

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

**ХАРЧЕНКО Олена Василівна**

УДК 621.891

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ОПОРУ ЗНОСУ АМОРФНО-КРИСТАЛІЧНИХ  
ПОКРИТТІВ СИСТЕМИ Zr-Al-V**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України 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

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Мірненко Володимир Іванович,**  
Національний університет оборони України  
імені Івана Черняхівського,  
завідувач кафедри логістики Повітряних Сил, м. Київ

кандидат технічних наук, доцент  
**Савчук Анатолій Миколайович,**  
Національний транспортний університет,  
доцент кафедри виробництва, ремонту та  
матеріалознавства, м. Київ

Захист відбудеться 27 лютого 2020 р. о 16<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.06 Національного авіаційного університету за адресою: Україна, 03058, м. Київ, пр. Космонавта Комарова, 1, аудиторія 11.220.

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

Автореферат розісланий        січня 2020 р.

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



Корчук О.Ю.

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Сучасна стратегія науково-технічного розвитку багато в чому визначається рівнем досягнень у галузі матеріалознавства. Сьогодні практично в усіх розвинених країнах великий науковий і практичний інтерес представляють розробки, пов'язані з отриманням нового класу промислових матеріалів, так званих аморфно-кристалічних матеріалів, що відрізняються особливими властивостями і великими потенційними можливостями.

Застосування аморфно-кристалічних покриттів для підвищення працездатності деталей що експлуатуються в умовах тертя, обмежується в наслідок відсутності наукових даних про закономірності процесів їх зношування, галузі раціонального техніко-економічного застосування. Крім того при загальній позитивній оцінці ефективності і доцільності використання аморфно-кристалічних покриттів їх розроблення обумовлено з одного боку, потребою практики у створенні на базі мінерально-сировинного потенціалу країни матеріалів з високими експлуатаційними трибохарактеристиками, з другого, логікою розвитку прикладних областей порошкової металургії, а саме, розширення асортименту високоякісних композицій для напилення.

Вивчені важливі прикладні аспекти отримання аморфно-кристалічних покриттів за рахунок розроблення технологічних параметрів їх детонаційно-газового напилення, які сприяли низькій пористості, зниженню кількості оксидних прошарків, високій адгезійній міцності при підвищенні кількості аморфної фази.

Успіхи у вивченні практичних проблем експлуатації вузлів тертя, що містять попереднє детонаційне зміцнення аморфно-кристалічними покриттями, базується на глибоких теоретичних та експериментальних дослідженнях. У сучасних умовах триботехнічні характеристики детонаційних покриттів, що напилені аморфно-кристалічними порошками, їх працездатність в умовах експлуатації майже не визначена, систематичні дослідження в літературі відсутні.

Саме тому дослідження експлуатаційних можливостей детонаційних аморфно-кристалічних покриттів як конкурентно спроможного матеріалу для захисту вузлів тертя деталей машин від зносу залишається актуальним завданням сучасної практики.

**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.** Підвищення зносостійкості трибоспряжень шляхом розроблення детонаційних аморфно-кристалічних покриттів з покращеними триботехнічними характеристиками в умовах відсутності мастильного матеріалу.

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

1. Визначити оптимальні технологічні параметри детонаційно-газового напilenня аморфно-кристалічних покриттів системи Zr-Al-B.
2. Дослідити механізм зношування покриттів і кінетику формування структури поверхневого шару при випробуваннях в умовах відсутності мастильного матеріалу.
3. Встановити закономірності зношування покриттів в залежності від навантажувально-швидкісних режимів і їх вплив на процеси структурної пристосованості.
4. Встановити рівень залишкових напружень та їх вплив на зносостійкість покриттів.

**Об'єкт дослідження** – процеси тертя та зношування, що визначають трибостійкість детонаційних аморфно-кристалічних покриттів.

**Предмет дослідження** – закономірності формування зносостійких структур детонаційних аморфно-кристалічних покриттів Zr-Al-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 визначені та розроблені технологічні режими детонаційного напilenня (витрата композиційної суміші, гранулометричний склад, співвідношення витрат детонуючих газів) аморфно-кристалічних покриттів Zr-Al-B, що дало можливість підвищити коефіцієнт використання порошку, збільшити об'ємний вміст аморфної фази, зменшити пористість та підвищити адгезійну міцність зчеплення з основою.

