

**НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

ХАРЧЕНКО Сергій Дмитрович

УДК 621.891

**МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ
АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ
ДЕТОНАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ Cr-Si-B**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Галузь знань 13 – механічна інженерія

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті та Інституті технічної теплофізики НАН України, м. Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Щепетов Віталій Володимирович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
провідний науковий співробітник відділу моніторингу та
оптимізації теплофізичних процесів, м. Київ

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дворук Володимир Іванович
Національний авіаційний університет,
професор кафедри теоретичної та
прикладної фізики, м. Київ

кандидат технічних наук, доцент
Куш Олексій Іванович
Національний транспортний університет,
доцент кафедри виробництва, ремонту та
матеріалознавства, м. Київ

Захист відбудеться „6” червня 2019 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 у Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ, пр. Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, пр. Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий „30” квітня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к.т.н., с.н.с.



Корчук О.Ю.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Технології нанесення покриттів, у яких використовуються порошкові матеріали, відкривають шлях вирішення проблеми підвищення надійності і довговічності тертьових сполучень деталей машин і механізмів.

Одним із сучасних перспективних технологічних методів, що дозволяє одержувати високоякісні покриття нанесенням порошкоподібного матеріалу, є детонаційно-газове напilenня.

Однак, відсутність необхідного асортименту, кількості і якості порошоків для зносостійких покриттів перешкоджає широкому практичному застосуванню детонаційного методу та обумовлює необхідність проведення дослідних робіт, що ставлять за мету розробку ефективних порошкових матеріалів, які не містять дефіцитних і дорогих компонентів, зокрема, таких як вольфрам, кобальт, нікель і ін. Втім, широке застосування зносостійких детонаційних покриттів неможливе без усебічного дослідження їхніх властивостей.

Наявність великої кількості конструкційних вузлів тертя, різноманіття і специфіка їхньої експлуатації не дозволяють створити універсальне покриття або ряд покриттів, здатних вирішувати всі існуючі проблеми в машинобудуванні. Це призводить до того, що створення і дослідження детонаційних покриттів, що характеризуються високими триботехнічними властивостями, представляє сьогодні складну самостійну наукову проблему, пов'язану з розвитком загального системного підходу до підвищення зносостійкості покриттів у різних умовах тертя. Роботи в цьому напрямі є актуальними і перспективними як з точки зору прикладних досліджень, так і в напрямку вирішення задач теоретичного характеру.

За даним напрямом значних теоретичних та практичних результатів досягли такі видатні вітчизняні вчені: Б.І. Костецький, Л.І.Бершадський, І.Г.Носовський, М.В.Кіндрачук, Р.Г.Мнацаканов, В.Ф.Лабунець, В.І.Дворук. Також вагомий внесок в розвиток сучасної трибології зробили Д.М.Гаркунок, М.О.Буше, В.П.Боуден, Д.Тейбор та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація відповідає основним науковим напрямам фундаментальних досліджень у галузі природничих наук НАН України на 2015-2019 рр. і виконана в рамках тем відомчого замовлення НАН України: „Наукові підходи і технології підвищення зносостійкості та довговічності важконавантажених конструкційних елементів при циклічному контактному навантаженні” (2015-2017 рр., номер держреєстрації 0115U000226); „Наукові основи підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструкційних елементів з покриттями при терті кочення” (2017-2019 рр., номер держреєстрації 0117U001167).

Мета дослідження. Встановлення закономірностей тертя та зношування покриттів з композиційних порошоків в парах тертя з вольфрамвмісними покриттями, сталями, бронзами при відсутності мастильного матеріалу та в умовах граничного режиму мащення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні **завдання**:

1. Розробити оптимальні технологічні параметри детонаційно-газового напилення композиційних порошків системи Cr-Si-B.

2. Дослідити параметри тертя і зношування композиційних покриттів при відсутності мастильного матеріалу та їх вплив на діапазони прояву нормального механохімічного зношування в умовах зміни навантажувально-швидкісних і температурних режимів випробування.

3. Вивчити вплив трибохімічних процесів в умовах граничного мащення на явище структурної пристосованості при терті композиційних покриттів.

4. Встановити предметні сфери застосування досліджуваних покриттів із композиційних порошків для умов роботи в повітряному середовищі за відсутності та за наявності мастильних матеріалів.

Об'єкт дослідження – процеси трансформування вторинних структур, що визначають трибостійкість покриттів.

Предмет дослідження – закономірності формування зносостійких поверхневих структур покриттів системи Cr-Si-B при навантаженні тертям.

Методи дослідження. Проведені дослідження базуються на сучасних фізико-хімічних методах аналізу мікро- і макроструктур, основних положеннях триботехнічного матеріалознавства, математичного моделювання з урахуванням експлуатаційних і технологічних факторів, з позиції структурно-енергетичної теорії тертя.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше визначено структурно-фазовий склад розроблених покриттів, їхні міцнісні і фізико-механічні властивості та вплив на опір зносу в різних умовах експлуатації, що відкриває можливість його застосування в якості конкурентноздатного матеріалу закордонним аналогам.

2. Набув подальшого розвитку метод дослідження трибостійкості покриттів за відсутності мастильних матеріалів, що дозволило встановити закономірності протікання трибофізичних процесів утворення захисних поверхневих шарів вторинних структур у контактній зоні.

3. Вперше вивчено закономірності зношування покриттів системи Cr-Si-B в умовах граничного мащення, що дозволило визначити роль трибохімічних явищ у формуванні модифікованих шарів з високими зносостійкими властивостями.

4. Вперше досліджені питання сумісності розроблених покриттів із широким спектром антифрикційних і конструкційних матеріалів, в результаті чого встановлені області оптимального практичного їхнього використання для захисту вузлів тертя від зносу.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено композиційне покриття системи Cr-Si-B, напилене детонаційно-газовим методом, з підвищеними триботехнічними характеристиками для поверхневого зміцнення та відновлення вузлів і деталей, працюючих в умовах тертя (Акт впровадження результатів науково-дослідної роботи від 25.11.2016р.).

Розроблена технологія нанесення композиційних порошкових матеріалів системи Cr-Si-B, отриманих на основі ресурсно-сировинної бази країни.

Розроблено рекомендації щодо практичного застосування детонаційних покриттів, які характеризуються низькою вартістю та недефіцитністю компонентів. Встановлені та рекомендовані діапазони швидкості, навантаження, температури, які дозволяють реалізувати високу зносостійкість покриттів, підібрати оптимальні пари тертя для конкретних умов експлуатації.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові й теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, одержані здобувачем особисто. Без співавторів опубліковано наукові праці – [1].

З наукових праць, опублікованих у співавторстві, використовуються результати, отримані особисто здобувачем, а саме: визначена інтенсивність зношування контактних поверхонь в умовах граничного тертя – [2]; встановлено закономірності сумісності покриттів Cr-Si-B з триботехнічними матеріалами – [3]; досліджено формування поверхневого шару покриттів – [4]; досліджено вплив присадки на адсорбційну активність оливи в трибоконтакті – [5]; встановлено закономірності зношування покриттів при відсутності мастильного матеріалу в умовах підвищених навантажень – [6]; визначена інтенсивність зношування пар тертя в умовах високих температур – [7]; розроблено математичну модель формування детонаційних покриттів – [8]; встановлено опір зносу покриттів в екстремальних режимах тертя – [9]. Здобувач приймав участь у розробці досліджуваного матеріалу, а саме визначення оптимального вмісту компонентів в запропонованому композиційному матеріалі – [16].

