

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Берлізової Тетяни Юріївни

«Скінченно-елементний аналіз термопружного стану охолоджуваної монокристалічної лопатки газотурбінного двигуна»,

яка подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Актуальність теми дисертації. Нагальна необхідність підвищення питомої потужності та ефективності при одночасному зниженні матеріаломісткості газотурбінних двигунів (ГТД), які широко використовуються в різних галузях промисловості, вимагають від їх розробників нових підходів до конструювання. Особливо це стосується робочих лопаток, які відносяться до найбільш високонавантажених конструктивних елементів ГТД, оскільки в процесі їх експлуатації перебувають під впливом широкого спектру статичних, динамічних та температурних навантажень.

В практиці газотурбобудування для виробництва лопаток турбін останнім часом широко використовуються монокристалічні матеріали. Це обумовлено тим, що намагання зниження матеріаломісткості газотурбінних двигунів при одночасному підвищенні їх техніко-економічних характеристик вимагає пошуку методів та засобів забезпечення міцності як двигуна в цілому, так і окремих його конструктивних елементів, в першу чергу робочих лопаток. Одним із реальних шляхів вирішення зазначеної проблеми є використання для турбінних лопаток жароміцних монокристалічних матеріалів, що дозволяє значно підвищити температуру газу перед турбіною та ресурс лопаток. Однак такі матеріали характеризуються суттєвою анізотропією механічних властивостей. Крім того, на сьогодні існуюча технологія виробництва робочих лопаток з монокристалічних матеріалів допускає відхилення орієнтації кристалографічних осей (КГО) від заданої. Це обумовлює необхідність вивчення їх впливу на напружений стан робочих лопаток турбін. Незважаючи на безсумнівні успіхи в цьому напрямку, багато питань потребує подальшого вирішення. Особливо це стосується нових конструкцій лопаток, зокрема з вихровою та плівковою системами охолодження. Тому актуальність теми представленої дисертаційної роботи, яка полягає саме у розрахунковому вирішенні задачі впливу на НДС монокристалічної лопатки з вихровою системою охолодження орієнтації кристалографічних осей, не викликає сумніву.

Зв'язок роботи з пріоритетними науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» та Інституті проблем машинобудування ім. А.М.Підгорного НАН України у відповідності із затвердженими планами науково-дослідних тем «Розробка наукових основ аналізу нестационарного динамічного напруженого стану елементів енергетичного та іншого обладнання з урахуванням пошкоджень» (№ДР 0111U001758) та «Аналіз та поліпшення динамічних міцностних властивостей перспективних енергетичних машин та ракетно-космічної техніки під дією навантаження різної фізичної

природи» (№ДР 0115U001941), а також господарчого договору «Дослідження напружено-деформованого стану робочої охолоджуваної монокристалічної лопатки газової турбіни ГТД ДН80 під дією відцентрових сил і температурних полів» з підприємством НВКГ «Зоря» - «Машпроект», яке, що особливо слід відзначити, широко використовує в практиці проектування газових турбін саме лопатки зі вказаною вище системою охолодження.

Висновки про обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, достовірність основних результатів. Обґрунтованість запропонованих в роботі скінченно-елементних (СЕ) моделей робочої лопатки з урахуванням властивостей монокристалічних матеріалів та експлуатації в умовах температурного поля; зіставленням і критичному аналізу отриманих результатів досліджень з відомими з науково-технічної літератури; коректністю постановки задачі з погляду сучасних досягнень в галузі динаміки та міцності енергетичного машинобудування; використанням новітніх досягнень теорії термопружності та теплопровідності, сучасних методів аналізу НДС, зокрема відомих комплексів скінченно-елементного аналізу.

Наукова новизна результатів, отриманих в дисертаційній роботі, полягає в розробці математичної та скінченно-елементної моделей лопатки з вихровою та частково плівковою системами охолодження, які дозволяють враховувати вплив властивостей монокристалічного матеріалу та розподілу температур по об'єму лопатки на її термопружний НДС, з використанням яких отримані залежності зміни розподілу напружень по об'єму лопатки від орієнтації кристалографічних осей, що дало можливість виділити зони локалізації максимальних напружень та встановити обмеження на допустимі відхилення КГО.

Практична цінність результатів роботи полягає у виявленні особливостей температурного і термонапруженого станів реальної монокристалічної лопатки ГТД з вихровою та частково плівковою системами охолодження з урахуванням впливу орієнтації КГО на напружено-деформований стан та розробкою практичних рекомендацій щодо обмеження їх відхилень. Отримані в роботі результати обчислювальних експериментів знайшли використання при проектуванні турбін на провідних підприємствах України в галузі газотурбобудування - ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроект» та «ЗМКБ «Прогрес» ім. академіка О.Г.Івченка». Результати виконаних досліджень дозволили сформулювати рекомендації щодо обмеження на поворот кристалографічних осей, як при зміні азимутальної так і аксіальної їх орієнтації, що узгоджується з відомими рекомендаціями для лопаток з прямолінійною системою охолодження.

Оцінка структури, обсягу та змісту роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 142 стор., в тому числі 56

рисунків та 6 таблиць. Список використаних джерел включає 128 найменувань.

У **вступі** обґрунтована актуальність та доцільність теми дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану наукових досліджень з питань визначення НДС монокристалічних робочих лопаток турбін. Показано, що більшість відомих розрахункових та експериментальних досліджень виконувалась для лопаток з прямолінійною системою охолоджуваних каналів. Проведений аналіз дозволив сформулювати основні задачі дисертаційної роботи та вибрати підходи до моделювання об'єкту вивчення і методи досліджень.

