

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Неманежина Євгена Олександровича
«Розробка методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток газових
турбін при статичних та динамічних навантаженнях»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 113 – Прикладна математика

Актуальність теми

Розвиток авіаційних двигунів постійно пов'язаний з підвищенням температури паливо-повітряної суміші на вході в турбіну. Як наслідок, робоче середовище лопаток турбін стає все більш жорстким. Факторами, що обмежують термін служби лопаток турбін є малоциклова втома, теплова втома, повзучість/втомні напруження, теплова корозія, ерозія та інше. Зокрема, комбінація малоциклової та теплової втоми, повзучості може призвести до термомеханічної втоми, яка є одною з головних причин виходу з ладу лопаток турбін. Вищевказані впливи взаємопов'язані і мають циклічний характер, зв'язаний з переминою режимів роботи двигуна під час польоту. Такий тип навантаження набагато більш небезпечний для матеріалу деталі, ніж просто навантаження при будь-якому з названих впливів при їх постійних режимах. Температурний вплив з названих компонентів є найбільш пошкоджуючим, оскільки може викликати значні величини напружень в металі, розподіл яких може змінюватись в зв'язку зі складністю конструкції деталі.

На сьогоднішній день, у сучасних високотемпературних газових турбінах лопатки виготовляються методами спрямованої кристалізації та монокристалічного лиття. Більш прогресивним методом виготовлення лопаток турбін є монокристалічне лиття. Завдяки такому способу отримуються лопатки, які містять у своїй структурі один макрокристал. Перевагою такої структури деталі, у порівнянні із полікристалічною, є відсутність границь зерен матеріалу, які являють собою осередок накопичення пошкоджень при динамічних навантаженнях. Також, організована макроструктура має підвищену жароміцність і жаростійкість, більш високу міцність до руйнування при повзучості, меншу чутливість до зародження тріщин. Всі існуючі монокристали є анізотропними, що є ускладнюючим чинником

при розрахункових та експериментальних дослідженнях різних характеристик міцності лопаток турбін.

Саме тому дисертаційна робота Неманежина Євгена Олександровича, що спрямована на розробку методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток турбін в умовах статичних та динамічних навантажень з використанням чисельного моделювання і експериментальних підходів є актуальною.

У дисертаційній роботі поставлена науково-технічна задача, яка сформульована наступним чином: розробка теоретичних та експериментальних підходів до визначення характеристик високотемпературної міцності лопаток турбін в умовах статичного та динамічного навантаження, які враховують особливості складного об'ємно-напруженого стану лопаток, навантаження у місцях концентрації напружень та анізотропію пружних та інших механічних властивостей нікелевих жароміцних сплавів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Положення та висновки, наведені в дисертаційній роботі Неманежина Євгена Олександровича, в достатній мірі обґрунтовані як з наукового, так і з технічного поглядів. Обґрунтованість отриманих у роботі наукових положень, висновків і рекомендацій базується на фундаментальних підходах теорії пружності та теорії повзучості. При проведенні чисельних досліджень у дисертації використовувалися: метод скінченних елементів для виконання модального аналізу лопатки турбіни та побудови діаграми Кемпбелла, методи апроксимації експериментальних кривих повзучості та параметру Ларсона-Міллера, а саме метод найменших квадратів та метод параболічної інтерполяції; при виконанні експериментальних досліджень використовувалися тензометричний та резонансний методи. Чисельні експерименти проводилися з використанням ліцензійного програмного забезпечення.

Дослідження виконані з використанням математичного апарату та сучасного комп'ютерного моделювання (ANSYS Workbench, Maple, Siemens NX). Результати перевірені шляхом проведення практичних експериментів, що підтверджує обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів теоретичних досліджень підтверджується узгодженістю з результатами відповідних експериментальних досліджень.

