

# ВІДГУК

**офіційного опонента доктора технічних наук, професора  
ДУБОВОГО Олександра Миколайовича на дисертаційну роботу  
Сотнікова Євгенія Георгійовича «Удосконалення  
складу газотермічних ущільнювальних покриттів деталей турбіни для  
підвищення ефективності газотурбінних двигунів», представлену на  
здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю  
05.02.01 – Матеріалознавство**

## **1. Загальна характеристика роботи**

**Структура і обсяг дисертації.** Робота виконана в Запорізькому національному технічному університеті Міністерства освіти і науки України. Обсяг роботи 193 сторінки тексту, вона складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел інформації, що подаються в кінці дисертації, загалом 137 найменувань, 3 додатків, містить 74 рисунки, 12 таблиць.

**Оформлення дисертації.** Дисертаційна робота, за винятком несуттєвих недоробок, оформлена у відповідності з ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення».

Робота написана українською мовою. Подання матеріалу послідовне, розкриває повністю вирішення поставлених завдань, викладена технічно грамотною мовою.

За обсягом і структурою дисертаційна робота знаходиться у межах, які встановлені вимогами МОН України.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації і дає повну уяву про роботу. Автореферат написано українською мовою обсягом до 0,9 авторського аркуша, розіслано 22 грудня 2018 року.

Зміст дисертації, її об'єкт і предмети дослідження відповідає як паспорту спеціальності, так і за напрямками досліджень.

## **2. Актуальність теми дисертаційної роботи**

Для підвищення ефективності сучасних авіаційних двигунів конструктори підвищують температуру газу перед турбіною, у зв'язку з цим виникає необхідність розробки нових ущільнювальних покриттів з більш високою експлуатаційною стійкістю в умовах дії підвищених температур та динамічних навантажень. При виробництві ГТД широко застосовуються ущільнювальні покриття на основі нікелю та твердої змазки, функціональні властивості яких зберігаються до 900° С. Тому дослідження спрямовані на розробку ущільнювальних покриттів, які забезпечують ефективну роботу при температурах 1050-1100° С є актуальними.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до технічних завдань науково дослідних робіт:

- ГД 2815 «Розробка складу та технології нанесення багатошарових покриттів на деталі газотурбінних двигунів, що працюють в умовах високих температур» (номер державної реєстрації 0115U004905);

- ДБ 03818 «Розробка складів різнофункціональних покриттів та технологій їх нанесення на відповідальні деталі газотурбінних двигунів літальних апаратів подвійного використання» (номер державної реєстрації 0118U003596).

Рівень участі автора – виконавець.

У зв'язку із цим, тема дисертаційної роботи Сотнікова Є.Г. її мета і завдання досліджень, як спрямовані на удосконалення складу газотермічних ущільнювальних покриттів деталей турбін для підвищення ефективності газотурбінних двигунів є актуальними.

### **3. Ступень обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій роботи.**

В роботі вирішена задача удосконалення складу ущільнювальних покриттів, які можуть тривалий час експлуатуватися в умовах дії агресивного розігрітого газового потоку при температурах 1050-1100° С. Обґрунтованість наукових положень висновків і рекомендацій полягає в наступному. Застосування трьох комбінацій і ітрійвміщуючих лігатур дозволило підвищити термічну стійкість покриттів та забезпечити реалізацію поетапних фазових перетворень з виділенням різних за природою оксидних та інтерметалідних сполук. Встановлено, що додавання лігатур, які містять ітрій, приводить до подрібнення напилених частинок і зумовлює більш рівномірний розподіл пор.

Детальні рентгеноструктурні дослідження дозволили встановити особливість формування фазового складу ущільнювальних покриттів, як під час напилення, так і в процесі довготривалої високотемпературної витримки.

