

## РЕЦЕНЗІЯ

рецензента, д.т.н., с.н.с. Грабовського Андрія Володимировича  
на дисертаційну роботу Неманежина Євгена Олександровича  
«Розробка методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток  
газових турбін при статичних та динамічних навантаженнях»  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
за спеціальністю 113 – Прикладна математика

Детальний аналіз дисертаційної роботи Неманежина Євгена Олександровича на тему «Розробка методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток газових турбін при статичних та динамічних навантаженнях», що представлена для захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», дає змогу зробити комплексний висновок щодо її актуальності, ступеня обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, достовірності та значущості отриманих результатів, наукової новизни, теоретичної та практичної цінності, надати загальну оцінку дисертації.

### **1. Актуальність теми та зв'язок з науковими планами і програмами.**

Лопатки турбін авіаційних газотурбінних двигунів є термонапруженими деталями гарячого тракту ГТД, які працюють в широкому діапазоні навантажень. Серед них, зокрема, можна зазначити циклічну зміну температури, змінні у часі статичні та динамічні навантаження. Періодичність впливу зазначених параметрів призводить до зниження циклічної довговічності лопаток турбін, в особливості тих, які мають охолоджувану конструкцію. Наявність перфорацій, внутрішніх охолоджуючих каналів та інших конструкційних елементів призводить до ускладнення об'ємно-напруженого стану лопаток при їх роботі у складі ГТД. Удосконалення системи внутрішнього тепловідведення супроводжується

також і зростанням термонапруженості і зниженням термоциклічного ресурсу лопаток турбін.

На сьогоднішній день для виготовлення лопаток газових турбін широко використовуються жароміцні матеріали на нікелевій основі, які зазвичай працюють в ГТД на гранично допустимих температурах. Важливим фактором при цьому є те, що такі матеріали володіють анізотропними пружними та іншими механічними властивостями. Анізотропні характеристики зазначених матеріалів є ще одним чинником, який ускладнює дослідження параметрів міцності лопаток, як експериментально так і теоретично. В дисертаційному дослідженні Неманежина Євгена Олександровича, при розробці методів оцінки різних параметрів міцності при статичних та динамічних навантаженнях, особлива увага приділяється врахуванню анізотропії пружних та інших механічних властивостей монокристалів, що актуалізує тематику дисертації.

## **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертація виконувалась відповідно до вимог освітньо-наукової програми 113 – «Прикладна математика», яка була впроваджена на кафедрі математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії, навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

## **3. Наукова новизна одержаних результатів.**

Дисертація містить наукову новизну, з найбільш суттєвих доробок роботи можна виділити:

– верифікацію результатів модального аналізу шляхом експериментального дослідження першої та другої частот резонансних коливань охолоджуваної лопатки турбіни високого тиску авіаційного двигуна, що дозволило підтвердити достовірність проведеного експерименту та чисельних розрахунків;

– описано комбінований чисельно-експериментальний метод отримання характеристик втомної міцності монокристалічних лопаток газової турбіни при високотемпературному багатоцикловому навантаженні;

– метод математичного моделювання впливу зміни орієнтації кристалографічних напрямків на власні частоти коливань лопаток турбін з монокристалічних сплавів. Зазначений метод дозволяє у комбінації з побудовою діаграм Кемпбелла та визначенню небезпечних резонансних режимів, на етапі проектування лопаток відстроюватися від найнебезпечніших резонансів;

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

– чисельно-аналітичний метод обчислення довготривалої міцності монокристалічних лопаток турбіни, які знаходяться під навантаженням від відцентрових сил. Пропонований метод базується на моделюванні розподілу параметру Ларсона-Міллера по лопатці турбіни із подальшим обчисленням часу до руйнування лопатки турбіни з різними КГО.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача виступає в якості вагомого внеску до теоретичних та експериментальних підходів до визначення параметрів міцності монокристалічних лопаток турбін газотурбінних авіаційних ГТД при статичних та динамічних навантаженнях на сучасних авіадвигунобудівних підприємствах.

#### **4. Практична цінність одержаних результатів та рекомендації щодо їх подальшого використання.**

Дослідження має високу практичну цінність. Автор зазначає можливість використання запропонованих методів та математичних моделей для розрахунків різноманітних параметрів високотемпературної міцності лопаток газових турбін в умовах статичних та динамічних навантажень в організаціях та підприємствах, що спеціалізуються у виготовленні авіаційних двигунів та наземних газотурбінних установок.

Отримані в ході виконання дисертаційного дослідження результати впроваджено на вітчизняному авіадвигунобудівному підприємстві Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка (ДП «Івченко-Прогрес», м. Запоріжжя), що підтверджується відповідним актом впровадження, зазначеним у одному з додатків дисертації.