Формулювання теми, постановка задач, вибір об'єктів дослідження, обговорення отриманих результатів виконувались сумісно з науковим керівником.

Апробація роботи. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на науково-технічних конференціях і семінарах, у тому числі: 3-ій Міжнародній науково-технічній конференції „HighMatTech” (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції „Сучасні проблеми машинознавства” (м. Київ, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції „Авіа-2013” (м. Київ, 2013 р.); 8-ій Міжнародній конференції „Матеріали і покриття в екстремальних умовах: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий” (м. Київ, 2014 р.); Конгрес „Авіація у XXI столітті” (м. Київ, 2014 р.); 5-ій Міжнародній науково-технічній конференції „HighMatTech” (м. Київ, 2015 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження викладено в 16 наукових працях, у тому числі: 6 статей у фахових виданнях переліку МОН України, 3 статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз; 6 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях; 1 патент.

Обсяг і структура дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел зі 135 найменувань та 3 додатків. Робота викладена на 135 сторінках, в тому числі містить 35 рисунки та 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, відображено наукову новизну отриманих результатів, їхню практичну цінність; наведено інформацію про апробацію результатів досліджень, а також зміст роботи та структуру дисертації, публікації, в яких відображено основні результати дисертаційного дослідження.

У першому розділі наведено критичний аналіз літературних даних щодо проблем зносостійкості при експлуатації та ремонті деталей авіаційної техніки. Проаналізовано основні поняття про механізм тертя і зношування та формування покриттів із композиційних порошкових матеріалів. Обґрунтовано мету та завдання дослідження.

Встановлено, що попри широке і детальне висвітлення питань конструювання, принципів дії агрегатів і систем літальних апаратів, двигунів та їх агрегатів, не в значній мірі розглянуті причини і ознаки появи експлуатаційних несправностей в них, пов'язаних зі зношуванням.

Статистичні дані розподілу кількості відбракованих деталей в залежності від характеру несправності, отримані на підставі аналізу звітів авіапідприємств, представлені на рис 1.

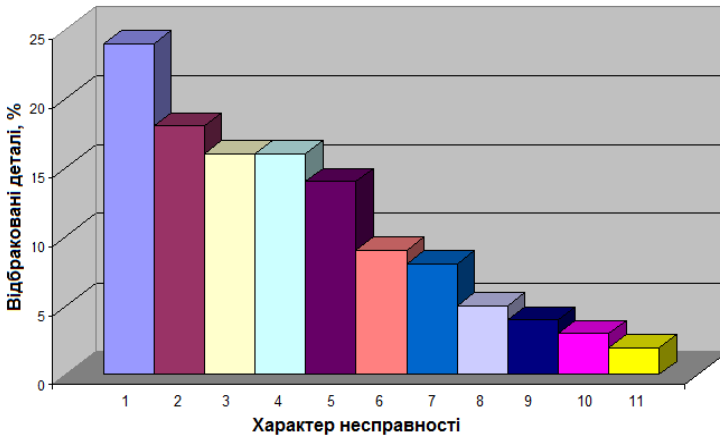


Рис. 1. Статистичні дані розподілу кількості відбракованих деталей в залежності від характеру експлуатаційної несправності: 1 – підвищене зношування, збільшення зазорів; 2 – вм'ятини, деформації; 3 – тріщини; 4 – руйнування поверхні; 5 – перегрів, прогар; 6 – заміна конструкції; 7 – невідповідність ваговому методу; 8 – зрив різьби; 9 – корозія; 10 – відпрацювання ресурсу; 11 – пошкодження при демонтажі

З наведеної діаграми випливає, що в процесі експлуатації діють як мінімум три основних фактори, в результаті яких значно зменшується ресурс. Це, перш за все, зношування, яке підвищує ймовірність захоплення, небезпеку витікання паливно-мастильних матеріалів та гідравлічних рідин, знижує керованість і безпеку. По-друге, порушення регулювання внаслідок вібрації і зношування ущільнювачів

монтажних місць та нерухомих сполучень. По-третє, розвиток контактних втомних пошкоджень, що призводять до руйнування робочих поверхонь в результаті багаторазової дії навантаження при одночасному проковзуванні сполучених поверхонь.

Через зношування знімаються з експлуатації відповідальні деталі, виготовлені із дефіцитних високоартисних матеріалів, і відновлення, повернення їм необхідних експлуатаційних властивостей є важливою виробничою задачею авіаремонтних підприємств. До переліку основних деталей, які відбраковуються, відносяться деталі та агрегати авіаційного двигуна Д-36, ТГ-16, РУ-19, зокрема: шестерня приводу маслонасоса, шестерня приводу гідронасоса, шестерня приводу повітряного стартера, вал ротора вентилятора, шестерні паливних агрегатів, шестерня приводу центробіжного суфлера, вал ротора компресора низького тиску, вал передній та проміжний (рис.2).



Рис. 2. Деталі агрегатів двигуна Д-36: *а* – шестерня приводу маслонасоса; *б* – шестерня приводу гідронасоса

Отже, не зважаючи на особливості конструкції вузлів тертя систем літальних апаратів і двигунів, технологію їх виробництва та ремонту, характер експлуатації та специфіку несправності, питанням керування їхньою поверхневою міцністю, забезпечення умов розвитку процесів нормального тертя до останнього часу приділялась недостатня увага. Одним із напрямів вирішення даної проблеми є застосування ефективних та недорогих композиційних порошкових матеріалів, а також використання ефективного методу їх нанесення.

У другому розділі описано методики виготовлення та нанесення на поверхню зразків порошкових композиційних матеріалів. При цьому підкреслено, що технологічний процес напилення композиційних покриттів дає можливість отримати не тільки бажаний хімічний склад, але й реалізувати при напиленні необхідний структурно-фазовий склад, та заданий комплекс властивостей, потенційно закладених матеріалом порошків і реалізований механохімічним синтезом.

Дослідження якості поверхневих шарів, в яких проходять процеси активації при навантаженні тертям, що обумовлюють інтенсивність механохімічних процесів, здійснено шляхом застосування комплексної методики фізико-хімічного аналізу.

Проведено випробування розроблених композиційних покриттів за програмою, яка включає визначення триботехнічних параметрів в залежності від

змін швидкості ковзання, навантаження та температури. За аналогічними програмами досліджено покриття, напилені вольфрамівмісними порошками типу ВК та легованими порошками ніхрому.

При дослідженні механізму зношування та закономірностей тертя детонаційних покриттів проведено випробування за відсутності мастильного матеріалу, а також в умовах граничного режиму мащення. В якості мастильного матеріалу використовувалась мінеральна олива МС-20.

Порошки для формування покриття системи Cr-Si-B отримували методом механохімічного легування, оскільки серед технологічних методів отримання порошкових матеріалів обґрунтовано вибрано даний метод, який має найменше обмеження по складу використовуваних композицій. Продуктом процесу є композиційний порошок, який складається з однорідної суміші всіх складових компонентів.