2. Вперше детально досліджений трибофазовий склад, структура, механо-хімічні властивості аморфно-кристалічних покриттів та діапазон їх нормального зношування, що дозволило визначити роль трибохімічних процесів поступового розчинення локальних мікрокристалічних включень і утворення орієнтованої метастабільної структури аморфної матриці у формуванні модифікованих тертям вторинних структур з високим ступенем деформаційно-термічної стабільності, які характеризуються високими зносостійкими властивостями.

3. Вперше розкрито механо-фізико-хімічні аспекти підвищення зносостійкості дисипативних структур аморфно-кристалічних покриттів за рахунок утворення при терті простих ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ZrO) і складних ( $\text{Zr}_2\text{AlO}_4$ ) оксидів, борного ангідриду  $\text{B}_2\text{O}_3$ , метаборату цирконію  $\text{Zr}(\text{BO}_2)_2$ , які характеризуються високою поверхневою міцністю з достатнім запасом пластичності за умов експлуатації аморфно-кристалічних покриттів без мастильного матеріалу, що відкриває можливість застосування аморфно-кристалічних покриттів Zr-Al-B в якості зносостійкого антифрикційного матеріалу.

4. Вперше встановлено діапазон працездатності детонаційних аморфно-кристалічних покриттів на основі їх структурної пристосованості та сумісності з антифрикційними матеріалами (загартована сталь, бронза, спечені сплави на основі міді та ін.) з урахуванням величини і характеру розподілу залишкових технологічних макронапружень в залежності від товщини покриття та термічної обробки, в результаті чого визначено області оптимального практичного їхнього використання для підвищення зносостійкості вузлів тертя.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено аморфно-кристалічне детонаційне покриття системи Zr-Al-B, 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.).

Розроблено та затверджено у встановленому порядку технологію нанесення аморфно-кристалічних детонаційних покриттів Zr-Al-B.

Розроблено рекомендації щодо встановлення діапазонів швидкості, навантаження, температури, які дозволяють реалізувати високу зносостійкість покриттів, підібрати оптимальні пари тертя для конкретних умов експлуатації.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові 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 зносостійкість покриттів на основі цирконію – [2]; встановлено основні технологічні фактори формування покриттів – [3]; досліджено вплив технологічних параметрів на формування покриттів – [4]; досліджено вплив напруженого стану на грибостійкість покриттів – [5]; встановлено закономірності зношування покриттів при навантаженні тертям – [6].

Формулювання теми, постановка завдань, 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: Матеріали XI МНТК “AVIA-2013” (м. Київ, 2013 р.); 3-ій Міжнародній науково-технічній конференції „HighMatTech” (м. Київ, 2013 р.); Матеріали МНТК „Сучасні проблеми машинознавства” (м. Київ, 2013 р.); Матеріали 8-ї МК «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» (м. Київ, 2014 р.); THE SIXTH WORLD CONGRESS „AVIATION IN THE XXI-st CENTURY” (м. Київ, 2014 р.); The Fourteenth International Conference of Science and Technology “AVIA-2019” (м. Київ, 2019 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційного дослідження викладено в 13 наукових працях, у тому числі: 5 статей у фахових виданнях з переліку МОН України, 1 стаття у виданні, що входить до міжнародних наукометричних баз; 6 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях; 1 патент України на винахід.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається із анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел зі 115 найменувань та 3 додатків. Робота викладена на 164 сторінках, в тому числі містить 29 рисунків та 16 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 аналіз літературних даних щодо розробок, пов'язаних з отриманням нового класу промислових матеріалів, так званих аморфно-кристалічних матеріалів, що відрізняються від традиційних покращеними властивостями та великим потенціалом можливостей.

Характерне для конструкційних аморфно-кристалічних оптимальне співвідношення механічних та фізико-хімічних властивостей забезпечує широке їх застосування як високоефективних конструкційних матеріалів триботехнічного призначення.

