

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора Дворука Володимира Івановича на дисертаційну роботу Харченка Сергія Дмитровича «Методи підвищення зносостійкості деталей авіаційної техніки за рахунок використання детонаційних покриттів Cr-Si-B», поданої до захисту у спеціалізовану вчену раду Д 26.062.06 Національного авіаційного університету на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах, галузь знань 13 – механічна інженерія

### 1. Актуальність теми дисертації

В загальній проблемі підвищення довговічності авіаційної техніки, ресурс якої значною мірою визначається опором зношуванню деталей при сухому й граничному терті, важливе місце займають питання відновлення спрацьованих деталей.

При відновленні працездатності таких деталей можна значно підвищити їх зносостійкість шляхом нанесення покриттів на робочі поверхні. Так, наприклад, використання гальванічного покриття хрому сприяє підвищенню зносостійкості відновлених деталей при сухому й граничному терті в декілька разів. Однак технології гальванічного хромування притаманний ряд істотних недоліків, зокрема, забруднення доквілля та низька продуктивність, що спонукають виробників відмовлятися від неї. Альтернативою гальванічному хромуванню можуть бути газотермічні покриття з порошкових матеріалів на основі хрому, що нанесені детонаційно-газовим способом. Однак такі покриття виявились не працездатними через аномальну крихкість хрому. Тому розробку порошкових матеріалів на основі хрому для детонаційно-газового нанесення працездатних та ефективних, як з функціональної так і економічної точки зору, покриттів слід вважати важливим науковим і практичним завданням.

Вх. № 41/51.10  
Дата 22.05.2019

На розв'язання вказаного завдання спрямована подана дисертаційна робота, що зумовлює актуальність її теми.

## **2. Структура й зміст дисертації**

Дисертація складається з анотації українською і англійською мовою на 9 сторінках, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури із 135 найменувань на 11 сторінках та 3 додатків на 12 сторінках. Основний текст роботи викладено на 124 сторінках, включно з 35 рисунками та 11 таблицями. Загальний обсяг роботи складає 137 сторінок.

**Вступ** містить у собі основні, передбачені нормативними положеннями ДАК МОН України дані, що характеризують роботу, а саме: актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, мету дослідження, об'єкт дослідження, предмет дослідження, методи дослідження, наукову новизну одержаних результатів, практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, апробацію роботи, публікації, обсяг і структуру дисертації.

Недоліком вступу є загальний характер обґрунтування актуальності теми дисертації та відсутність в ньому інформації щодо необхідності створення детонаційно-газових покриттів з порошків на основі хрому Cr, що леговані кремнієм Si та бором B.

**У першому розділі** наведено результати статистичного аналізу відбракованих деталей авіаційної техніки на підприємствах України. Встановлено, що головною причиною відбракування є неприпустиме зношування вузлів тертя літальних апаратів. Відновлення їх можливе лише з використанням нових матеріалів та сучасних високопродуктивних технологій.

Проведено аналіз відомих теорій тертя та зношування, за результатами якого як теоретичну основу для створення нових зносостійких матеріалів обрано структурно-енергетичну теорію.

Показано, що найдоцільніший шлях вирішення проблеми відновлення зношених деталей авіаційної техніки – це застосування газотермічних покриттів з порошкових матеріалів, нанесених детонаційно-газовим способом.

Недоліком розділу є відсутність сформульованої мети і завдань дослідження за результатами розділу.

**У другому розділі** викладено методику дослідження та засоби випробувань.

Для вивчення якості зносостійких покриттів застосовано комплексний підхід, реалізація якого носить багаторівневий характер, що включає в себе фізико-механічний, металофізичний, фізико-технологічний та інформаційний рівні.

Об'єктом дослідження були покриття з порошків на основі хрому Cr, що леговані кремнієм Si та бором B і нанесені детонаційно-газовим способом. Дослідження склались в проведенні трибологічних випробувань покриттів і подальшому вивченні їх фазового та структурного стану, а також мікро- і макромеханічних властивостей із залученням сучасних фізико-хімічних та структурних методів аналізу.

Методом планування експерименту оптимізовано технологічний процес детонаційно-газового нанесення покриття системи Cr- Si- B.

**Третій розділ** присв'ячено вивченню тертя та зношування композиційних детонаційних покриттів в умовах відсутності мастила.

Встановлено, що збільшення швидкості ковзання в дослідженому діапазоні практично не впливає на інтенсивність зношування детонаційного покриття системи Cr- Si- B. Остання визначається як структурою покриття, що представляє собою мікродисперсну суміш тугоплавких сполук в пластичній матриці, так і властивостями вторинних структур, що представляють собою складноактивованій комплекс оксидів.