#### **5. Повнота викладення матеріалів дисертації в наукових працях, які опубліковані автором.**

За результатами виконання дисертаційної роботи опубліковано сумарно 19 наукових праць, з них: у фахових наукових виданнях України – 7 статей; у періодичних виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus – 3 статті; тез доповідей у матеріалах конференцій, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації – 9. Зазначене вище дозволяє стверджувати, що представлена дисертаційна робота є самостійним, завершеним науковим дослідженням, результати якого мають значення для галузі прикладної математики, а також для підприємств, що спеціалізуються на проектуванні, сертифікації та виготовленні авіаційних двигунів та енергетичних установок.

#### **6. Аналіз змісту дисертації. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.**

Дисертація Неманежина Є. О. є завершеною науковою роботою, містить анотацію – українською та англійською мовами, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел та два додатки.

Метою дисертаційного дослідження здобувача є 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.

Об'єктом дослідження є процес розвитку пружних деформацій та повзучості в робочих режимах лопаток турбін з монокристалічних нікелевих жароміцних сплавів.

Предметом дослідження є характеристики високотемпературної міцності лопаток турбін при статичних та динамічних навантаженнях з урахуванням анізотропних властивостей монокристалічних сплавів.

У вступі обґрунтовано вибір теми дисертаційного дослідження, описано мету та задачі дослідження, приведена інформація про предмет та об'єкт дослідження, методи дослідження, а також зазначено наукову новизну представленої роботи. Зокрема, визначені основні практичні результати дисертаційного дослідження, містяться відомості про апробацію результатів дисертації, а також про внесок здобувача в опублікованих у співавторстві наукових працях.

У першому розділі дослідження проведено огляд сучасних науково-технічних джерел інформації, що стосуються підходів до оцінки параметрів високотемпературної міцності лопаток турбін. Зокрема, у розділі приведено порівняльний аналіз різних методів виготовлення лопаток турбін газотурбінних двигунів. Також матеріали розділу містять інформацію про основні фізико-механічні властивості різних поколінь вітчизняних та закордонних жароміцних нікелевих сплавів.

Також обґрунтовано основні особливості математичного моделювання анізотропії жароміцних сплавів, які отримуються в результаті монокристалічного лиття. Проведена систематизація інформації про сучасні та фундаментальні дослідження у області повзучості, довготривалої та втомної міцності монокристалічних жароміцних нікелевих монокристалічних сплавів. Сформульовані мета та задачі дослідження.

У другому розділі роботи 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 та описано математичні формулювання для розрахунку пружних податливостей жароміцних монокристалічних сплавів з метою оцінки зміни власних частот коливань лопаток турбін при повороті кристалографічних систем напрямків монокристалів. Виконано визначення

власних форм та частот охолоджуваної лопатки турбіни авіаційного газотурбінного двигуна. Виконана побудова діаграм резонансу лопаток турбіни, визначені основні небезпечні гармоніки збуджуючих сил та наведено приклад відстроювання від небезпечних резонансних режимів коливань лопатки.

Описано процес верифікації розрахункової дискретної математичної моделі лопатки. Правильність побудови моделі для обчислень підтверджувалася шляхом порівняння результатів проведеного модального аналізу лопатки турбіни та визначених експериментальним шляхом перших двох резонансних форм та частот коливань натурних лопаток турбіни.

Третій розділ дисертації присвячено процесу моделювання анізотропної повзучості лопаток турбіни авіаційних двигунів. Розроблена математична модель анізотропної повзучості монокристалічного сплаву, а також метод розрахунку констант повзучості згідно обраного закону повзучості шляхом апроксимації експериментальних даних з відкритих джерел інформації для типового монокристалічного нікелевого жароміцного сплаву. Проведено скінченно-елементне моделювання повзучості для декількох часових проміжків дії процесу повзучості на скінченно-елементній моделі монокристалічної лопатки турбіни. Зазначені подальші перспективи розвитку пропонованої математичної моделі повзучості шляхом накопичення більшої кількості результатів натурних експериментів.

У четвертому розділі описано метод оцінки впливу анізотропних характеристик монокристалічних жароміцних сплавів на довговічність лопаток газових турбін. Метод включає в математичні формулювання для апроксимації експериментальних температурно-часових залежностей, представлених у вигляді феноменологічного параметру Ларсона-Міллера, для різних КГО 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 та для різних температурних навантажень.