Типовими представниками аморфно-кристалічних матеріалів є сплави перехідних металів з бором, що отримані газотермічними методами, зокрема детонаційно-газовим. Однією з важливих переваг детонаційно-газового методу наплення покриттів, є можливість формування аморфно-кристалічного покриття на поверхні напилювання до декількох міліметрів. Продуктивність процесу та можливість використання серійного обладнання відкривають перспективи отримання нового класу покриттів для захисту традиційних металевих матеріалів від зовнішнього впливу і формування шарів зі спеціальними властивостями.

Разом з тим, ряд науково-технічних і практичних питань, пов'язаних з отриманням аморфно-кристалічних покриттів залишаються новими та не вирішеними, перш за все це обґрунтований вибір складу покриття, які мають відносно високу стабільність аморфно-кристалічного стану в заданому температурно-часовому інтервалі дослідження кінетичних факторів аморфізації, що вимагає систематичного вивчення їх триботехнічних властивостей, а також вплив структурно-фазового складу та напруженого стану на поверхневу міцність і опір руйнуванню при терті за відсутності мастильного матеріалу.

Отже, використання детонаційно-газового методу, та визначення оптимальної початкової композиції дало можливість отримати аморфно-кристалічні покриття з контрольованим відсотковим вмістом аморфної фази.

**У другому розділі** описано методики виготовлення та нанесення на поверхню зразків аморфно-кристалічних покриттів. Встановлено, що формування в покриттях аморфно-кристалічної структури можливо при протіканні фазових перетворень в умовах, перешкоджаючих в певній мірі зародженню та росту кристалічної фази, зокрема, швидкого охолодження на поверхні деталі.

Показано, що швидке охолодження покриття забезпечується не тільки фізичним відведенням тепла і зменшенням товщини шару, але й ступенем переохолодження рідкої фази, тобто, її низькою температурою і високою рідкоплинністю. Фізико-хімічні фактори утворення аморфно-кристалічної структури – це велика різниця в атомних радіусах компонентів та міцність хімічних зв'язків між розчинником і розчиненим елементом.

Шляхом застосування сучасних комплексних методів фізико-хімічного аналізу, проведено дослідження якості поверхневих шарів, в яких проходять процеси активації при навантаженні тертям, що обумовлюють інтенсивність механохімічних процесів, градієнти пружно-пластичної деформації, температуру, рівень активування та ряд додаткових явищ, що в кінцевому рахунку визначає ведучий вид зношування.

Проведено випробування розроблених аморфно-композиційних покриттів за програмою, яка включає визначення триботехнічних параметрів в залежності від змін швидкості ковзання, навантаження в парах тертя за відсутності мастильного матеріалу.

В роботі встановлено закономірності структуроутворення та зносостійкості детонаційних аморфно-кристалічних покриттів і впливу легованих елементів на діапазони і рівні трибохімічного зносу, на підставі чого обґрунтовано використання покриття системи Zr-Al-B. Результатом є зниження коефіцієнтів тертя, інтенсивності зношування, підвищення поверхневої міцності покриттів і, як наслідок, покращення ефективності і якості їх експлуатації. Запропонований матеріал може використовуватися як матеріал для деталей машин і механізмів триботехнічного призначення, що працюють в умовах тертя при підвищених швидкісно-навантажувальних параметрах.

При дослідженні механізму зношування та закономірностей тертя детонаційних аморфно-кристалічних покриттів проведено випробування в умовах відсутності мастильного матеріалу.

Порошки для формування аморфно-кристалічних покриттів системи Zr-Al-B отримано методом механохімічного синтезу, який сприяє оптимальному формуванню фракційного складу порошкового матеріалу. Результатом застосування процесу механохімічного синтезу є композиційний порошок, що представляє собою однорідну ультрадисперсну суміш всіх складових компонентів.

Нанесення аморфно-кристалічних покриттів детонаційно-газовим методом проведено на установці „Днепр-3”.

Випробування матеріалів на тертя та зношування з нанесеними аморфно-кристалічними покриттями системи Zr-Al-B проведено на універсальній машині тертя УМТ-1 за загальноприйнятою методикою, по торцевій схемі кільцевих зразків, яка дозволяє моделювати роботу трибосполучень в умовах тертя та забезпечує  $K_{вз} \approx 1$  при підвищених швидкісно-навантажувальних параметрах.