Встановлено, що збільшення навантаження в дослідженому діапазоні не чинить істотного впливу на інтенсивність зношування детонаційного покриття системи Cr- Si- В. Пояснюється це протіканням явища структурної пристосованості при терті, яке виражається в утворенні захисних гетерофазних тонкоплівкових вторинних структур за наявності динамічної рівноваги двох засадничих явищ – активування й пасивації. Такі структури забезпечують роботу покриття в режимі нормального механохімічного зношування.

Показано, що при підвищених температурах в зоні тертя вторинні структури переходять в стабільніший стан і за своїм стехіометричним складом являють собою дрібнодисперсну суміш оксидів компонентів складу покриття..

#### Зауваження до розділу:

1. Відсутність навантажувально-швидкісних залежностей коефіцієнту тертя покриттів в умовах сухого тертя, без чого аналіз вторинних структур є неповним.

2. Оскільки об'єкт дослідження – це трибологічні процеси, то замість терміну «знос», який використовує автор (див. стор.63,66 тощо), слід було б застосовувати термін «зношування».

3. Рис.3.8 фактично дублює рис.3.3 та 3.4. Теж саме стосується таблиць 3.2 та 3.3.

4. В табл.3.1 і на рис. 3.4 застосовано несистемні одиниці вимірювання інтенсивності зношування.

**У четвертому розділі** викладено результати дослідження тертя та зношування композиційних покриттів в умовах граничного мащення.

Встановлено, що при граничному терті внаслідок дисипації механічної енергії відбуваються зміни хімічного складу, структури й властивостей

поверхневого шару покриття. Вказані зміни регулюються дифузією хімічно активних елементів з мастильного середовища та сегрегацією легуючих елементів самого покриття. Вони сприяють суттєвому підвищенню термодинамічної стабільності поверхневого шару покриття, а, отже, зменшенню його вільної поверхневої енергії і повнішій реалізації сил міжатомних зв'язків. Це призводить до розширення діапазону структурної пристосованості покриття в умовах тертя.

Досліджено трибологічні процеси детонаційного покриття системи Cr-Si-В при граничному терті в умовах мащення вазеліновою оливою, вазеліновою оливою з додаванням 2% олеїнової кислоти, а також мінеральною оливою МС-20. Встановлено, що поверхнево-активні елементи обумовлюють прояв ефектів Ребіндера і визначають механізм зношування покриття.

Вивчено вплив елементоорганічних присадок в оливі МС-20 на трибологічні процеси покриття системи Cr-Si-В при граничному терті. Показано, що найбільший протизносний ефект забезпечують сірковмісні та хлорвмісні присадки за рахунок створення захисних вторинних структур на поверхні тертя. Фосфорвмісна присадка ефективна при невисоких швидкісно-навантажувальних режимах.

#### Зауваження до розділу:

1. З рис. 4.1 випливає, що при навантаженнях, які перевищують 10 МПа спостерігається інверсія зв'язку між інтенсивністю зношування (рис. 4.1 а) і коефіцієнтом тертя (рис. 4.1 б). Однак цей факт залишився поза увагою автора і не отримав належного пояснення.

2. На стор. 95 відмічається, що фосфорвмісна присадка ефективна при високих навантажувально-швидкісних режимах, в той час як у висновках з розділу 4 (стор. 99, висновок 2) констатовано її ефективність для легконавантажених пар тертя, що суперечить попередній точці зору.

У п'ятому розділі наведено результати дослідження сумісності покриття системи Cr- Si-B в парі з антифрикційними та конструктивними матеріалами при терті.

Проаналізовано вплив швидкості і навантаження при терті ковзання на інтенсивність зношування покриття системи Cr-Si-B, а також конструкційних сталей в парі з антифрикційними та конструкційними матеріалами. Встановлено, що нормалізація процесів тертя та зношування є наслідком здатності покриття спонтанно утворювати стійкі впорядковані дисипативні структури, які являють собою складноактивованій комплекс сполук типу шпінелі на основі оксидів металів трибоелементів і за своєю будовою подібні до дисперсно-зміцненого композиційного матеріалу.

#### Зауваження до розділу:

1. На швидкісних залежностях зношування (рис. 5.1) відсутня інформація щодо пари тертя покриття Cr-Si-B – бронза. Тому не зрозуміло звідки випливає твердження автора про «нижчу інтенсивність зношування покриття в парі з алюмінієвою бронзою у всьому діапазоні швидкостей ковзання» (стор. 103).

2. При викладенні результатів структурного й фізичного дослідження покриття (рис. 5.2 – 5.6, рис. 5.8) не вказано матеріал контртіла.

3. Не зрозуміло на підставі яких результатів дослідження зроблено висновок 2 даного розділу (стор. 110).

**Висновки** дисертаційної роботи ґрунтуються на аналізі одержаних результатів. Вони наведені в кінці кожного розділу та в узагальненому вигляді в заключній частині дисертації.

