

ВІДГУК

офіційного опонента Деркача О.Л. на дисертаційну роботу
Неманежина Євгена Олександровича
на тему "**Розробка методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток
газових турбін при статичних та динамічних навантаженнях**",
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі знань 11 Математика та статистика
за спеціальністю 113 Прикладна математика

Актуальність теми дисертації.

Виробництво турбомашин різного призначення, передусім авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД), – одна з найбільш високотехнологічних та енергоємних галузей сучасного машинобудування. Необхідність зниження матеріаломісткості та поліпшення їх техніко-економічних показників висуває дедалі жорсткіші вимоги до таких високонавантажених конструктивних елементів двигунів, якими є робочі лопатки, як на етапі проєктування, так і в процесі довготривалої експлуатації. Якщо у першому випадку це пов'язано з підвищенням ресурсу двигуна, то в другому – із забезпеченням його функціональної роботоздатності в широкому діапазоні зміни режимів експлуатації, які, здебільшого супроводжуються появою різних типів пошкоджень. На їх запобігання спрямовується до 40% усіх витрат під час розроблення турбомашини. При цьому більшість дефектів, які виявляються в процесі роботи таких об'єктів техніки, мають вібраційне походження, а значна їх частина належить лопатковим вінцям робочих коліс. Тому істотне місце при проєктуванні робочих лопаток займає забезпечення їх високотемпературної міцності та вібраційної надійності.

Робочі лопатки газових турбін працюють в екстремальних умовах термосилового навантаження. На сьогодні для виготовлення лопаток турбін ГТД застосовуються монокристалічні жароміцні сплави на нікелевій основі, які характеризуються анізотропією механічних властивостей. Експериментальне дослідження механічних властивостей таких матеріалів за умов комплексного навантаження та характерному йому складного напруженого та термонапруженого стану вкрай ускладнено, що потребує розвитку розрахунково-експериментальних методів дослідження високонавантажених елементів турбомашин за умов, що максимально наближених до експлуатаційних.

Таким чином, актуальною і важливою науково-технічною задачею є розробка теоретичних та експериментальних підходів до визначення характеристик високотемпературної міцності лопаток турбін в умовах статичного та динамічного навантаження. Ця задача вимагає врахування особливості складного напруженого стану лопаток, навантаження у місцях концентрації напружень та анізотропію пружних та інших механічних властивостей нікелевих жароміцних сплавів.

Отже, задача дисертаційної роботи Неманежина Євгена Олександровича є актуальною, в ній вирішується важливе для практики науково-практичне завдання розробки розрахунково-експериментальних методів дослідження високо-температурної міцності монокристалічних робочих лопаток газових турбін за умов статичних та вібраційних навантажень.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає у розробленні математичних моделей монокристалічних турбінних охолоджувальних лопаток з урахуванням орієнтації кристалографічних напрямків та динамічної анізотропної повзучості монокристалічного сплаву з кубічною симетрією.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці на основі запропонованої математичної моделі комплексу розрахунково-експериментальних методик прогнозування міцності турбінних лопаток за умов термосилового навантаження та забезпечення вібраційної надійності, що включає:

- метод відстроювання від небезпечних резонансних режимів, який базується на математичному моделюванні ефективних пружних властивостей монокристалічного матеріалу турбінної лопатки, що дозволяє на етапі проектування кількісно та якісно оцінити вплив повороту обраної кристалографічної системи напрямків на модальні характеристики лопатки;

- метод розрахунку довготривалої міцності лопаток турбін, виготовлених із монокристалічних нікелевих сплавів з різними кристалографічними орієнтаціями;

- розрахунково-експериментального методу оцінки характеристик багатоциклової втомної міцності охолоджуваних лопаток турбін в умовах термосилового навантаження.

Наукові дослідження проведено на кафедрі математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», а також на ДП «Івченко-Прогрес» – провідній профільній організації з проектування, виробництва, сертифікації, ремонту, випробувань, доведення й становлення серійного виробництва ГТД авіаційного й промислового застосування.

Отже, поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання з розроблення моделей та методів чисельного аналізу термо- та вібронапруженого стану охолоджуваних робочих лопаток газових турбін за умови експлуатації виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Є.О. Неманежина повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 113 Прикладна математика та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми "Прикладна математика".

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача.

Звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння свідчить, що дисертаційна робота Неманежина Євгена Олександровича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Всі результати досліджень викладені у логічній послідовності, форма викладення доступна для фахівців.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку літератури та двох додатків. Загальний обсяг дисертації 186 сторінок, у тому числі список літератури із 191 найменувань на 23 сторінках, 54 рисунків та 20 таблиць.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, його предмет та об'єкт; зазначено наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення; наведено інформацію щодо апробації результатів дисертаційної роботи та відмічено особистий внесок здобувача.