Дослідження загальної структури зразків аморфно-кристалічних детонаційних покриттів, проведено на металографічних шліфах за стандартизованою методикою. Підготовку шліфів (зразків) виконано шляхом

травлення їх розчином 4%-азотної кислоти в спирті. За допомогою оптичного металографічного мікроскопу МИМ-8 виконано металографічні дослідження зразків, що дало можливість виявити характер і вид руйнування на поверхні зразків, рівень їх припрацювання, якість поверхні тертя та встановити можливість подальшої придатності зразків для досліджень.

Важливим критерієм оцінки окремих структурних складових і тонких приповерхневих шарів є визначення мікротвердості аморфно-кристалічних покриттів, що дозволяє визначити опір пластичному вдавлюванню в поверхню твердого індентора, який характеризує зміни властивості поверхневих шарів при терті. Дослідження здійснено вдавлюванням алмазного індентора навантаженням 0,5Н на мікротвердомірі ПМТ-3.

Методом мікрорентгеноспектрального аналізу на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-УМ1 встановлено хімічний склад аморфно-кристалічної поверхні зразків, різних включень та фаз. Використання даних методів дозволяє аналізувати наявність аморфної структури, а також дрібнодисперсні зерна детонаційних покриттів, та дослідити ступінь хімічної неоднорідності речовини і тонких сполучень різних фаз й кількісного розподілу хімічних елементів в них.

В роботі розроблено математичну модель впливу експлуатаційних і технологічних факторів на формування аморфно-кристалічних детонаційних покриттів.

$$\begin{aligned}
 I_n &= 4,35623 + 1,82121x_2 + 1,079352z_2 + 0,962x_1 + 0,593467z_1 - \\
 &\quad - 0,793x_1x_2 - 0,57x_1z_2 - 0,562301z_1z_2 - 0,278674u_2 + 0,347x_1u_2 \quad (1) \\
 x_1 &= 0,0145863*(X_1 - 242); \quad z_1 = 1,71537*(x_1^2 - 0,428544); \\
 x_2 &= 0,04*(X_2 - 45); \quad z_2 = 2*(x_2^2 - 0,5); \quad u_2 = 3,78463*(x_2^3 - 0,84*x_2).
 \end{aligned}$$

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;  $X_1$  – витрата композиційної суміші;  $X_2$  – гранулометричний склад.

Шляхом проведення серії експериментів дано оцінку адекватного впливу технологічних факторів на формування аморфно-кристалічних покриттів, та визначено найбільш значимі фактори та їх рівні варіювання, які прийняті після формалізації.

Експериментальні дослідження проведено за планом повного факторного експерименту  $5^1 \times 9^{11} // 45$ . За допомогою програмного засобу ПРІАМ (планування, регресія і аналіз моделей) побудовано лінійну за параметрами регресійну модель з автоматичним формуванням структури моделі на основі поліномів Чебишева.

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

Для аналізу впливу кожного із регульованих факторів на досліджувану функцію побудовано площину відгуку (рис. 1). Встановлено, що формування аморфно-кристалічних покриттів в більшій мірі залежить від розміру фракції (S) та витрати композиційної суміші (G).



Мінімальними показниками інтенсивності зношування володіють аморфно-кристалічні покриття, нанесені при витраті композиційної суміші 175 мг/п і розміру фракції 25 мкм.

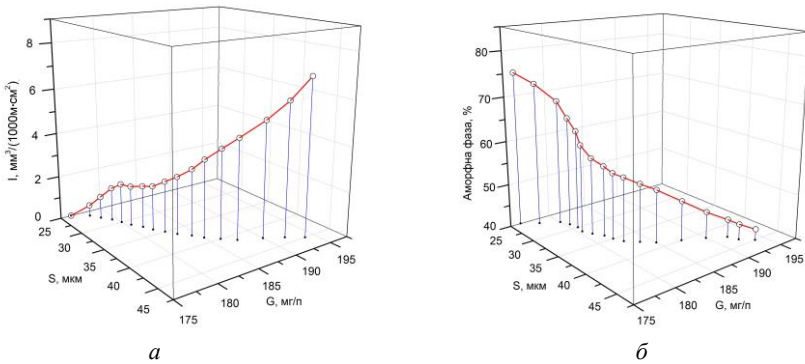


Рис. 1. Залежність інтенсивності зношування (а) та відсотку аморфної фази (б) покриттів Zr-Al-B від розміру фракції та витрати композиційної суміші.