Визначення теплофізичних характеристик експериментальних покриттів дозволило встановити ймовірні перетворення, які призводять до зниження експлуатаційної стійкості. Встановлено, що формування в ущільнювальних експериментальних покриттях додаткових фаз приводить до зниження показників тепло-та температуропровідності. Для визначення зносостійкості ущільнювальних покриттів застосована нестандартна методика визначення їх функціональних характеристик із використанням додаткових параметрів оцінки триботехнічного стану елементів роторно-статорної частини ГТД.

Встановлено, що формування дисперсних включень термостійких шпінелей ймовірно підвищує опір високотемпературній корозії ущільнювального покриття.

Обробка результатів досліджень здійснювалась із застосуванням методів математичної статистики. Перевірка точності експериментальних даних проводилась з використанням відомих критеріїв.

Все зазначене вище дозволяє зробити висновок про те, що наукові положення, висновки і рекомендації роботи у достатньому ступені обґрунтовані.

#### **4. Достовірність викладених результатів визначається:**

- ретельним аналізом джерел інформації, присвячених перспективам підвищення ефективності ГТД при застосуванні ущільнюючих покриттів;
- коректністю використаних методик, достатньою точністю експериментальних даних;
- коректним використанням взаємодоповнюючих сучасних методів досліджень, методів математичного моделювання включно;
- практичним значенням розроблених рекомендацій.

#### **5. Наукова новизна отриманих результатів**

Основними науковими результатами, що отримав дисертант, і які мають ознаки новизни наступні:

1. Вперше розроблено склад ущільнювального покриття із змінними контрольованими на окремих етапах експлуатації двигуна фізико-механічними властивостями, які обумовлені розвитком структурно-фазових перетворень, що супроводжуються появою нових шпінельних оксидних сполук та, як наслідок, покращенням ерозійної стійкості та опору газовій корозії.

2. Вперше встановлено, що під час робочого термоциклювання в процесі експлуатації газотурбінного двигуна в покриттях відбуваються фазові перетворення із додатковою появою в структурі складних оксидних сполук, що впливає на різницю коефіцієнтів термічного лінійного розширення (КТЛР) матеріалу основи і покриття та адгезійну міцність. Найбільш раціональним складом із мінімальною різницею КТЛР при попередньому і повторному нагріванні є матеріал із складною ітрієвою лігатурою КНА-82+ Co-Ni-Cr-Al-Y, що зумовлює більш якісне адгезійне з'єднання покриття із матеріалом основи.

3. Вперше за запропонованою методикою оцінки фрикційної взаємодії елементів газодинамічного ущільнення натурального вузла газотурбінної установки з використанням модельного трибоз'єднання «рухомий диск з зубчастим профілем – нерухома пластина з покриттям» отримано принципово нову сукупність триботехнічних та геометричних параметрів, що відображають якість формування контакту і прояв властивостей розроблених покриттів.

#### **6. Практичне значення роботи**

Виконано актуальне завдання розробки хімічного складу ущільнювального покриття турбіни з високою експлуатаційною стійкістю в умовах дії високотемпературного газового потоку (1050-1100° С). Методами моделювання встановлено, що застосування даного покриття дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії двигуна за рахунок зменшення витoku газів при збереженні розміру радіальних зазорів та знизити витрати палива за годину на 2,3 кг, що приводить до загального зниження витрат палива на 184 т на рік.

## **7. Апробації результатів дисертації**

Результати досліджень представлялись на наступних міжнародних конференціях: XIII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові конструкційні сталі та стопи й методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів» (Україна, Запоріжжя, 2014); «Міжнародний Конгрес двигунобудівників» (Україна, Коблево, 2015, 2016, 2017, 2018); XI «Міжнародні молодіжні науково-технічні читання ім. А.Ф. Можайського» (Україна, Запоріжжя, 2018).

У повному обсязі робота доповідалась на:

- семінарі кафедри фізичного матеріалознавства Запорізького національного технічного університету;
- засіданні міжкафедрального тематичного семінару Запорізького національного технічного університету.