Наукові результати дисертації застосовані під час створення відповідних методів розрахунку різних параметрів міцності лопаток турбін (математичному моделюванню повзучості, чисельному моделюванню довготривалої міцності та обчисленні часу до руйнування лопаток, відстроюванню від небезпечних резонансів), а також при створенні спеціалізованої установки для проведення багатоциклових високотемпературних втомних випробувань лопаток авіаційних газотурбінних двигунів в резонансному режимі збудження при симетричному циклі навантаження.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

– вперше проведено експериментальні дослідження втомної міцності монокристалічних лопаток газової турбіни при високотемпературному багатоцикловому навантаженні;

– вперше розроблено метод моделювання впливу зміни орієнтації кристалографічних напрямків на власні частоти коливань турбінних лопаток з монокристалічних сплавів. Метод реалізовано в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу, що дозволяє на стадії проектування лопаток забезпечувати відмежування від небезпечних резонансних режимів;

– вперше проведено верифікацію результатів модального аналізу шляхом експериментального дослідження першої та другої частот резонансних коливань охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску авіаційного двигуна, що підтвердило достовірність врахування орієнтації кристалографічних напрямків;

– вперше побудовано математичну модель анізотропної повзучості монокристалів з кубічною симетрією та процедуру ідентифікації матеріальних констант моделі по результатам фізичних експериментів при різних температурах;

– вперше створено чисельно-аналітичний метод обчислення довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбіни, які знаходяться під навантаженням від відцентрових сил. Скінченно-елементний аналіз розподілу напружень в стані

повзучості, що встановилася, поєднано з використанням феноменологічного параметру Ларсона-Міллера. Розроблене програмне забезпечення дозволяє знаходити час до руйнування лопаток з різними кристалографічними орієнтаціями.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Практична цінність полягає у використанні результатів досліджень на Державному підприємстві «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О. Г. Івченка» (ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя) – профільній організації, що займається проектуванням, виробництвом, сертифікацією, ремонтом, випробуваннями, доведенням й становленням серійного виробництва газотурбінних двигунів авіаційного й промислового застосування.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати досліджень опубліковані у 19 наукових працях, серед яких: 7 статей у журналах, включених до переліку наукових фахових видань України; 3 публікації у наукових періодичних виданнях, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus, 9 тезисів у матеріалах конференцій, що засвідчують апробацію результатів дисертації.

Участь здобувача у роботах, що опубліковані у співавторстві зазначена у вступі дисертаційної роботи.

Опубліковані матеріали повністю відображають зміст дисертації та відповідають вимогам пункту 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. №44.

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Неманежина Євгена Олександровича складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показана її наукова і практична цінність, сформульовані мета і задачі дослідження, які необхідно вирішити для її досягнення, приведена апробація дисертаційної роботи і публікації, а також зазначено внесок здобувача у публікаціях, що видані у співавторстві.

У першому розділі виконано огляд науково-технічних джерел інформації, що стосуються сучасних підходів до оцінки високотемпературної міцності лопаток турбін. Також у розділі міститься інформація про основні фізико-механічні властивості різних поколінь жароміцних нікелевих сплавів вітчизняного та закордонного виробництва. Обґрунтовано особливості математичного моделювання анізотропії жароміцних сплавів, які отримуються в результаті монокристалічного лиття, та її вплив на характеристики міцності лопаток турбін. Проведена систематизація інформації про сучасні та фундаментальні дослідження у області повзучості, втомної та довготривалої міцності монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів. Обрано напрям теоретичних і експериментальних досліджень, здійснено постановку задач дисертаційної роботи.

У другому розділі дисертації досліджено вплив анізотропії пружних властивостей монокристалів на власні частоти та форми коливань лопаток турбін ГТД. Розроблено метод визначення пружних характеристик монокристалів для різних температур на основі експериментальних даних. Запропоновано метод розрахунку пружних податливостей жароміцних монокристалічних сплавів з метою оцінки зміни власних частот коливань лопаток турбін при повороті кристалографічних систем напрямків монокристалів. Проведено чисельний експеримент з визначення власних форм та частот коливань охолоджуваної монокристалічної лопатки авіаційного газотурбінного двигуна. Виконана побудова діаграм Кемпбелла лопаток турбіни, визначені основні небезпечні гармоніки збуджуючих сил та наведено приклад відстроювання від небезпечних резонансних форм та частот коливань лопатки. Обґрунтовано та проведено експериментальну верифікацію розрахункової дискретної математичної моделі лопатки.