У третьому розділі наведено закономірності формування зносостійких аморфно-кристалічних покриттів. Обґрунтовано вибір компонентів та підібрано основні технологічні параметри формування аморфно-кристалічних покриттів Zr-Al-B.

На базі розрахунково-теоретичних методик прогнозування структурного стану газотермічних покриттів і, зокрема, детонаційно-газових, які засновані на аналізі діаграм стану в єдиному температурно-часовому полі, визначено основні технологічні чинники напilenня покриттів з аморфною структурою, а саме: хімічний склад матеріалу; товщина частинок, що напилуються; рівень нагріву покриття і основи в процесі напilenня; питома продуктивність напilenня; ступінь перегріву напилуваного матеріалу; теплотворність металевої основи.

Детальний розгляд впливу зазначених технологічних факторів на об'ємний вміст аморфної фази в покриттях, що напилуються, дозволяє запропонувати відповідні технологічні режими і сформулювати вимоги до процесу напilenня аморфізованих покриттів.

Одним з визначальних чинників отримання аморфізованих покриттів є склад. Підхід до вибору складу компонентів матеріалу для напilenня аморфних покриттів зносостійкої системи Zr-Al-B здійснюється, з одного боку, на основі критеріїв аморфізації сплавів при надшвидкому охолодженні, і з іншого боку, на базі фізико-хімічних положень з урахуванням оцінки розрахунково-теоретичної методики формування аморфних матеріалів, викладених в роботі.

Як встановлено, можливість отримання аморфізованої структури тим вище, чим більше температура аморфізації і нижче температура плавлення. З цих позицій обґрунтовано склад, що має найбільшу схильність до утворення аморфного стану через наявність компонентів близьких до евтектичного складу.

Обґрунтовано вибір компонентів з урахуванням можливості утворення заданої структури із досягненням аморфного стану системи для елементів, у яких відмінність атомних радіусів знаходиться в межах 15-30%. У роботі вибір складу компонентів покриття, близький до евтектичного, а відмінності їх атомних радіусів відповідають зазначеним початковим обмеженням та не перевищують 13-29%. Бору, який визначає в покритті функції аморфізатора, і алюмінію, що виконує роль модифікатора, властивий один і той же валентний стан, при цьому, бор є акцептором, та утворює міцні й тугоплавкі сполуки з металами ( $AlB_2$ ,  $ZrB_2$  і ін.).

Показано, що сполука Zr-B при концентрації В 6-8 (мас.%) призводить до зменшення параметра  $a$  кристалічної ґратки. Така зміна пов'язана з утворенням твердого розчину змішаного впроваджено-заміщеного типу. При цьому, зменшення параметра  $a$  елементарної комірки обумовлено заміщенням атомів Zr, що мають великий атомний радіус ( $r_{Zr} = 0,170$  нм), на атоми В з меншим атомним радіусом ( $r_B = 0,080$  нм).

Кристалічна ґратка покриття при вмісті В 6-8% сильно викривляється, що призводить до збільшення фізичного розширення  $\beta$  рентгенівських дифракційних ліній. Оскільки  $\beta \sim \text{tg}\theta$ , то це свідчить про присутність полів атомних зсувів, пов'язаних як з дефектами кристалічної ґратки, так і з деформаціями, зумовленими розмірною невідповідністю атомів Zr та В.

Показано, що подальше збільшення концентрації В в покритті до 10 мас. % призводить до втрати дальнього порядку в розташуванні атомів і утворення перехідної аморфно-кристалічної структури. При цьому, на рентгенівських дифрактограмах реєструються окремі розмиті дифракційні лінії малої інтенсивності, а в області малих кутів розсіювання формується потужний розмитий дифракційний максимум (рис. 2, а). Мікротвердість покриття досягає рівня  $H_{0,98} = 7,8$  ГПа. Вміст В  $\geq 14,0$  мас.%, призводить до утворення шарів наповнених з аморфною структурою, і на рентгенівських дифрактограмах реєструються розмиті максимуми-гало (рис.2, б), характерні для дифракції від аморфних матеріалів.