У *першому* розділі виконано огляд досліджень, що стосуються сучасних підходів до оцінки високотемпературної міцності лопаток турбін. Приведено порівняльний аналіз різних методів виготовлення лопаток турбін ГТД. Висвітлено сучасний стан фундаментальних досліджень повзучості, довготривалої та втомної міцності монокристалічних жароміцних сплавів на нікелевій основі. За результатом проведеного огляду літератури, зокрема спрощених моделей оболонок для аналізу їх коливань, сформульовано задачі досліджень.

В *другому* розділі описано розроблений метод визначення пружних характеристик жароміцних монокристалічних сплавів для різних температур на основі експериментальних даних. Представлено результати дослідження впливу анізотропії пружних властивостей монокристалів на модальні характеристики ізольованої робочої охолоджувальної лопатки турбіни високого тиску авіаційного ГТД. Для зазначеної лопатки побудовано діаграму Кемпбелла, за результатом аналізу якої визначено небезпечні гармоніки навантаження та наведено приклад відстроювання від небезпечних резонансних коливань лопатки шляхом зміни її кристалографічної орієнтації.

У *третьому* розділі представлено модель стаціонарної повзучості лопаток турбіни ГТД. Розроблено математична модель повзучості монокристалічного сплаву, а також метод розрахунку сталих матеріалу на стаціонарній стадії шляхом апроксимації експериментальних даних повзучості монокристалічного нікелевого жароміцного сплаву. На прикладі розрахункової моделі лопатки турбіни проведено скінченноелементне моделювання її деформованого стану під час повзучості для декількох часових проміжків.

У *четвертому* розділі описано метод оцінки впливу анізотропних властивостей монокристалічних жароміцних сплавів на довговічність лопаток турбіни ГТД. За допомогою розробленого методу проведено чисельний експеримент з визначення часу до руйнування лопатки турбіни для різних кристалографічних орієнтацій монокристалу та для декількох температурних режимів.

П'ятий розділ присвячено експериментальному дослідженню високотемпературної багатоциклової втомної міцності монокристалічних лопаток турбіни в умовах комбінованого температурного та вібраційного навантаження. Подано результати втомних випробувань з визначення межі витривалості лопаток за умови високої температури та результати скінченно-елементного моделювання.

У загальних *висновках* наведені головні наукові результати, отримані у дисертаційній роботі.

Анотація відображає основний зміст дисертації та достатньо повно розкриває наукові результати та практичну цінність роботи.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Результати досліджень опубліковані у 19 наукових працях здобувача, серед яких: 7 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України, зокрема 2 одноосібні статті; 3 публікації у наукових періодичних виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus. Результати дисертації апробовані на 9 міжнародних наукових конференціях.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена у дисертаційній роботі. У списку опублікованих праць за темою дисертації є посилання на всі зазначені вище публікації здобувача. У тексті дисертації зроблено відповідні посилання, представлені у ній наукові результати висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. Граничні умови для лопаток слід сформулювати більш детально. Зокрема, з тексту дисертації не зрозуміло, чи врахована пружна взаємодія лопаток за трактоутворюючими полицями.

2. У роботі не враховано контактну взаємодію хвостовика лопатки з диском. За умов дії термосилового навантаження перерозподіл деформацій у замковому з'єднанні лопатки з диском становить практичний інтерес, тому доцільність проведення розрахункових досліджень ізольованої охолоджувальної лопатки потребує додаткового обґрунтування.

3. У тексті дисертації не описано процедуру визначення термонапруженого стану охолоджувальної робочої лопатки турбіни високого тиску, а також не зазначено, чи застосовувалися для цього методи газової динаміки.

4. Для узагальнення отриманих результатів чисельних досліджень доцільно представити залежності максимальних деформацій та зміни спектра власних частот коливань лопатки від азимутальної кристалографічної орієнтації.

5. На жаль, у тексті роботи не вдалося уникнути стилістичних недоліків. Зокрема, некоректним, вочевидь, є терміни "питома міцність розсіювання енергії при повзучості" (с.86). Також некоректним, згідно з сучасною стандартизованою термінологією теорії механічних коливань, є терміни "резонансна частота і форма коливань", "збуджуючі коливання" та "власні коливання".

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальної наукової новизни та практичної значущості отриманих результатів, а також не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу.

Дисертаційна робота здобувача наукового ступеня доктора філософії Неманежина Євгена Олександровича на тему "Розробка методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток газових турбін при статичних та динамічних навантаженнях" виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує важливе наукове завдання, що має істотне значення та за своїм змістом відповідає спеціальності 113 Прикладна математика.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.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.

Здобувач Неманежин Євген Олександрович заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 11 Математика та статистика за спеціальністю 113 Прикладна математика.

Офіційний опонент:


Завідувач відділу
коливань і вібраційної надійності
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України
кандидат технічних наук, ст. досл.

 Олег ДЕРКАЧ

Підпис оф. опонента к.т.н., ст. досл. О.Л. Деркача
ЗАСВІДЧУЮ:

В.о. ученого секретаря
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України
к.т.н., ст. досл.





Світлана ТАРАСОВСЬКА

«18» грудня 2024 р.