Математичну постановку задач температурного та термопружного станів монокристалічної лопатки з вибраними системами охолодження розглянуто у **другому розділі**. Стаціонарна задача теплопровідності зведена до розв'язання варіаційної проблеми. При цьому використані дані температурного стану лопатки, які надані підприємством по зонах з однаковими температурами. Вони згладжуються за допомогою полілінійної апроксимації. Крім того, вирішена задача теплопровідності з граничними умовами третього роду, результати якої осереднюються, що підвищує їх достовірність. Розглянуто математичну модель монокристалічної лопатки у вигляді матриць податливості. Показано залежність її коефіцієнтів від орієнтації КГО.

У **третьому розділі** наведені результати визначення температурного та термопружного станів охолоджуваної монокристалічної лопатки зі складною вихровою системою охолодження і каналами для виходу охолоджуваного повітря біля вихідної кромки. Показано, що температурні поля викликають розширення лопатки, яке слід враховувати для встановлення зазорів у лабіринтному ущільненні на периферії лопатки. Сумарний статичний напружено-деформований стан лопатки визначається як з урахуванням температурних полів, так і діючих відцентрових сил. Термопружний стан лопатки визначено на основі розподілу температур по об'єму лопатки. Результати проведених досліджень напружено-деформованого стану лопатки показали, що основні напруження виникають по об'єму лопатки за рахунок дії нерівномірних температурних полів, а величина напружень від відцентрових сил значно поступається такій внаслідок впливу температурного поля.

Четвертий розділ присвячено викладенню результатів досліджень впливу відхилень КГО на зміну термонапруженого стану лопатки. Досить детально вивчені особливості такої зміни при порушенні азимутальної орієнтації КГО. Показано, що при цьому відбувається перерозподіл усіх температурних напружень, а також зміна всієї картини НДС лопатки по її об'єму. Тому особлива увага приділена перерозподілу максимальних еквівалентних напружень. Одночасно велику увагу приділено вивченню зміни термонапружень в найбільш уразливих при експлуатації точках лопатки, а саме на її вхідній та вихідній кромках. Крім того, в роботі розглянуто також питання впливу зміни аксіальної орієнтації КГО на термонапружений стан вибраної

монокристалічної охолоджуваної лопатки. В цьому випадку проведено дослідження як максимальних, так і мінімальних еквівалентних напружень. В усіх випадках спостерігається циклічний характер зміни їх розподілу, що повторюється через 90° повороту КГО.

Публікації та оприлюднення результатів. За результатами проведених комплексних розрахункових досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковано 14 наукових праць, з яких 8 – в наукових фахових виданнях України, з яких одна і періодичному виданні, яке включено до наукометричної бази Scopus, що відповідає нормативним вимогам. Матеріали роботи апробовані на багатьох представницьких науково-технічних конференціях та семінарах.

Основні зауваження по роботі:

1. Для монокристалічних лопаток турбін характерно порушення як аксіальної, так і азимутальної орієнтації КГО. Однак автор досліджує чомусь лише зміну еквівалентних напружень на вхідній та вихідній кромках лопатки тільки при порушенні аксіальної орієнтації без відповідного обґрунтування.
2. В роботі представлені результати порівняння отриманих чисельних розв'язків з експериментальними даними, які отримані іншими авторами. Але слід зазначити, що такі дані викладено досить стисло, що затрудняє їх аналіз. Крім того, бажано було б розкрити особливості їх вимірювання, похибки та інші чинники.
3. Відомо, що відхилення кристалографічних осей досить суттєво впливає на спектр власних частот як лопаток, так і їх вінців. Але це питання в роботі не розглянуто, що дещо звужує широту дослідження.
4. В постановці задачі задекларовано вивчення впливу дії відцентрових сил на характеристики НДС лопатки. Однак це питання не знайшло чіткого висвітлення в роботі.
5. На жаль, в тексті роботи не вдалося уникнути граматичних помилок, неоднозначності у використанні окремих термінів та інших редакційних неузгодженостей. Так, наприклад, назва розділу 3 «Термонапружена задача» не розкриває його основної суті. Формулювання пунктів «Висновків» в ряді випадків не розкривають наукову значимість отриманих результатів, а п.1 взагалі відноситься до постановки задачі.

Загальний висновок.

Результати проведеного аналізу дисертаційної роботи Берлізової Тетяни Юріївни «Скінченно-елементний аналіз термопружного стану охолоджуваної монокристалічної лопатки газотурбінного двигуна», дозволяють зробити однозначний висновок, що вона є завершеним науковим дослідженням з якій з використанням обчислювального експерименту вирішена важлива

науково-технічна задача визначення впливу відхилення орієнтації кристалографічних осей на термопружний стан монокристалічної лопатки газотурбінного двигуна з вихровою системою охолодження, і за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Сформульовані зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи, їх слід розглядати як побажання здобувачу наукового ступеню для подальшої плідної науково-дослідної роботи і вказують на необхідність більш уважного ставлення до оформлення результатів досліджень.

Автореферат в достатній мірі відображає основні положення дисертаційної роботи. Оформлення роботи і автореферату в цілому відповідає нормативним вимогам.

Робота відповідає усім вимогам п.п. 9, 11 і 12 «Порядку присудження наукових ступенів» від 24 липня 2017 року №567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Тетяна Юріївна Берлізова, безумовно заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин.

Заст. директора Інституту
проблем міцності
імені Г.С.Писаренка НАН України,
зав. відділу коливачь та вібраційної
надійності
доктор технічних наук, професор



А.П.Зінковський