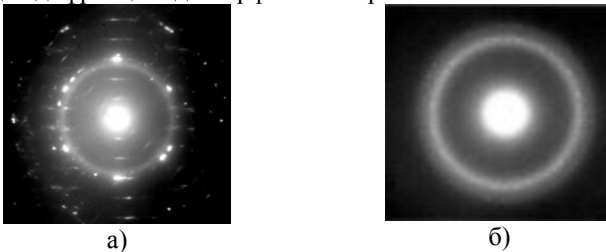


Рис. 2. Електроннограми поверхні покриттів Zr-B: а - Zr-10 мас.% В, б - Zr-14 мас.%, В

Встановлено, що легування покриття Zr-B таким елементом як Al покращує їх аморфізацію. При цьому, максимальним вмістом аморфної фази в порівнянні з покриттями з матеріалів Fe-Mo-B, Fe-Mo-Cr-Ni-B характеризуються детонаційні покриття системи Zr-Al-B. Слід зазначити, що разом з часткою аморфної фази, при легуванні покриття алюмінієм, змінюється в них і вміст кристалічних фаз. Так, крім

аморфної фази основними кристалічними фазами є тверді розчини на основі боридів цирконію  $(ZrAl)_2B$ ,  $(AlZr)_5B$ , а також  $\gamma$ -Zr і  $Zr_x Al_{27-x} B_{14}$ .

Для покриття системи  $Zr_{60}Al_{26}B_{14}$  з об'ємним вмістом аморфної фази  $Zr_{af}=75\%$  при дослідженні структури на рентгенівському мікроаналізаторі у вторинних електронах встановлено, що ультрадисперсні кристалічні утворення в аморфній матриці збагачені бором, при їх середніх розмірах  $0,5...1,0$  мкм. При цьому, форма ультрадисперсних утворень в певній мірі успадковує будову евтектичних колоній вихідного порошку.

**У четвертому розділі** наведено результати дослідження тертя та зношування аморфно-кристалічних покриттів за відсутності мастильного матеріалу.

У таблиці 1 представлено результати досліджень фізико-механічних властивостей детонаційних покриттів на основі цирконію, легованого алюмінієм і бором.

Встановлено, що варіювання вмісту компонентів покриття обумовлює зміни фізико-механічних властивостей поверхневої зони і оптимальний вміст компонентів відповідне максимальним значенням показників поверхневої міцності при терті, відповідає співвідношенню (мас.%) Zr - 60%, Al - 25%, B - 12%. При цьому розраховані для випробовуваних покриттів значення межі текучості ( $\sigma_r$ ), модуля Юнга (E) і ступеня деформаційного зміцнення (m) перевищують граничні значення для аморфних сплавів ( $E=180000$  Н/мм<sup>2</sup> і  $m=2,5$ ), що підтверджує присутність в структурі матеріалу нанокристалічних фаз.

Таблиця 1.

### Механічні властивості покриттів Zr-Al-B

Вміст компонентів, %				E, Н/мм	$\sigma_r$ , Н/мм	m	HV, МПа
Zr	Al	B	домішки				
80	10	5	5	173900	4070	2,21	1350
70	15	8	7	181800	4250	2,27	1410
60	25	12	13	195300	4950	3,10	1620

Дані випробувань, що визначають функціональну залежність інтенсивності зношування покриттів від швидкості ковзання представлено на рис.3.

За характером і закономірностями структурних змін, які обумовлюють опір зношуванню покриттів системи Zr-Al-B (крива 3), досліджено розподіл елементів по товщині шару, що напилюється. В результаті виявлено наявність дифузійної зони близько 25 мкм і змінну по перетину концентрацію елементів, що входять до складу покриття. При цьому зіставлення відбитків, знятих в поглинених електронах і рентгенівських променях, дозволило однозначно ототожнити отриману наноконпозиційну структуру, яка характеризується локальною неоднорідністю розподілу хімічних елементів по глибині поверхневого шару. Отримані розбіжності в хімічному складі, підтверджують наявність нерівноважної ультрадисперсної структури, що збігається з сучасними уявленнями про природу аморфних і аморфно-кристалічних композитів. Кількість аморфної фази в покритті становить до 82%.