Детонаційне напилення композиційного матеріалу системи Cr-Si-B проведено на модернізованій установці „Днепр-3”, товщина покриття становить 0,11 – 0,20 мм.

Для проведення випробувань матеріалів покриття системи Cr-Si-B на тертя та зношування використано універсальну машину тертя УМТ-1. Випробування проводили по торцевій схемі кільцевих зразків, яка забезпечує $K_{вз} \approx 1$.

Досліди проведено з використанням комплексної методики, що складається з методів визначення зносостійкості, фазового і структурного стану покриттів, мікромеханічних властивостей покриттів, міцнісних характеристик.

Металографічні дослідження зразків виконано на оптичному металографічному мікроскопі МИМ-8. Вимірювання мікротвердості проводилось на мікротвердомірі ПМТ-3 (навантаження 0,5Н) вдавлюванням алмазного індентора. Мікротвердість характеризує опір пластичному вдавлюванню в поверхню твердого індентора, що є важливою характеристикою зміни властивості поверхневих шарів при терті.

При дослідженні детонаційних покриттів із композиційних порошкових матеріалів була реалізована програма, яка включає в себе дослідження їх триботехнічних властивостей з використанням фізико-хімічних і структурних методів дослідження.

Структурні дослідження кристалічної структури покриття методом дифракції електронів проводились на електронографі ЕРМ - 100 (знімання на відображення при нарузі 100 кВ).

Визначення хімічного складу поверхні зразків, а також різних фаз, включень та недосконалостей покриття проводились за допомогою методу мікрорентгеноспектрального аналізу на мікроаналізаторі Самеса, рентгенівському дифрактометрі ДРОН-УМ1. Використання даних методів дозволяє аналізувати дуже дрібні зерна детонаційних покриттів, виключаючи вплив сторонніх мікрочлених на отриману інформацію про склад великих фаз, а також дослідити ступінь хімічної неоднорідності речовини та тонких сполучень різних фаз й кількісного розподілу хімічних елементів в них.

Розроблено математичну модель впливу технологічних і експлуатаційних факторів на формування та якість детонаційних покриттів.

$$I_n = 5,44444 + 1,79111x_2 + 1,08254z_2 + 0,956x_1 + 0,64222z_1 - 0,816x_1x_2 - 0,56x_1z_2 - 0,551804z_1z_2 - 0,282222u_2 + 0,432x_1u_2 \quad (1)$$

$$x_1 = 0,0166667*(X_1 - 240); \quad z_1 = 1,71429*(x_1^2 - 0,416667);$$

$$x_2 = 0,05*(X_2 - 45); \quad z_2 = 2*(x_2^2 - 0,5); \quad u_2 = 3,33333*(x_2^3 - 0,85*x_2).$$

де x_1, x_2 - ортогональний контраст першого порядку незалежних змінних в кодovаних значеннях; z_1, z_2 - ортогональний контраст другого порядку незалежних змінних в кодovаних значеннях; u_2 - ортогональний контраст третього порядку незалежних змінних в кодovаних значеннях.

Для оцінки адекватного впливу технологічних та експлуатаційних факторів проведено серію експериментів, в результаті яких визначені найбільш значимі фактори та рівні їх варіювання, які прийняті після формалізації.

Експерименти проведені за планом повного факторного експерименту $5^1 \times 9^{1//45}$. Побудова лінійної за параметрами регресійної моделі виконана за допомогою програмного засобу ПРІАМ (планування, регресія і аналіз моделей) з автоматичним формуванням структури моделі. Модель формувалась на основі поліномів Чебишева для забезпечення структурної і обчислювальної стійкості.

Статистична перевірка отриманих залежностей показала значимість їх коефіцієнтів, адекватність і інформаційність моделі, відтворюваність результатів.

Для аналізу впливу кожного із регульованих факторів на досліджувану функцію побудовані оптимальні залежності (рис. 3). Проаналізовано, що найбільший вплив на якість напилюваних покриттів має витрата детонаційної суміші (W).

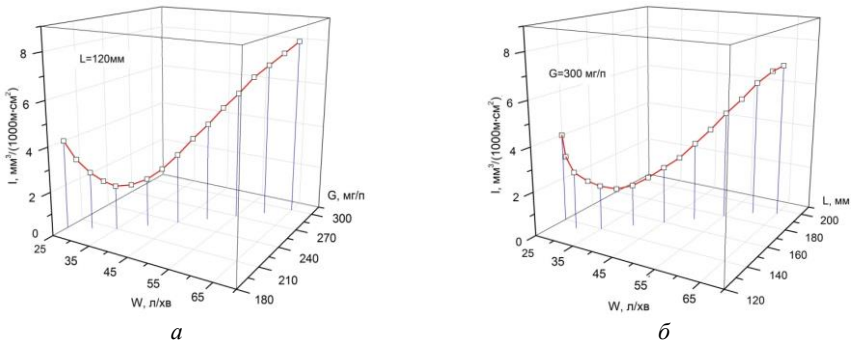


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування покриттів Cr-Si-B від витрати детонаційної суміші при зміні подачі порошку за один цикл (а) і дистанції напилення (б)

Таким чином, мінімальними показниками інтенсивності зношування характеризуються покриття, нанесені при сумарній витраті робочої суміші 30-40 л/хв. , подачі порошку 190-229 мг/п та дистанції напилення 130-150 мм .

Викладене інформаційне забезпечення використано при подальших експериментальних дослідженнях.

У **третьому розділі** наведено результати дослідження тертя та зношування композиційних покриттів в умовах відсутності мастильного матеріалу. На робочі поверхні зразків зі сталі 45 (після гартування і відпуску; структура – сорбіт-троостит) напиляли детонаційно-газовим методом композиційні порошки системи Cr-Si-B, товщина покриття 0,11 – 0,22мм.

При дослідженнях детонаційних покриттів реалізована програма, яка включає дослідження триботехнічних властивостей від декількох факторів – швидкості, навантаження, температури. В ході опрацювання отриманих результатів встановлено, що характеристика металевих фаз напиленого шару, а також отримання вторинних структур з певними властивостями суттєво залежать від хімічного складу початкового матеріалу. Спочатку експериментальним шляхом визначали оптимальний відсотковий вміст Si в системі, для цього на основу напиляли композиційний матеріал Cr-Si з різним відсотковим вмістом Si, після чого визначали мікротвердість отриманих покриттів (рис.4).

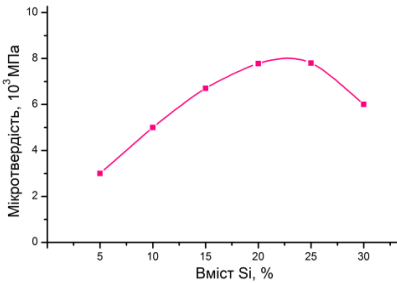


Рис. 4. Характер зміни мікротвердості в залежності від вмісту Si

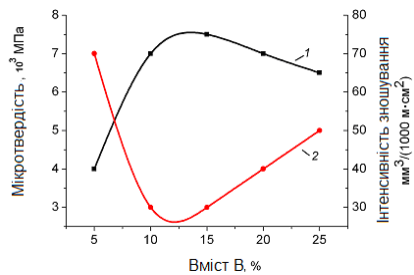


Рис. 5. Залежність мікротвердості (1) і інтенсивності зношування (2) покриття від вмісту B

Після визначення оптимального вмісту Si (25%), проведено легування B, з подальшим визначенням його оптимального вмісту в залежності від інтенсивності зношування і мікротвердості.

