ніж під час розтягу. Така поведінка краще описується критеріями міцності Мора-Кулона та Друкера-Прагера. Механізми руйнування волокна залежать від напрямку прикладання навантаження до композиційного матеріалу, що не враховується значенням напружень за Мізесом S_{eqv} . Пояснити яким чином було вибрано цей критерій міцності.

2. У моделі прийнято умову ідеального контакту між волокном та матрицею. Однак, одним з основних механізмів руйнування композитів є відшарування волокна від полімерної матриці. Цей механізм не враховується під час аналізу локальних напружень. Це може призвести до неправильної інтерпретації початкового механізму руйнування композиційного матеріалу: модель може показувати руйнування полімерної матриці, тоді як виникає відшарування волокна в умовах значно менших навантажень.

3. У другій серії розрахунків лопатки вентилятора було досліджено вплив зміни осей симетрії матеріалу (заміна пружних властивостей по осях X та Y). Це дає змогу позбутися резонансу. Однак, наскільки таке змінювання є технологічно можливим для тривимірно армованого композиційного матеріалу? Це означає повну переорієнтацію тканини на 90° . та може призвести до появи технологічних проблем під час виготовлення армованого композиційного матеріалу.

4. Верифікація розроблених методів для таких властивостей тривимірно армованого композиційного матеріалу як E_x , E_y та G_{xy} проводилася шляхом порівняння з результатами випробувань на розтяг та зсув у площині. Однак, для тривимірно армованого матеріалу критично важливими є також такі властивості як E_z , G_{xz} , G_{yz} , які визначають стійкість до розшарування та ударних навантажень. Ці властивості були визначені чисельно, але не були підтверджені експериментально. Таким чином, верифікацію проведено частково.

5. У роботі наводиться розбіжність між розрахунком та експериментом для модуля E_x . Але цей розрахунок не враховує похибки вимірювальних приладів (наприклад, інструментальної похибки). Крім того, не оцінено вплив густини сітки кінцевих елементів на точність визначення розрахункових характеристик. Тому неможливо зробити висновок, чи є розбіжність у 7,57% статистично значущою, чи вона лежить в межах похибки експерименту.

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

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Морозова Андрія Володимировича «Метод визначення характеристик динаміки та міцності елементів конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів з композиційних матеріалів» є завершеною науково-дослідною роботою, має наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів. Тема дослідження відповідає галузі знань 14 – «Електрична інженерія» та спеціальності 142 – «Енергетичне

машинобудування».

Представлена дисертаційна робота Морозова А.В. «Метод визначення характеристик динаміки та міцності елементів конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів з композиційних матеріалів» відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 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 12.01.2022 р. №44, а її автор Морозов Андрій Володимирович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – «Енергетичне машинобудування».

Офіційний опонент:

Доктор технічних наук, професор,
провідний науковий співробітник
відділу механіки конструкційних
матеріалів Інституту проблем міцності
ім. Г. С. Писаренка НАН України



Микола ДОЛГОВ

10.06.2025