За даними рентгенівського аналізу із застосуванням стандартного травника, що представляє суміш азотної і плавикової кислот, встановлено, що склад покриттів відрізняється від складу порошку, що напилюється, за рахунок структурних і фазових перетворень при взаємодії компонентів в умовах надшвидкого охолодження. Матеріал покриття має беззеренну структуру, яка виключає недосконалості кристалічної будови (границі зерен, дислокації, дефекти упаковки). Проте, є деякі локальні ділянки з мікрокристалічною будовою, які на рентгенограмах візуалізуються окремими лініями, що відповідають ґратці  $\alpha$ -Zr, крім того, в аморфній матриці помітні зони з усередненими значеннями до 0,5-1,5 мкм, які збагачені бором і є ультрадисперсними включеннями фаз типу  $ZrB_2$ ,  $AlB_2$ .

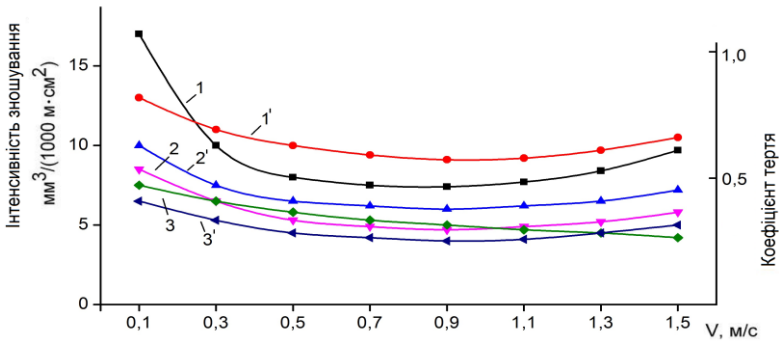


Рис. 3. Залежність інтенсивності зношування (1,2,3) і коефіцієнта тертя (1', 2', 3') від швидкості ковзання покриттів: 1, 1' - на основі Ni (Ni-Cr-Al-B); 2, 2' - типу BK15; 3, 3' - аморфно-кристалічної системи Zr-Al-B.

На рис.4. представлено результати електронно-мікроскопічного аналізу поверхневого шару. Видно, що навантаження тертям при швидкості ковзання до 1,3 м/с обумовлює помітні зміни структурного стану приповерхневого шару, які характеризуються утворенням неоднорідностей розміром порядку 15-35 нм (рис. 4 б).

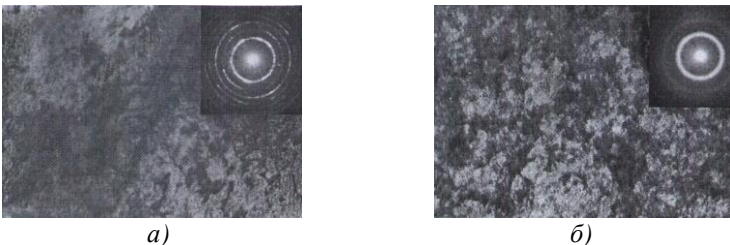


Рис.4. Електронні мікрофотографії поверхонь покриття Zr-Al-B: а - вихідний стан (x100000); б - після випробування V=1,3 м/с (x100000).

В роботі проведено випробування на сумісність покриттів Zr-Al-B в парах тертя з авіаційними сталями, результати яких представлено на рис. 5, та виконано металографічний аналіз поверхонь тертя. Встановлено, що поверхні тертя характеризуються відсутністю візуальних пошкоджень (див. рис. 6.), окремі

осередки схоплювання, що виникають в даних умовах випробувань, локалізуються в тонких поверхневих шарах. Утворені тонкоплівкові структури механохімічної природи, які виконують роль твердого змащення, перешкоджають адгезійно-молекулярній взаємодії робочих поверхонь, що оберігає їх від безпосереднього контакту і руйнування.