У цілому, представлені в роботі наукові положення, висновки і рекомендації достовірні, пройшли достатню апробацію і мають наукову новизну.

## **8. Повнота викладу результатів дисертації у наукових виданнях**

За результатами досліджень випущено 10 публікацій, з яких 1 - стаття в виданнях з індексом цитування SCOPUS, 6 - статей у фахових наукових журналах, 1 - патент на корисну модель, 2 - в матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій.

Публікації повною мірою відображають зміст дисертації і її основні результати.

## **9. Зміст роботи**

У вступі описано актуальність дослідження, зв'язок роботи з науковими темами, сформульовані мета і завдання, робоча гіпотеза, об'єкт, предмет і методи дослідження, представлена наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, особистий внесок здобувача в одержанні наукових результатів дисертації, апробація результатів і публікації, структура і обсяг роботи.

У першому розділі представлено аналіз наукових публікацій, присвячених перспективам підвищення коефіцієнта корисної дії авіаційних двигунів застосуванням ущільнювальних покриттів. Встановлено ряд питань, які досліджені недостатньо або об'єм публікацій по яким обмежений.

На основі виявлених проблем і факторів, що їх обумовлюють, сформульовано мету і поставлені задачі дослідження, встановлені шляхи і методи їх розв'язання. Загальний обсяг аналізу наукових публікацій у дисертації не перевищує 20% від обсягу основної частини.

У другому розділі роботи наведено інформацію про технологію отримання і характеристику матеріалів та методи їх дослідження. Використано стандартні і спеціальні методики, зокрема, застосовано металографічні та рентгеноструктурні методи дослідження. Оцінку експлуатаційних властивостей проводили за результатами механічних та триботехнічних випробувань. Прогнозування

довговічності матеріалів та виробів з них проводили методами математичного моделювання.

**У третьому розділі** для досягнення поставленої мети розробки ущільнювальних покриттів, які легко припрацьовуються на початкових етапах експлуатації двигуна і здатні зберігати сформовану геометрію під впливом високотемпературного агресивного газового потоку, що викликає руйнування ущільнювального покриття внаслідок дії високотемпературної корозії та механічного зношування використовували три комбінації лігатур, що містять ітрій – з монокомпонентним ітрієм, подвійною композицією нікель-ітрій та зі складною системою Co-Ni-Cr-Al-Y. За базовий матеріал обрано покриття КНА-82, яке на сьогоднішній день застосовується в авіаційних двигунах виробництва АТ «Мотор Січ».

Високотемпературна витримка покриттів при температурі 1100°С впродовж 50 та 100 годин призвела до значних змін в їх структурі. На поверхні сформувалась однорідна структура, що ймовірно пов'язано з утворенням оксидної плівки на поверхні покриттів під час нагрівання і витримки.

За результатами дослідження мікроструктури покриттів, сформованих при газополуменовому нанесенні, більш придатним для використання у виробках з точки зору забезпечення експлуатаційних вимог є покриття складу КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y. Мікроструктура цього покриття характеризується рівномірним розташуванням та задовільною дисперсністю твердої фази. Поверхня має достатньо щільні оксидні плавки, які при механічному впливі руйнуються з утворенням дрібних ямок без порушення загальної цілісності покриття.

Встановлено, що вже під час нанесення в покриттях всіх складів формувались інтерметалідні та оксидні фази, які повинні сприяти підвищенню опору газовій корозії та зносостійкості покриттів.

За результатами аналізу високотемпературного впливу на експлуатаційні покриття виявлено наявність крім інтерметалідних та оксидних фаз, також шпінелі ( $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ ), що позитивно впливає на жаро- і зносостійкість та на ерозійну стійкість.

Встановлено, що введення ітрійвміщуючих лігатур до порошку КНА-82 зменшує різницю ТКЛР матеріалів основи і покриття.