У п'ятому розділі описано розрахунково-експериментальний метод визначення параметрів високотемпературної багатоциклової втомної міцності монокристалічних лопаток турбіни. У розділі приведено опис виготовленої установки для випробування лопаток турбін в умовах комбінованого високотемпературного та динамічного навантаження. Здобувачем запропоновано метод оцінки багатоциклової втомної міцності в умовах високих температур, який включає проведення розрахунків методом скінченних елементів та виконання експериментальних досліджень на натурних лопатках турбіни. Проведені втомні випробування з визначення межі витривалості лопаток в умовах резонансного збудження коливань та високої температури. Зазначено перспективи подальшого розвитку запропонованого методу та використання його при оцінці запасів міцності лопаток турбін.

Висновки, сформульовані у роботі, висвітлюють результати дослідження як вирішення висунутих в дисертації завдань. В цілому висновки відповідають вимогам, які висуваються до результатів дисертаційного дослідження на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Список літератури досить широко охоплює предметне поле дослідження, значною мірою відображає опрацювання автором великої кількості джерел науково-технічної інформації, що включає в себе опис досягнень вітчизняних і закордонних вчених, а також наукових та промислових установ.

Два додатки містять інформацію про опубліковані за результатами виконання дисертації наукові праці та практичне впровадження результатів дисертації на авіадвигунобудівному підприємстві.

#### **7. Достовірність отриманих результатів та висновків**

Достовірність отриманих результатів зумовлено поставленими метою та завданнями, а також використанням відповідної методології дослідження. Крім того, достовірність заявлених положень обґрунтовується комплексним

підходом у вивченні визначеного об'єкта, що також зумовлює і низку певних методів, які були використані в процесі дослідження.

### **8. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладення наукових положень та результатів в опублікованих працях**

Дисертація виконана з дотримання вимог академічної доброчесності, отримані результати дають підстави говорити про оригінальність роботи. У тексті містяться авторські ідеї, і не виявлено використання ідей інших науковців без посилання на їх роботи.

Основні ідеї автора та результати дослідження викладено у семи статтях у виданнях, що відносяться до наукових фахових видань України; трьох статтях, у періодичних виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus. Дев'ять тез доповідей у матеріалах конференцій свідчать про те, що дисертант активно приймав участь в міжнародних конференціях, де була проведена апробація ідей, що викладено у дисертаційному дослідженні.

### **9. Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

1. У другому розділі, коли мова йде про діаграму Кемпбелла, хотілося б побачити вплив зовнішнього навантаження, яке дає дві компоненти на діаграмі, а саме пряму та зворотню синхронну прецесію.

2. У розділі три при дослідженні повзучості в монокристалічній лопатці був обраний максимальний час розрахунку у 20 тис. секунд. З дисертації не зрозуміло чому був обраний саме такий максимальний час, а не більший.

3. З дисертації не зрозуміло чи були виконані дослідження по вибору величини скінченно-елементної моделі. Як поведе себе розрахункова модель при зменшенні величини максимальної величини скінченного елемента?

4. З дисертації незрозуміло, чи виконувалася задача розрахунку температурних полів. Це питання важливе при дослідженні саме охолоджуваної лопатки, оскільки можлива зміна температури від зовнішньої поверхні до охолоджуючого каналу.

Однак, вказані недоліки не знижують цінності та практичного значення отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів і, внаслідок цього, її позитивну оцінку в цілому.

### 10. Висновки

Дисертаційна робота Неманежина Є. О. є завершеною науково-дослідною роботою, яка містить науково-обґрунтовані результати, має наукову новизну та дає перспективи подальших досліджень. Тема дослідження відповідає галузі знань 11 – «Математика та статистика» та спеціальності 113 – «Прикладна математика».

Отже, враховуючи актуальність теми, отримані результати та практичну значущість вважаю, що дисертаційна робота Неманежина Євгена Олександровича «Розробка методів розрахунку високотемпературної міцності лопаток газових турбін при статичних та динамічних навантаженнях» відповідає вимогам 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради Закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» від 12.01.2022 р. № 44 та вимогам до оформлення дисертації МОН України від 12.01.2017 № 40, а сам автор, Неманежин Євген Олександрович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 113 «Прикладна математика».

Рецензент – доктор технічних наук, с.н.с.,  
провідний науковий співробітник кафедри  
теорії і систем автоматизованого  
проекування механізмів і машин  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»

03.01.2025р.



Андрій ГРАБОВСЬКИЙ

Підпис Андрія Грабовського  
 ЗАСВІДЧУЮ:  
 ВЧЕНИЙ СЕКРЕТАР  
 НАЦІОНАЛЬНОГО-ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
 "ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"  
 "03" 01 2025 р.

ЗАЩЕВ Ю. І.