

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Берлізової Тетяни Юріївни «Скінченно-елементний аналіз термопружного стану охолоджуваної монокристалічної лопатки газотурбінного двигуна», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

### **Актуальність теми.**

Актуальність теми дисертаційної роботи визначається необхідністю забезпечення термоміцності лопаток перших ступенів газових турбін, що працюють в умовах підвищених температурних та механічних навантажень. Можливості сучасних термоміцних сплавів відстають від вимог до лопаток перших ступенів газотурбінних двигунів. Тому, для цих лопаток використовуються різні системи охолодження. Одними з ефективних систем охолодження є вихрова система та плівкова. Робота Берлізової Т.Ю. присвячено вивченню температурного та термопружного стану саме монокристалічних лопаток з вихровою та частково плівковою системою охолодження. Виконання роботи було зв'язано із рядом труднощів, які пов'язані зі складною тривимірною формою об'єкту, неоднорідністю матеріалу, урахуванням температурних полів та відцентрованих сил. Слід також відзначити що робота виконувалась до бюджетних тем НАН України та госпдоговору с ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект».

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин та профілю спеціалізованої вченої ради Д 64.180.01.

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації.** Слід відмітити, що при виконанні роботи використовувались сучасні досягнення теорії пружності, теплопровідності, термопружності з використанням властивостей монокристалічних матеріалів. Використовувались чисельні методи динаміки та міцності машин для тривимірних конструкцій з неоднорідних матеріалів та сучасні варіанти методу скінченних елементів. Перевірка збіжності чисельних досліджень та позитивний досвід використання практичних рекомендацій свідчать про достовірність результатів отриманих у роботі. Дисертантка також використала порівняння розрахункових частотних характеристик лопатки з експериментальними, що також є непрямим підтвердженням достовірності результатів.

### **Наукова новизна дисертаційної роботи.**

Наукова новизна результатів роботи ґрунтується на глибокому аналізі фізичних процесів теплопровідності та термопружності в тривимірних неоднорідних монокристалічних конструкціях.

Вперше розроблено математична та скінченно-елементна моделі монокристалічної лопатки з вихровою та частково плівковою системою охолодження, що відрізняються урахуванням зміни термопружного НДС при зміні орієнтації кристалографічних осей матеріалу. Для лопаток з вихровою та плівковою системами охолодження, які враховують зміну термопружного НДС в залежності від властивостей монокристалічного матеріалу. Розрахункові моделі лопатки також відрізняються урахуванням безперервного перерозподілу температур по об'єму лопатки.

Вперше отримано розподіл переміщень, деформацій та напружень по об'єму лопатки, а також характер розподілу напружень від орієнтації кристалографічних осей. В результаті, сформульовані обмеження на допустимі відхилення кристалографічних осей матеріалу. Слід відзначити, що наукова новизна результатів роботи пов'язана всебічним аналізом взаємопов'язаних теплопровідності та термопружності у тривимірних неоднорідних елементах складної форми.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

Одержані в роботі результати температурного та термопружного станів охолоджуваної монокристалічної лопатки газотурбінного двигуна та особливості впливу зміни орієнтації кристалографічних осей на НДС лопатки мають практичне значення для міцності лопаток ГТД. Практичне значення також мають рекомендації по обмеженню відхилень КГО. Слід відзначити впровадження деяких результатів досліджень на ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект» та ДП «Івченко-Прогрес» ім. академіка О. Г. Івченко.

#### **Повнота викладу наукових положень, висновків, результатів і рекомендацій в опублікованих роботах**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 142 сторінки, з них 56 рисунків по тексту; 6 таблиці по тексту; список з 128 найменувань використаних джерел на 14 сторінках, 3 додатки на 12 сторінках. Автореферат та публікації повністю розкривають основний зміст дисертації.

#### **Оцінка змісту дисертації.**

У вступі надано обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, визначені мета, предмет і об'єкт дослідження та основні характеристики дисертації.

У першому розділі розглянуті експериментальні та теоретичні дослідження в області спрямованої кристалізації. Приділено достатньо уваги як закордонним так і вітчизняним авторам. Розглянуто аналіз напружено-деформованого стану лопаток газових турбін з різними системами

охолодження, а також без них. на підставі проведеного аналізу зроблено висновок про завдання дослідження.