Як видно з графіків на рис. 5, введення бору в склад композиційного порошку значно покращує фізико-механічні властивості покриттів (зміна фізико-механічних властивостей покриттів наведено в табл.1). Це пояснюється формуванням при нанесенні покриттів тугоплавких боридних фаз типу: CrB, Cr₂B, Cr₃B₄, CrB₂. Взаємодія хрому і кремнію призводить до утворення твердих зносостійких силіцидів хрому CrSi, Cr₂Si₃, CrSi₂. В результаті рентгеноструктурного аналізу виявлено наявність твердих розчинів бору в хромі і кремнії, а також твердих розчинів кремнію в хромі.

Таким чином, бориди і силіциди, які представляють собою дисперсні частинки, протидіють процесам пластичної деформації. Окрім того, вони частково розчиняються в хромі і підвищують енергію зв'язку в атомах, що входять в твердий розчин. Все це сприяє підвищенню зносостійкості покриттів, навантажених тертям.

При дослідженні зносостійкості композиційних детонаційних покриттів для порівняння в таких же умовах і за аналогічними програмами досліджено зразки з детонаційними покриттями із порошку вольфрамового сплаву ВК-15 і на основі ніхром, додатково легованих алюмінієм і бором.

Таблиця 1

Зміна фізико-механічних властивостей покриттів

Покриття	Товщина, мм	Поріг міцності до руйнування, ГПа	Міцність зчеплення з основою, МПа	Мікротвердість, ГПа
Cr-Si	0,11–0,20	0,65–0,78	50–83	7,0–7,7
Cr-Si-B	0,11–0,20	0,79–0,87	74–92	7,5–7,9

Визначено фундаментальну залежність інтенсивності зношування від швидкості, графіки якої представлені на рис. 6. Дослідження проводились при навантаженні $P=5,0$ МПа. Найменші значення інтенсивності зношування характерні для детонаційних покриттів на основі Cr-Si-B і твердого сплаву ВК-15, для яких в усьому діапазоні швидкостей ковзання спостерігається режим нормального механохімічного зношування, що характеризується малими величинами зношування і низьким коефіцієнтом тертя.

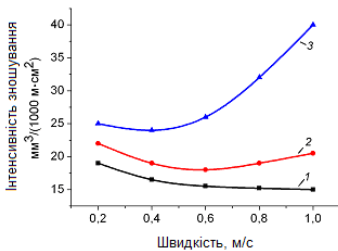


Рис. 6. Залежність інтенсивності зношування покриттів від швидкості: 1 – ВК-15; 2 – Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Al-B



а



б

Рис. 7. Мікрофотографії поверхонь тертя покриттів Cr-Si-B в парах тертя зі зразками сталі 45 при швидкості ковзання: а – 0,6 м/с; б – 1,0 м/с (x320)

Встановлено, що збільшення швидкості не впливає суттєво на інтенсивність зношування покриттів Cr-Si-B. Поверхні тертя не мають значних пошкоджень, на них видно сліди лише направленої пластичної деформації без явних проявів схоплювання (рис. 7).

Залежність інтенсивності зношування від навантаження зображено на рис. 8. Досліди проводились при $V=0,5$ м/с.

Аналіз експериментальних даних показав, що характерним є незначне збільшення зношування з ростом навантаження. Підвищення питомого навантаження обумовлює збільшення фактичної площі контакту, інтенсифікацію молекулярної взаємодії поверхонь, при цьому інтенсивність зношування частково зростає.

Так, інтенсивність зношування покриття Ni-Cr-Al-B при збільшенні навантаження до 8 МПа практично не росте. Подальше збільшення навантаження обумовлює більш рівномірне збільшення інтенсивності зношування, що по суті пояснюється якісною зміною виду зношування і появою ділянок схоплювання.

Встановлено, що збільшення навантаження не впливає суттєво на інтенсивність зношування детонаційних покриттів Cr-Si-B, така висока працездатність покриттів обумовлена протіканням в широкому діапазоні навантажень явища структурної пристосованості при терті. Поверхневий шар покриття в результаті пластичної деформації при терті переходить в термодинамічно нерівноважний активний стан, із якого шляхом адсорбційно-дифузійної і хімічної взаємодії з навколишнім середовищем намагається перейти в пасивний стан. В результаті цієї взаємодії утворюються гетерофазні тонкоплівкові вторинні структури. За даними рентгенофазного аналізу вони являють собою суцільну і щільну плівку SiO, Cr₂O₃ і B₂O₃.

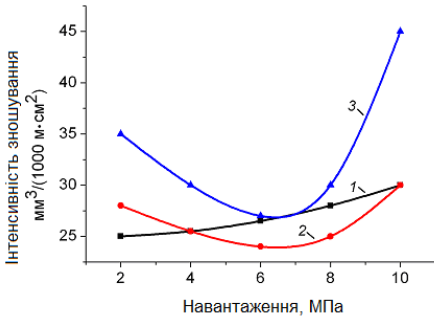


Рис. 8. Залежність інтенсивності зношування покриттів від навантаження: 1 – BK-15; 2 – Cr-Si-B; 3 – Ni-Cr-Al-B

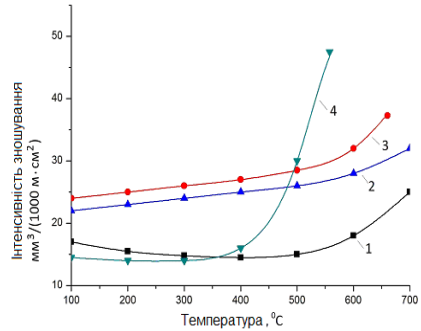


Рис. 9. Залежність інтенсивності зношування від температури: 1 – Cr-Si-B; 2 – Al₂O₃-Cr₂O₃; 3 – Ni-Cr-Al-B; 4 – WC-Co (V=1,5 м/с; P=5,0 МПа)

Утворення вторинних структур відбувається в певному діапазоні режимів тертя при наявності динамічної рівноваги процесів активації і пасивації. Якщо, в силу впливу зовнішніх умов, динамічна рівновага зміщується в сторону збільшення енергії активації, то не утворюється досить міцного і зносостійкого шару вторинних структур, який захищає основний матеріал пари тертя від безпосередньої взаємодії, і процес тертя відбувається в умовах пошкоджень, тоді має місце явище схоплювання.

В результаті металографічного аналізу і профілографування встановлено, що поверхня тертя покриття Cr-Si-B має достатню чистоту і виділяється відсутністю помітних пошкоджень. Окремі джерела схоплювання, що виникають в даних умовах тертя, локалізуються в тонких поверхневих структурах. Дані випробувань, що визначають функціональну залежність інтенсивності зношування від

температури поблизу поверхонь тертя досліджуваних покриттів, представлені на рис.9.

У **четвертому розділі** наведено результати дослідження закономірностей зношування гетерогенних покриттів на основі Cr-Si-B при експлуатації в різних мастильних середовищах, встановлення механізмів впливу елементоорганічних присадок на інтенсивність зношування у широких навантажувально-швидкісних діапазонах.