Результати визначення тепло- та температуропровідності виявили тенденцію зниження цих параметрів при легуванні ітрійвміщуючими лігатурами внаслідок формування в об'ємі матеріалу додаткових фаз, що мають низькі характеристики тепло- та температуропровідності. Це свідчить про те, що отримати експлуатаційні покриття мають більш високі теплозахисні властивості і сприятимуть підвищенню експлуатаційної стійкості деталей статора у порівнянні з КНА-82.

**У четвертому розділі** встановлено, що неоднозначні вимоги до властивостей матеріалу ущільнювального покриття, щодо його припрацьовуваності і зносостійкості забезпечуються у два етапи – на першому покриття має низьку

твердість, в процесі прироблювання деталей статора і ротору ризик зносу деталей ротору є мінімальним, а подальше дія високої температури приводить до формування твердих інтерметалідних та оксидних фаз і, відповідно, до зростання твердості і зносостійкості покриттів.

Показано, що легування ущільнювального покриття на основі нікелю комплексною лігатурою Co-Ni-Cr-Al-Y дозволяє забезпечити задовільний рівень адгезійної взаємодії покриття з різними матеріалами основи.

В дослідженні використано нестандартну методику визначення зносостійкості покриттів із використанням додаткових параметрів оцінки триботехнічного та геометричного стану контактних з'єднань елементів роторно-статорної частини турбіни ГТД. Результатом її застосування на різних режимах триботехнічних випробувань найбільш задовільну показники зафіксовано для покриття на основі нікелю з комплексною лігатурою Co-Ni-Cr-Al-Y(№3).

За результатами досліджень жаростійкості встановлено, що найбільш сприятливі результати, щодо опору високотемпературній корозії демонструє також покриття №3, ймовірно, завдяки формуванню дисперсних включень термостійких шпінелей  $\text{NiCr}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CoAl}_2\text{O}_4$ . Присутність цих сполук у фазовому складі запропонованих покриттів має приводити до підвищення експлуатаційної надійності деталей ГТД у зв'язку із забезпеченням більш високої жаростійкості і адгезійної міцності зчеплення покриття з основою.

**У п'ятому розділі** проведена оцінка особливостей умов експлуатації газополумєневих покриттів, які наносять на лабіринті ущільнення.

Використання методу кінцевих елементів дозволило виявити особливості плинну газового потоку в лабіринтному ущільненні турбіни компресора і вільної турбіни ГТД сімейства ТВ3-117 та встановити залежність витрат газу через лабіринтне ущільнення від величини зазору. Виявлено, що застосування удосконалених покриттів КНА-82+Co-Ni-Cr-Al-Y в конструкції лабіринтних ущільнень турбіни, при середньому річному наробітку 800 годин, може забезпечити економію 184 т авіаційного палива.

Слід додати, що у наведеному вище огляді змісту дисертації відмічені результати, які на нашу думку є найбільш вагомими.

Погоджуючись з основними науковими положеннями, які винесені на захист, потрібно висловити наступні критичні зауваження.

## **10. Зауваження до дисертації та автореферату:**

1. У викладеній науковій новизні отриманих результатів вказано, що вперше отримано принципово нову сукупність триботехнічних та геометричних параметрів, що відображають якість формування контакту і прояв властивостей розроблених покриттів за результатами оцінки фрикційної взаємодії елементів натурального вузла газотурбінної установки з використанням модельного трибоз'єднання «рухомий диск з зубчатим профілем – нерухома пластина з покриттям». При цьому не враховано вплив агресивної дії високотемпературного газового потоку при роботі турбіни (див. п.3 новизни, стор. 25 та 26).

2. Ущільнювальні покриття наносили газополуменевим методом. Вони мають невисоку міцність зчеплення з основою не більш 25...30 МПа і пористість близько 8%. При цьому, не досліджено вплив пористості.

3. В роботі на стор.125 (рисунок 4.1.) наведено залежність мікротвердості покриттів від складу лігатур. Проте бажано було б на рисунку показати похибку вимірювання мікротвердості, оскільки для пористих покриттів є характерною наявність помітного розкиду її значень.