У третьому розділі дисертаційного дослідження описано процес моделювання стаціонарної повзучості лопаток турбіни ГТД. Розроблена математична модель повзучості монокристалічного сплаву, а також метод розрахунку констант повзучості на стаціонарній стадії згідно закону Нортон-Бейлі шляхом апроксимації експериментальних даних по повзучості монокристалічного нікелевого жароміцного сплаву. На прикладі розрахункової моделі охолоджуваної лопатки турбіни

проведено скінченно-елементне моделювання повзучості для декількох проміжків часу дії процесу повзучості.

У четвертому розділі описано метод оцінки впливу анізотропних властивостей монокристалічних жароміцних сплавів на довговічність лопаток газових турбін. Зазначений метод включає в себе апроксимацію експериментальних температурно-часових залежностей, представлених у вигляді параметру Ларсона-Міллера, для різних орієнтацій монокристалу. За допомогою розробленого методу, на основі проведеного моделювання розподілу параметра Ларсона-Міллера, виконано чисельний експеримент з визначення часу до руйнування лопатки турбіни для різних КГО монокристалу.

У п'ятому розділі приведено інформацію про експериментальне дослідження високотемпературної багатоциклової втомної міцності монокристалічних лопаток турбіни. Наведено опис розробленої спеціальної установки для випробування лопаток турбін в умовах комбінованого температурного та динамічного навантаження. Запропоновано комбінований метод оцінки багатоциклової втомної міцності в умовах високих температур. Виконані втомні випробування з визначення межі витривалості лопаток при високій температурі.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані чітко та відповідають змісту дисертаційної роботи.

Список використаних джерел, що складається із 191 найменування, досить повний і включає вітчизняні та зарубіжні публікації.

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

Академічна доброчесність

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

Щодо дисертаційної роботи можна зробити такі зауваження:

1. Існують недоліки оформлення матеріалу дисертаційної роботи, за текстом зустрічаються друкарські, пунктуаційні та стилістичні помилки.
2. Результати скінченноелементного аналізу, зокрема напруження, суттєво залежать від порядку та розміру скінченних елементу в околі розрахункової точки. Разом з тим в роботі не наведені рекомендації стосовно вибору зазначених параметрів і не досліджене питання збіжності результатів відповідних розрахунків.
3. Було б доцільно надати рекомендації на обмеження кута повороту кристалографічної системи напрямків, які дозволяють забезпечити зниження термопружних напружень і, як наслідок, підвищити працездатність готового виробу.
4. У дисертаційній роботі розглянуто динамічну міцність та процес розвитку повзучості лопаток турбін з монокристалічних нікелевих жароміцних сплавів. Доречно було б вказати чи можливе узагальнення розроблених підходів та отриманих закономірностей на інші матеріали або це частковий випадок, що отриманий виключно для конкретних матеріалів, що досліджуються.

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

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Неманежина Євгена Олександровича «Розробка методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток газових турбін при статичних та динамічних навантаженнях» за своїм змістом відповідає спеціальності 113 – Прикладна математика. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-практичну задачу, яка полягає в розробці теоретичних та експериментальних методів оцінки характеристик міцності лопаток газових турбін при високих температурах та в умовах статичного та динамічного навантаження, які враховують особливості складного об'ємно-напруженого стану лопаток, навантаження у місцях концентрації напружень та анізотропію пружних та інших механічних властивостей нікелевих жароміцних сплавів.

Подана дисертаційна робота «Розробка методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток газових турбін при статичних та динамічних навантаженнях» Неманежина Є. О. відповідає спеціальності 113 – «Прикладна математика», відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 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 КМУ від 12.01.2022 р. №44, а здобувач Неманежин Євген Олександрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

Офіційний опонент:

Завідувач відділу вібраційних і
термоміцнісних досліджень
Інституту енергетичних машин і систем
ім. А. М. Підгорного
Національної академії наук України,
доктор технічних наук, професор



Наталя СМЕТАНКІНА

Підпис д-ра техн. наук, проф.
Наталі Сметанкіної засвідчую

Учений секретар
Інституту енергетичних машин і систем
ім. А.М. Підгорного НАН України
доктор технічних наук



Сергій УГРІМОВ

«09» _____ 2024 року