У другому розділі дисертаційної роботи розглянуто математична та скінченно-елементна постановка задачі. Показана необхідність розгляду взаємозалежної задачі температурного та термопружного стану монокристалічної охолоджуваної лопатки. Температурна задача з урахуванням конвекції отримала розв'язання за допомогою усереднення та апроксимації. Досить повно описані анізотропні властивості матеріалу з урахуванням відхилення кристалографічних осей.

У третьому розділі наведено аналіз напружено-деформованого стану лопатки ГТД, з вихровий і частково плівковою системою охолодження. Розглянуто вплив температурного і термопружного впливу. Результати дослідження показали, що основний внесок у термонапружений стан монокристалічної лопатки вносить безпосередньо температурне поле, на відміну від дії відцентрових сил. Представлені графіки розподілу напруг за обсягом лопатки, що в повній мірі відображає картину напружено-деформованого стану лопатки.

У четвертому розділі описано вплив повороту кристалографічних осей на термопружний стан лопатки. Розглянуто вплив як азимутальної так й аксіальної орієнтації КГО матеріалу. Повною мірою розглянуто вплив відхилення щодо осі Z, що відповідає напрямку [001]. Показано, що перерозподіл термопружних напружень відбувається по всьому об'єму лопатки. Також розглянуто напружено-деформований стан лопатки в найбільш характерних точках (вхідний й вихідний крайках).

При розгляді аксіальної орієнтації КГО на термопружний стан лопатки, було визначено, що напруження як максимальні, так і мінімальні носять циклічний характер. Також, як і при азимутальній орієнтації максимумами термопружних напружень знаходяться в різних точках лопатки при зміні кута відхилення.

Проведені дослідження дозволили сформулювати рекомендації на відхилення КГО осей матеріалу, від осей самої лопатки. Ці рекомендації узгоджуються з відомими в літературі даними для інших видів лопаток, а також задовольняють можливостям відхилення КГО монокристалічного матеріалу.

#### **По роботі можна зробити наступні зауваження:**

1. В роботі стверджується, що дослідження температурного стану лопатки виконано різними методами, а для результатів проведено полілінійне осереднення. Але в роботі та авторефераті цим дослідженням наведено дуже мало місця.

2. Зміна НДС лопатки при порушенні аксіальної орієнтації досліджено менш детально ніж для зміни азимутальної орієнтації.

3. У літературному огляді досить повно розкрито проблему монокристалічних матеріалів, але мало уваги приділено дослідженню НДС монокристалічних лопаток.

### **Загальна оцінка роботи**

Незважаючи на вказані недоліки, слід визначити що робота викликає позитивне враження. Робота виконана на високому науковому рівні, а її результати мають як теоретичне, так і практичне значення. Дисертація Берлізової Т.Ю. є завершеною науковою роботою, у якій вирішено важливу науково-технічну задачу динаміки та міцності машин щодо визначення термопружного НДС монокристалічної лопатки з вихровою системою охолодження, у тому числі визначено вплив відхилення КГО на НДС, що сприяє підвищенню термоміцності лопатки. Реферат та опубліковані роботи повністю відображають зміст дисертації. Робота відповідає усім вимогам п.п. 9, 11 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів», які пред'являються до кандидатських дисертацій від 24 липня 2017 року №567, а також паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин. На основі вищезазначеного можна зробити висновок, що Берлізова Т.Ю. заслуговує присудження їй ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Вона містить результати проведених автором досліджень та отримані науково обґрунтовані висновки, які в сукупності розв'язують конкретну науково-практичну задачу в галузі технічних наук – визначення термопружного НДС лопатки газотурбінних двигунів. На основі вищезазначеного можна зробити висновок про те, що Берлізова Т.Ю. заслуговує присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний  
університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» (м. Харків)  
професор кафедри конструкції авіаційних двигунів

**Гусєв Юрій Олексійович,**

Підпис Гусєва Ю.О підтверджую  
В.о .проректора з НР. **Колесник В.П.**