Дослідження процесів тертя та зношування гетерогенних покриттів Cr-Si-B проведено у інактивній оливі (вазелинова олива) та мінеральній оливі MC-20, з домішками поверхнево-активних речовин. В результаті оже-спектрального аналізу поверхні тертя безпосередньо до і після іонного травлення до глибини 5000Å показано, що хімічний склад поверхні тертя і поверхневого шару значно відрізняється.

Крім сполук основного елементу – хрому, на поверхні тертя присутні кремній, кисень, фосфор, сірка, хлор і вуглець. При пошаровому іонному травленні матеріалу з одночасним хімічним аналізом встановлено закономірність розподілу елементів. Максимальний вміст хрому і кремнію виявлено у приповерхневому шарі на глибині до 5000Å. Подібним чином поводить ся кисень, що дифундує в області сегрегації хрому і кремнію, утворюючи дифузійні ділянки, які складаються з оксидів.

У такий спосіб за допомогою оже-електронної спектроскопії проаналізовано розподіл легуючих елементів, які входять до складу покриття, при роботі в мастильних середовищах, що містять фосфоро-, сірко-, хлоровмісні присадки. В результаті проведеного аналізу виявлено, що хром та кремній дифундують з об'єму матеріалу покриття до поверхневого і приповерхневого шару.

Розподіл кисню за глибиною покриття має подібний характер, що і розподіл хрому і кремнію. При цьому максимальний вміст фосфору, сірки, хлору переважно зареєстровано на поверхні тертя і швидко зменшується за глибиною травлення. Ці елементи дифундували з мастильного середовища, оскільки в матриці матеріалу реєструвались на рівні фону.

Наявність кисню в матриці пояснюється окисненням хрому і кремнію, що містяться в частках порошку, у процесі нанесення покриттів.

Результати дослідження зображені на рис. 10. При випробуванні покриттів у середовищі вазелинової оливи, у якій не міститься поверхнево-активних речовин, спостерігається мінімальна величина зношування при максимальному коефіцієнті тертя.

При додаванні у вазелинову оливу поверхнево-активних речовин інтенсивність зношування збільшується майже в два рази, при одночасному зниженні коефіцієнту тертя.

Помітне зниження коефіцієнту тертя і збільшення межі стійкості, що визначає діапазон експлуатації, пов'язано з хемосорбцією кисню на поверхні тертя й утворенням захисних вторинних структур, а також із ефектом фізично адсорбованих поверхнево-активних речовин, що обумовлюють пластифікування.

При чому, збільшення навантаження обумовлює більш дієвий вплив, ніж підвищення швидкості ковзання, що, виходячи з прояву ефекту Ребіндера, пов'язано з нерівномірно активованим станом поверхневого шару й орієнтацією структури в процесі тертя.

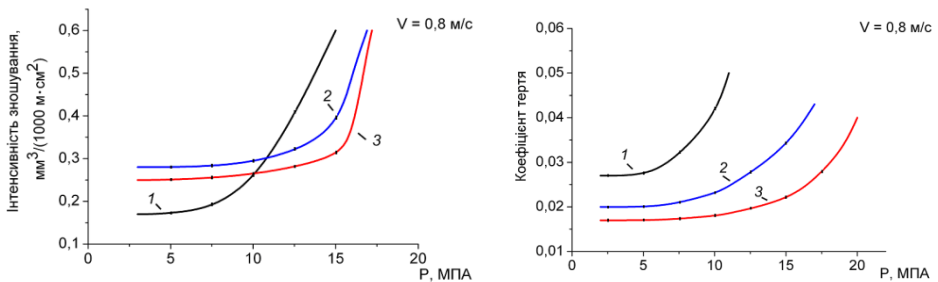


Рис. 10. Зміна інтенсивності зношування (а) і коефіцієнта тертя (б) залежно від питомого навантаження ($V=0,8$ м/с.); 1 – у середовищі вазелінової оливи; 2 – у середовищі вазелінової оливи з поверхнево-активними речовинами; 3 – у середовищі мінеральної оливи MS-20

Вазелінова олива, що містить у своєму складі поверхнево-активні речовини, що адсорбуються на поверхнях деформованого при терті покриття, обумовлює адсорбційне пластифікування, тобто здатність до більш інтенсивної деформації у тонкому поверхневому шарі товщиною в частки мікрметра. При цьому поверхнево-активні речовини полегшують вихід дислокацій до поверхні деформованого покриття, що зменшує внутрішні напруження покриття і запобігає поширенню деформації вглиб зразків.

Отже, при терті гетерогенних покриттів за наявності мастильного середовища важливу роль будуть відігравати поверхнево-активні речовини, що обумовлюють прояв різних видів ефекту Ребіндера і визначають механізм зношування матеріалу.

При проведенні дослідів щодо визначення ступеня впливу елементоорганічних присадок на процеси тертя і зношування покриттів, обґрунтовано застосування в якості базової мінеральної оливи високов'язкісну оливу MS-20, в яку диференційовано додавали елементоорганічні присадки: фосфоровмісні – трикрезилфосфат, сірковмісні – вільна сірка; хлоровмісні – хлористий бензол. Вміст вільної сірки в оливі становив 0,25 % маси, фосфору і хлору - до 1 % маси.

При аналізі результатів впливу навантаження і швидкості ковзання на інтенсивність зносу покриттів (рис.11, 12) в умовах граничного тертя, встановлено, що молекули присадок, як S, Cl, P утворюють на поверхні тертя плівки сульфідів, хлоридів, фосфатів і інших неорганічних сполук металів, які забезпечують антифрикційний, протизношувальний та протизадирний ефект. Попередньо присадки і продукти їх деструкції хемосорбуються на робочих поверхнях.

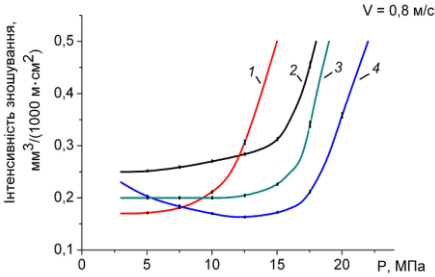


Рис. 11. Зміна інтенсивності зношування в залежності від навантаження: 1 – в середовищі оливи MC-20; 2 – в середовищі оливи MC-20+P; 3 – в середовищі оливи MC-20+S; 4 – в середовищі оливи MC-20+Cl

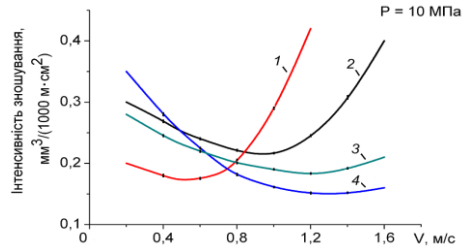


Рис. 12. Зміна інтенсивності зношування в залежності від швидкості: 1 – в середовищі оливи MC-20; 2 – в середовищі оливи MC-20+P; 3 – в середовищі оливи MC-20+S; 4 – в середовищі оливи MC-20+Cl

Навантаження тертям досліджуваних покриттів системи Cr-Si-B в умовах граничного тертя при наявності сірковмісної присадки характеризується широким діапазоном механохімічного зношування. Показано, що на робочій поверхні утворюються плівки сульфідів змінного складу на основі компонентів матеріалів покриття, головним чином, CrS, Cr₂S₃, Cr₃S₂, SiS₂. Для сірковмісних сполук ефективно зниження коефіцієнту тертя досягається при утворенні шару сульфїду товщиною 30-50 молекулярних шарів. Згідно дослідів Сакураї, товщина шару сульфїду, який утворюється при терті в середовищі оливи, складає 1000 нм. При цьому утворення модифікованих шарів забезпечує зниження інтенсивності зношування не тільки за рахунок меншої міцності на зріз, але, й як наслідок, вторинної адсорбції молекул присадки. Так, сульфід хрому є більш активним адсорбентом, ніж оксиди, і мастильний матеріал, який є малоєфективним адсорбентом для стабільних поверхонь, є ефективним при адсорбції на модифікованому шарі.