**Список використаної літератури** налічує 135 найменувань, що засвідчує ґрунтовне опанування автором дисертації наявної інформації з обраної тематики, вміння користуватись нею, аналізувати й узагальнювати її.

**В додатках** наведено інформацію щодо впровадження одержаних результатів в ТОВ «Челендж аеропорт», технологічної інструкції на спеціальний процес «Відновлення зношених деталей авіаційної техніки детонаційним нанесенням покриттів Cr-Si-B», а також наукових праць, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації, які засвідчують її апробацію і які додатково відображають наукові результати дисертації.

Недоліком додатків є відсутність інформації щодо патенту на покриття Cr-Si-B.

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

Положення, що характеризують наукову новизну одержаних результатів полягають у такому:

3.1. *Вперше* визначено структурно-фазовий склад покриття системи Cr-Si-B, а також його фізико-механічні та трибологічні властивості при сухому й граничному терті, що відкриває можливість застосування вказаного покриття як альтернативи закордонним аналогам.

3.2. *Вперше* вивчено закономірності зношування покриття системи Cr-Si-B при сухому терті, що дозволило встановити закономірності трибофізичних процесів утворення вторинних структур в зоні контакту.

3.3. *Вперше* вивчено триботехнічні закономірності покриття системи Cr-Si-B в умовах граничного мащення, що дозволило визначити роль трибохімічних явищ у формуванні працездатних модифікованих шарів.

3.4. *Вперше* досліджено сумісність покриття системи Cr-Si-B з широким спектром антифрикційних і конструкційних матеріалів, в результаті чого встановлено області їх практичного застосування для захисту вузлів тертя від зносу.

Недоліком наукової новизни одержаних результатів є те, що «розвиток методу дослідження трибостійкості покриттів» (див. положення 2) не

відноситься до результату, що містить у собі наукову новизну. Тому вказане наукове положення точніше було б сформулювати у такій редакції: «Вперше вивчено закономірності зношування покриття системи Cr- Si- В при сухому терті, що дозволило встановити закономірності трибо 'фізичних процесів утворення вторинних структур в зоні контакту».

#### **4. Практичне значення одержаних результатів.**

4.1. Розроблено нове детонаційно-газове покриття системи Cr- Si- В з покращеними триботехнічними властивостями для зміцнення й відновлення тертьових деталей машин.

4.2. Розроблено технологічний процес нанесення покриттів системи Cr- Si- В, складові якого не є дефіцитними в ресурсно-сировинній базі України.

4.3. Розроблено рекомендації щодо практичного застосування детонаційно-газового покриття системи Cr- Si- В, які забезпечують його високу зносостійкість, а також оптимальний вибір пар тертя з урахуванням умов експлуатації.

#### **5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій**

На основі одержаних результатів в дисертаційній роботі сформульовано наукові положення, висновки та рекомендації, що дозволили підвищити зносостійкість деталей авіаційної техніки за рахунок використання покриттів Cr-Si-B.

Обґрунтування вказаних наукових положень, висновків та рекомендацій проведено із застосуванням сучасних теоретичних та експериментальних методів дослідження.

До теоретичних досліджень залучено основні положення трибології й триботехнічного матеріалознавства.

Експериментальні лабораторні дослідження проведено з використанням апробованих методик і обладнання для нанесення



детонаційних покриттів, сучасних фізико-хімічних і структурних методів аналізу покриттів, а також засобів випробувань із залученням теорії планування експерименту.

Встановлено відповідність між теоретичними й експериментальними результатами, отриманими в дисертаційній роботі.

Таким чином, матеріали дисертації підтверджують обґрунтованість сформульованих в ній наукових положень, висновків та рекомендацій.

#### **6. Достовірність та новизна висновків і рекомендацій**

Розв'язання завдань, що поставлені в дисертаційній роботі спирається на:

1. Теоретичне обґрунтування завдання.
2. Сучасні теоретичні та експериментальні методи дослідження.
3. Стандартні комп'ютерні програми для обробки й аналізу результатів дослідження.
4. Позитивні результати лабораторних випробувань.

Це свідчить про достовірність представлених в дисертації висновків і рекомендацій, що мають наукову новизну, оскільки вони є складовими нового розв'язання актуального науково-практичного завдання з підвищення зносостійкості деталей авіаційної техніки за рахунок використання покриттів Cr-Si-B. Елемент цього розв'язання захищено патентом України.

#### **7. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях**

За темою дисертації опубліковано 16 наукових праць, у тому числі: 6 статей у фахових виданнях переліку МОН України, 2 статті у виданнях, що входять до міжнародних науко-метричних баз, 1 стаття у закордонному періодичному виданні, що входить до НМБ Scopus, 6 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях; 1 патент України.