4. Не досліджена можливість наволакування (намазування) матеріалу ущільнювального покриття на гребінці. Відомо, що цей фактор впливає на величину зазору та працездатність ущільнення ротор-статор.

5. Досліджувалась жаростійкість покриттів в повітряній атмосфері печі при 1100 °С протягом 50 і 100 годин. Більш достовірні дані щодо жаростійкості покриттів звично отримують при випробуванні в робочій атмосфері, тобто в продуктах згоряння авіаційного палива.

6. Зауваження щодо оформлення та викладення матеріалу:

- розділ 1 містить елементи загальновідомої інформації, яка не потребує детального розгляду в аналітичному огляді дисертаційного дослідження (п. 1.2.2.);
- зустрічається термін «...газотермічному нанесенні...» (стор. 99) замість «газополуменевому нанесенні»;
- в тексті дисертаційної роботи зустрічається зайве слово «було» (стор. 99, 105, 113, 116, 117 та ін.).

## **11. Загальна оцінка дисертаційної роботи**

Вище наведені зауваження не є принциповими, а скоріше за все носять рекомендаційний характер про поліпшення викладання і оформлення матеріалу дисертації і напрямків подальшої «творчої» праці її автору.

У дисертації піднята надзвичайно актуальна і перспективна тема для авіаційної галузі України, яка стосується виробництва газотурбінних двигунів з високою експлуатаційною стійкістю та економними витратами авіаційного палива.

Розроблене автором нове рішення науково-технічного завдання удосконалення складу ущільнювальних покриттів, які можуть тривалий час експлуатуватися в умовах агресивного розігрітого газового потоку при підвищених температурах, забезпечує підвищення якості авіаційних газотурбінних двигунів та веде до зниження матеріальних витрат при їх експлуатації.

Із сказаного випливає, що розглянута дисертаційна робота у цілому заслуговує позитивної оцінки.

## **12. Загальні висновки**

Робота за темою «Удосконалення складу газотермічних ущільнювальних покриттів деталей турбіни для підвищення ефективності газотурбінних двигунів» є завершеною науковою працею. У якій отримані нові науково обґрунтовані і експлуатаційно підтверджені результати при виконанні актуального завдання

розробки хімічного складу ущільнювального покриття турбіни з високою експлуатаційною стійкістю в умовах дії високотемпературного газового потоку. Отримані результати у своїй сукупності дозволяють стверджувати, що знайдені рішення актуальної науково прикладної проблеми розробки складу ущільнювання покриттів авіаційних газотурбінних двигунів з тривалою експлуатаційною стійкістю.

Зміст автореферату ідентичний основним положенням дисертації. Основний зміст дисертаційної роботи з достатньою повнотою відображено в публікаціях автора у фахових наукових виданнях.

Дисертаційна робота відповідно до паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство відповідає переліку напрямів досліджень: п.1 «Розроблення методів дослідження й ущільнювання фізичних, хімічних, механічних властивостей матеріалів, показників якості та стійкових властивостей матеріалів залежно від їх призначення», п.5 «Механічні, технологічні і захисні покриття конструкторських та технологічних матеріалів».

Відповідно до пп. 9, 11, 13 «Порядку присудження наукових ступенів» дисертаційна робота «Удосконалення складу газотермічних ущільнювальних покриттів деталей турбіни для підвищення ефективності газотурбінних двигунів» відповідає вимогам, які пред'являються МОН України до дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а її автор – СОТНИКОВ Євгеній Георгійович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент, завідувач кафедри  
Матеріалознавства і технології металів  
Національного університету кораблебудування  
імені адмірала Макарова ( м. Миколаїв),  
заслужений працівник освіти України,  
докт. техн. наук, професор

О.М. Дубовий

Підпис Дубового О.М. засвідчую:  
проректор з НІР



С.О.Слободян