На рис. 13,а показано фрагмент поверхні тертя, характерний для механохімічного зносу, що містить присадку сірки. Переважна частина робочої поверхні покрита темними і сірими плівками модифікованого шару, який складається, згідно даних рентгенофазового аналізу, в основному з сульфідів матеріалу покриття, твердих розчинів кисню і найменших частинок нижчих оксидів. Сліди схоплювання і місця задири́в на поверхні не виявлені.

Встановлено, що фосфоровмісна присадка ефективна при високих навантажувально-швидкісних режимах. Фосфор обумовлює триботехнічну взаємодію, утворюючи при цьому поверхневі плівки фосфідів типу CrP, CrP₃, SiP які володіють пружністю, здатністю до саморегенерації і частково поширеною структурою (рис. 13,б).

Хлорна присадка, яка утворює на поверхні тертя детонаційного покриття плівки хлоридів, займає проміжне положення по відношенню до фосфор- та сірковмісних присадок. Хлориди утворюються в основному при високих температурах, так що ефективна дія цієї присадки проявляється в діапазоні високих навантажень і швидкостей ковзання. Однак хлориди плавляться при більш низьких температурах, ніж сульфід, це і проявляється на верхній межі працездатності хлоровмісної присадки, яка нижча ніж у сірковмісній, але вища ніж у фосфоровмісній.

Практично для всіх досліджуваних поверхневих структур протизношувальний ефект від утворення модифікованих шарів пояснюється не тільки зниженням сили тертя і температури в зоні контакту, але й тим, що зношування проходить не в результаті руйнування покриття при адгезійному зношуванні, а в результаті деструкції менш міцного модифікованого шару, суттєву долю в якому складає активний елемент присадки (рис. 13, в). В результаті чого замість інтенсивного зношування матеріалу покриття має місце втрата маси присадки, відтвореної з мастильного середовища.

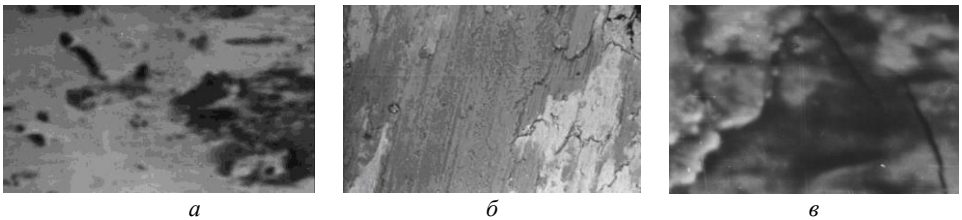


Рис. 13. Мікрофотографія поверхні тертя покриття, випробовуваного при граничному терті ($P=10$ МПа, $V=0,8$ м/с, $\times 320$): *а* – з оливою MC-20+S; *б* – з оливою MC-20+P; *в* – з оливою MC-20+Cl (зі слідами руйнування)

У п'ятому розділі наведено результати дослідження сумісності покриттів з антифрикційними і конструкційними матеріалами.

Встановлено, що головними факторами, від яких залежать закономірності протікання процесів тертя і зношування в контактній зоні досліджуваних матеріалів, є зовнішні впливи, зокрема швидкість ковзання. Вона зумовлює зміну ступеня і градієнта пружно-пластичної деформації, температуру, рівень активування, ряд похідних явищ і в кінцевому рахунку впливає на домінуючий вид зношування. Аналіз результатів впливу швидкості ковзання (рис. 14) на інтенсивність зношування випробовуваних матеріалів показав, що опір зносу пар тертя з покриттям Cr-Si-B практично однаковий, хоча інтенсивність зношування покриттів з алюмінієвою бронзою трохи нижча, у всьому діапазоні швидкостей ковзання, провідним у них є механохімічне зношування. Структура поверхневих плівок настільки дрібнодисперсна, що не представляє можливим отримати відбиток індентора чітко на окремих фазах, можливо говорити тільки про усереднені значення мікротвердості в результаті великої кількості вимірювань (рис. 15).

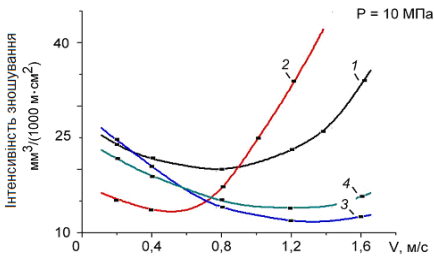


Рис. 14. Зміна інтенсивності зношування в залежності від швидкості: 1 – 30ХМЮА – сталь 45; 2 – 30ХГСНА – сталь 45; 3 – Cr-Si-B – 30ХГСНА; 4 – Cr-Si-B – 38ХМЮА.

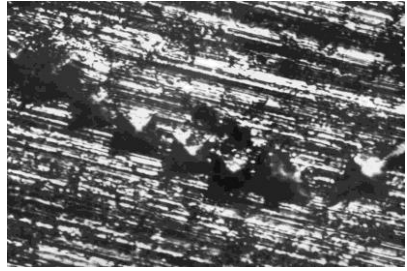


Рис. 15. Мікрофотографія поверхонь тертя детонаційних покриттів, напилених порошком Cr-Si-B (x320).

Процеси, які відбуваються на контактах, істотно залежать від тиску. На експериментальних кривих (рис. 16) видно, що характерним для детонаційних покриттів є незначне збільшення зносу з ростом навантаження.

Така висока працездатність покриттів обумовлюється широким діапазоном структурної пристосованості матеріалів при терті. Утворення вторинних структур, що екранують основний матеріал, відбувається при наявності динамічної рівноваги процесів. Однак при подальшому підвищенні навантаження до 17-19 МПа динамічна рівновага зміщується в сторону підвищення енергії активації і процес зношування якісно змінюється.

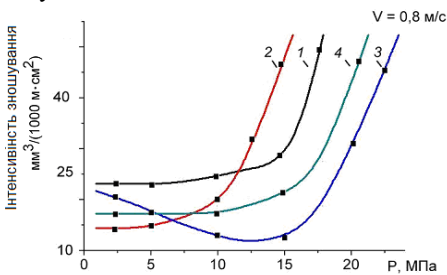


Рис. 16 Зміна інтенсивності зношування в залежності від навантаження: 1 – 38ХМЮА – БрАЖ9-4; 2 – 30ХГСНА – БрО10Ц2; 3 – Cr-Si-B – БрАЖ9-4; 4 – Cr-Si-B – БрО10Ц2.