Це свідчить про повноту викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Автореферат дисертації за викладом та змістом відповідає дисертаційній роботі, а також вимогам ДАК України.

## 8. Зауваження по дисертації й автореферату

За змістом дисертації й автореферату можна зробити такі зауваження:

Вступ:

Загальний характер обґрунтування актуальності теми дисертації та відсутність в ньому інформації щодо необхідності створення детонаційно-газових покриттів з порошків на основі хрому Cr, що леговані кремнієм Si та бором B.

1. Розділ 1:

Відсутність сформульованих мети і завдань дослідження за результатами розділу.

3. Розділ 3:

3.1. Відсутність навантажувально-швидкісних залежностей коефіцієнту тертя покриттів в умовах сухого тертя, без чого аналіз вторинних структур є неповним.

3.2. Оскільки об'єкт дослідження – це трибологічні процеси, то замість терміну «знос», який використовує автор (див. стор.63,66 тощо), слід було б застосовувати термін «зношування».

3.3. Рис.3.8 фактично дублює рис.3.3 та 3.4. Теж саме стосується таблиць 3.2 та 3.3.

3.4. В табл.3.1 і на рис. 3.4 застосовано несистемні одиниці вимірювання інтенсивності зношування.

4. Розділ 4:

4.1. З рис. 4.1 випливає, що при навантаженнях, які перевищують 10 МПа спостерігається інверсія зв'язку між інтенсивністю зношування (рис. 4.1 а) і коефіцієнтом тертя (рис. 4.1 б). Однак цей факт залишився поза увагою автора і не отримав належного пояснення.

4.2. На стор. 95 відмічається, що фосфоровмісна присадка ефективна при високих навантажувально-швидкісних режимах, в той час як у висновках з розділу 4 (стор. 99, висновок 2) констатовано її ефективність для легконавантажених пар тертя, що суперечить попередній точці зору

## 5. Розділ 5

5.1. На швидкісних залежностях зношування (рис. 5.1) відсутня інформація щодо пари тертя покриття Cr-Si-B – бронза. Тому не зрозуміло звідки випливає твердження автора про «нижчу інтенсивність зношування покриття в парі з алюмінієвою бронзою у всьому діапазоні швидкостей ковзання» (стор. 103).

5.2. При викладенні результатів структурного й фізичного дослідження покриття (рис. 5.2 – 5.6, рис. 5.8) не вказано матеріал контртіла.

5.3. Не зрозуміло на підставі яких результатів дослідження зроблено висновок 2 даного розділу (стор. 110).

6. Недоліком наукової новизни одержаних результатів є те, що «розвиток методу дослідження трибостійкості покриттів» (див. положення 2) не відноситься до результату, що містить у собі наукову новизну. Тому вказане наукове положення точніше було б сформулювати у такій редакції: «Вперше вивчено закономірності зношування покриття системи Cr- Si- B при сухому терті, що дозволило встановити закономірності трибо фізичних процесів утворення вторинних структур в зоні контакту».

## 9. Загальний висновок по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Харченка Сергія Дмитровича «Методи підвищення зносостійкості деталей авіаційної техніки за рахунок використання детонаційних покриттів Cr-Si-B» актуальна за темою, має наукову новизну і практичне значення. Одержані нові науково-обгрунтовані теоретичні та експериментальні результати підтверджують перспективність застосування детонаційно-газових покриттів системи Cr-Si-B для підвищення

зносостійкості деталей авіаційної техніки. Дослідження спирається на базові положення трибології й триботехнічного матеріалознавства, що засвідчує належну фахову підготовку здобувача і його спроможність розв'язувати складні науково-практичні завдання. Напрямок проведеного дослідження відповідає паспорту спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Основні положення та результати роботи опубліковано у фахових вітчизняних та закордонних виданнях, що входять до міжнародних науково-метричних баз даних й апробовано на наукових конференціях. Автореферат дисертації за викладенням та змістом відповідає дисертаційній роботі.

Таким чином, дисертація Харченка Сергія Дмитровича «Методи підвищення зносостійкості деталей авіаційної техніки за рахунок використання детонаційних покриттів Cr-Si-B» є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на підставі особисто виконаних здобувачем досліджень отримано нові теоретичні й експериментальні результати, що дозволили розв'язати актуальне науково-практичне завдання з підвищення зносостійкості деталей авіаційної техніки за рахунок використання детонаційних покриттів Cr-Si-B. Вона відповідає вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій згідно п.п. 9,11,12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету міністрів України від 24 липня 2013 р. №567, а її автор Харченко Сергій Дмитрович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04. – тертя та зношування в машинах, галузь знань 13 – механічна інженерія.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор, професор

кафедри загальної та прикладної фізики

Національного авіаційного університету



*(Handwritten signature)*

Дворук В.І.