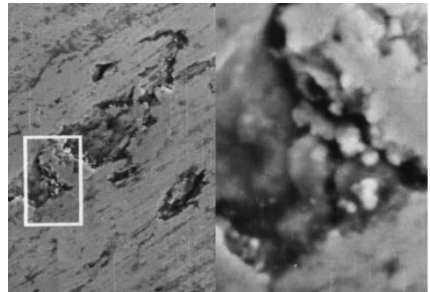


Рис. 17 Мікрофотографія поверхонь тертя детонаційних покриттів, напилених порошком Cr-Si-B (x280, x650).

Таким чином, підвищення навантаження призводить до того, що взаємодія процесів, що характеризують розвиток пластичної деформації при терті, і механізмів, супутніх фазовому наклепу, інтенсивно стимулюють лавиноподібний розвиток центрів мікроскоплювання, і руйнування покриттів при досягненні $P_{кр}$, відбувається переважно шляхом розтріскування і викришування поверхневого шару (рис. 17).

ВИСНОВКИ

В результаті виконання дисертаційної роботи вирішено важливе науково-прикладне завдання, яке полягає в одержанні нових теоретичних узагальнень і практичних результатів, що дозволило підвищити зносостійкість і ресурс відновлюваних деталей авіаційної техніки.

Основними науковими та практичними результатами дисертаційного дослідження є:

1. Створено і випробувано композиційні зносостійкі покриття, властивості яких базуються на раціональному використанні недефіцитних легуючих елементів, які, розчиняючись в матеріалі основи Cr, взаємодіючи з ним і між собою, утворюють стійкі зміцнюючі фази, а на активних поверхнях формують захисні вторинні структури, різні по типу, будові та властивостям. В якості легуючих елементів, які сприяють твердорозчинному зміцненню матричної фази та реалізації механізмів зміцнення за рахунок утворення тугоплавких фаз, в роботі застосовано Si, окрім того висока структурна і фазова стабільність досягається введенням В.

2. Досліджено закономірності процесів тертя та зношування розроблених композиційних покриттів, що не містять високовартісних та дефіцитних компонентів. Встановлено у всьому діапазоні випробувань, наближених до реальних умов експлуатації, високі зносостійкі властивості зазначених покриттів, у порівнянні із зразками, отриманими на базі карбіду вольфраму та покриттів на основі нікелю.

3. Показано, що нормальне механохімічне зношування характеризується певним станом поверхні тертя і експериментально встановлено, що оксидні плівки, які утворюються на поверхні тертя в умовах структурної пристосованості, являють собою складний важкоактивованний комплекс вторинних структур у вигляді простих оксидів та сполук типу шпінелі на основі Cr, Si.

4. При дослідженнях в умовах підвищених температур встановлено визначальну роль поверхневих оксидних плівок, які блокують молекулярно-адгезійну взаємодію поверхонь та перешкоджають розвитку процесів контактного схоплення та за стехіометричним складом являють собою дрібнодисперсну суміш оксидів компонентів складу покриття.

5. Досліджено за допомогою сучасної електронної мікроскопії і рентгенофазного аналізу структурний склад дослідних покриттів, в результаті чого встановлено однорідність градієнту хімічного складу по глибині від поверхні. Показано, що рівномірність розподілу зміцнюючих фаз обумовлює високу зносостійкість.

6. Вивчено триботехнічні процеси структуроутворення зносостійких поверхневих плівок в мастильних середовищах, виявлено механізм впливу поверхнево-активних речовин і показано, що опір зношуванню визначається характером розподілу хімічних елементів, обумовленого агрегацією легуючих добавок, що входять як до складу покриттів, так і дифундують із мастильного середовища. Це приводить до збільшення межі текучості, підвищення поверхневої

міцності і сприяє формуванню зносостійких структур у вигляді надтонких поверхневих плівок.

7. Вивчено особливості сумісності розроблених покриттів у парах тертя з антифрикційними і конструкційними сталями, що дозволило вирішити важливу практичну задачу заміни традиційних антифрикційних матеріалів на основі кольорових металів.

8. Проведені атестаційні випробування, які показали, що запропоновані покриття для поверхневого зміцнення деталей при порівнянні з матеріалами, які застосовуються при відновленні рухомих складових авіаційної техніки, мають підвищену зносостійкість в 1,5-2 рази.

9. На підставі проведених досліджень розроблено технологію нанесення досліджуваних покриттів та рекомендації щодо підвищення експлуатаційної надійності деталей, зміцнених покриттями системи Cr-Si-B.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Недайборщ С.Д. Закономерности и механизм изнашивания детонационных покрытий Cr-Si-B при нагружении трением в отсутствии смазки / С.Д. Недайборщ // Проблемы тертя та зношування. – 2010. – №54. – С.163-170.

2. Недайборщ С.Д. Закономерности изнашивания детонационных покрытий системы Cr-Si-B в условиях граничной смазки / С.Д. Недайборщ, С.С.Бись // Вісник ХНУ. – 2010. – №5. – С.154-157.

3. Недайборщ С.Д. Физические аспекты совместимости детонационных покрытий с триботехническими материалами / С.Д. Недайборщ, В.В. Щепетов // Проблемы тертя та зношування. – 2011. – №55. – С.189-197.

4. Недайборщ С.Д. Повышение эксплуатационных характеристик при восстановлении деталей авиационной техники / С.Д. Недайборщ, В.В.Щепетов // Проблемы техніки. – 2011. – №1. – С.145-148.

5. Недайборщ С.Д. Влияние элементоорганических присадок на процессы трения и изнашивания детонационных покрытий /С.Д. Недайборщ, В.В.Щепетов, О.В. Харченко // Проблемы техніки. – 2012. – №1. – С.57-65.

6. Недайборщ С.Д. Сопротивление износу детонационных покрытий Cr-Si-B в экстремальных условиях трения / С.Д. Недайборщ, С.С.Бись // Вісник ХНУ. – 2013. – №6. – С.20-24.

7. Недайборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B при нагружении трением в условиях повышенных температур / С.Д. Недайборщ, В.В.Щепетов // Порошковая металлургия. – 2014. – №1/2. – С.81-89. SCOPUS

8. Математичне моделювання формування детонаційних покриттів / В.П. Бабак, В.В. Щепетов, В.І. Мірненко, С.Д. Недайборщ // Технологические системы. – 2016. – № 2(75). – С.82-88. COPERNIKUS

9. Babak V.P. Wear resistance under vacuum of nanocomposite coatings with dry lubricant / V.P Babak, V.V. Shchepetov, S.D. Nedayborshch // Scientific bulletin of NMU. – 2016. – № 1. – P.47-52. SCOPUS

10. Недаїборщ С.Д. Структурування зносостійких детонаційних покриттів системи Cr-Si-B / С.Д. Недаїборщ // Матеріали XI МНТК “АВІА-2013”. – 2013. – Т.3. – С.15.1-15.4.

11. Недаїборщ С.Д. Влияние присадок на процессы трения и изнашивания детонационных покрытий системы Cr-Si-B / С.Д. Недаїборщ // Матеріали 4-ї МК HighMatTech. – 2013. – С.331.

12. Недаїборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B в тяжело нагруженных узлах трения / С.Д. Недаїборщ // Матеріали МНТК „Сучасні проблеми машинознавства”. – 2013. – С.10.

13. Недаїборщ С.Д. Износостойкость детонационных покрытий Cr-Si-B в экстремальных условиях трения / С.Д. Недаїборщ // Матеріали 8-ї МК «Матеріали и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий». – 2014. – С.93.

14. Nedaiborshch S.D. Resistance to wear of detonation coatings Cr-Si-B in a vacuum which contains molybdenum disulfide / S.D. Nedaiborshch, O.V. Chahrchenko // Конгрес „Авіація у ХХІ столітті”. – 2014. – С.1.1.60-1.1.63.

15. Недаїборщ С.Д. Износостойкость детонационных нанокпозиционных покрытий Cr-Si-B в условиях высоких температур / С.Д. Недаїборщ // Матеріали 5-ї МК HighMatTech. – 2015. – С.160.

16. Патент №65010 України. Композиційний зносостійкий матеріал на основі Cr-Si-B для поверхневого зміцнення деталей; С22С 29/14 / С.Д. Недаїборщ, І.О. Єгоров, В.В. Щепетов, А.Д. Панасюк, І.О. Подчерняєва, О.В. Харченко // Заявл. від 20.04.2011; Бюл. №22.

АНОТАЦІЯ

Харченко С.Д. Методи підвищення зносостійкості деталей авіаційної техніки за рахунок використання детонаційних покриттів Cr-Si-B. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – Тертя та зношування в машинах (13 – Механічна інженерія). – Національний авіаційний університет, Київ, 2019.

Робота присвячена підвищенню зносостійкості деталей авіаційної техніки, які працюють за умов відсутності мастильного матеріалу, а також в режимі граничного тертя. Створено і випробувано композиційне зносостійке покриття, властивості якого базуються на раціональному використанні недефіцитних легуючих елементів, які, розчиняючись в матеріалі основи Cr, утворюють стійкі зміцнюючі фази, а на активованих поверхнях формують захисні вторинні структури, різні по типу, будові та властивостям. В якості легуючих елементів, сприяючих твердорозчинному зміцненню матричної фази та реалізації механізмів зміцнення за рахунок утворення тугоплавких фаз, застосовано Si, В. Підібрано оптимальні технологічні параметри детонаційно-газового напилення композиційних порошків системи Cr-Si-B. Досліджено параметри тертя і зношування композиційних покриттів в умовах зміни навантажувально-швидкісних і температурних режимів випробування. Вивчено

вплив трибохімічних процесів в умовах граничного мащення на явище структурної пристосованості при терті композиційних покриттів. Встановлено області практичного застосування досліджуваних покриттів із композиційних порошків для умов роботи: в повітряному середовищі при відсутності та наявності мастильних матеріалів.

Ключові слова: композиційні покриття, граничне тертя, тертя, зношування, технологічні та експлуатаційні параметри, пари тертя, вторинні структури.

АНОТАЦІЯ

Харченко С.Д. Методы повышения износостойкости деталей авиационной техники за счет использования детонационных покрытий Cr-Si-B. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 - Трение и износ в машинах (13 - Механическая инженерия). - Национальный авиационный университет, Киев, 2019.

Работа связана с повышением износостойкости деталей авиационной техники, работающих в условиях отсутствия смазочного материала, а также в режиме граничного трения. Создано и испытано композиционное износостойкое покрытие, свойства которого основываются на рациональном использовании не дефицитных легирующих элементов, которые, растворяясь в материале основы Cr, образуют устойчивые упрочняющие фазы, а на активированных поверхностях формируют защитные вторичные структуры, различные по типу, строению и свойствам. В качестве легирующих элементов, способствующих твердорастворимому упрочнению матричной фазы и реализации механизмов упрочнения за счет образования тугоплавких фаз, применено Si, В. Подобраны оптимальные технологические параметры детонационно-газового напыления композиционных порошков системы Cr-Si-B. Исследованы параметры трения и изнашивания композиционных покрытий в условиях изменения нагрузочно-скоростных и температурных режимов испытания. Изучено влияние трибохимических процессов в условиях граничной смазки на явление структурной приспособленности при трении композиционных покрытий. Установлено области практического применения исследуемых покрытий из композиционных порошков для условий работы: в воздушной среде при отсутствии и наличии смазочных материалов.

Ключевые слова: композиционные покрытия, граничное трение, трение, износ, технологические и эксплуатационные параметры, пары трения, вторичные структуры.

ANNOTATION

Kharchenko S.D. Methods of improving the wear resistance of parts of aviation equipment due to the use of detonation coatings Cr-Si-B. – The manuscript.

Thesis for obtaining a candidate of technical sciences in major 05.02.04 - Friction and wear and tear in machines (13 - Mechanical engineering). - National Aviation University. - Kyiv, 2019.

The work is devoted to increasing the wear resistance of parts of aviation technology, which operate in the absence of lubricant, as well as in the mode of friction. Created and tested composite wear-resistant coating, whose properties are based on the rational use of non-deficient alloying elements are dissolved in the material foundations Cr form stable reinforcing phase, and the active surfaces form a protective secondary structure, different in type, structure and properties. Si, B used as alloying elements, contributing to the solid-state strengthening of the matrix phase and the implementation of strengthening mechanisms due to the formation of refractory phases. The optimum technological parameters of detonation gas spraying of composite powders of the Cr-Si-B system have been selected.

The regularities of friction and wearing processes of developed composite coatings that do not contain high-value and scarce components are investigated. Installed throughout the range of tests, close to the actual operating conditions, high wear-resistant properties of these coatings compared with samples obtained on the basis of tungsten carbide and nickel-based coatings.

It is shown that normal mechanical and chemical deterioration is characterized by a certain state of the friction surface and it has been experimentally established that oxide films formed on the friction surface under conditions of structural adaptation represent a complex heavy-activated complex of secondary structures in the form of simple oxides and compounds based on Cr, Si.

In researches in high temperatures, the determining role of surface oxide films, which block the molecular-adhesion interaction of surfaces and hinder the development of contact bonding processes, is established and, according to the stoichiometric composition, is a fine-dispersed mixture of oxides of the components of the coating composition.

The structural structure of the investigated coatings was studied with the help of modern electron microscopy and X-ray diffraction analysis. The homogeneity of the chemical composition gradient in depth from the surface was established. It is shown that even distribution of hardening phases causes high wear resistance.

The tribotechnical processes of structuring of wear-resistant surface films in lubricating media were studied, the mechanism of influence of surfactants was revealed and the resistance of wear was determined by the character of the distribution of chemical elements due to the aggregation of dopant additives included in the coatings and diffused from the lubricants. This leads to an increase in the yield strength, an increase in surface strength and contributes to the formation of wear-resistant structures in the form of superfine surface films.

The features of compatibility of developed coatings in friction pairs with antifriction and structural steels were studied, which allowed to solve an important practical task of replacing traditional antifriction materials based on non-ferrous metals.

Based on the research carried out, the technological processes of applying the coating coatings and recommendations for improving the operational reliability of the parts reinforced with Cr-Si-B coatings have been developed.

Keywords: composite coatings, extreme friction, friction, wear, technological and operational parameters, friction pairs, secondary structures.