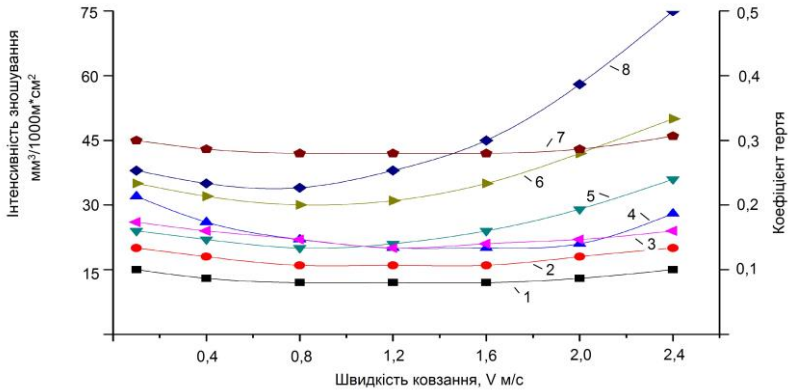


Рис. 5. Вплив швидкості ковзання на: інтенсивність зношування (1,3,5,7) та коефіцієнт тертя (2,4,6,8) досліджуваних покриттів у парах тертя зі сталями 30ХГСНА, 38Х2МЮА, 40ХН2СМА та 03Н18К9М5ТР.

Характер зміни коефіцієнтів тертя, величина яких визначає ступінь втрати енергії у вузлах тертя, узгоджується з встановленою закономірністю зношування і знаходиться в межах 0,23-0,36.

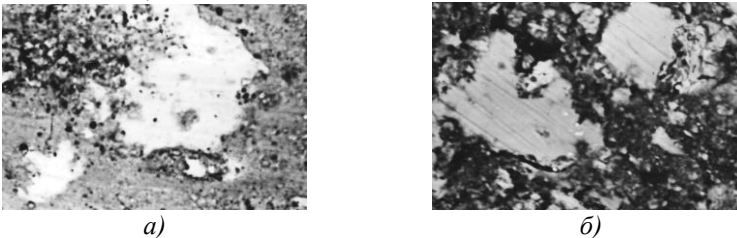


Рис. 6. Поверхні тертя покриттів Zr-Al-B, випробуваних із зразками зі сталі 30ХГСНА при: а) - 0,1 м/с; б) - 1,5 м/с, (x320).

Поверхнева міцність покриттів при терті, в певному розумінні обумовлює їх експлуатаційні можливості, є адитивною функцією комплексу чинників, в тому числі факторів як першого ярусу, що відображає макроструктурний рівень, так і другого ярусу, що характеризують особливості структури на мікрорівні.

За даними досліджень встановлено, що дотичні напруження, які виникають в приповерхневих шарах покриттів, досягають максимальних значень на деякій глибині, а інтенсивність зношування визначається процесами, що протікають в цих шарах.

Стійкість профілю кривої  $In=f(V)$  практично у всьому діапазоні випробувань

свідчить про прояв структурної пристосованості матеріалів пар тертя і, як наслідок, нормальне допустиме зношування.

Доведено, що за даних умов випробувань структурам приповерхневого шару разом з тонкоплівковими вторинними структурами механохімічного походження характерні висока міцність з достатнім запасом пластичності (див. рис. 7.), тобто, вони володіють стійким проявом структурної пристосованості, що забезпечує здатність чинити опір розвитку крихких тріщин і обумовлює мінімізацію параметрів тертя.

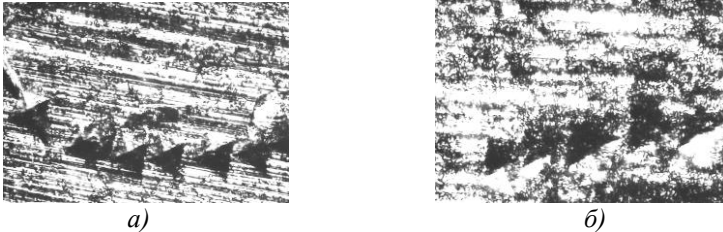


Рис. 7. Поверхні тертя покриття Zr-Al-B, випробувані зі зразками з азотованої сталі 30X2MЮА при: а) - 0,4 м/с; б) - 1,6 м/с, (x320).

У п'ятому розділі наведено результати досліджень рівня напруженого стану аморфно-кристалічних покриттів системи Zr-Al-B. Дано оцінку рівню технологічних залишкових напруг, а також розподілу залишкових напруг за товщиною детонаційного покриття.

З метою порівняння отриманих значень залишкових напружень в аморфно-кристалічних покриттях системи Zr-Al-B визначено і проаналізовано величину та характер розподілу залишкових напружень за товщиною зносостійких композиційних покриттів як на основі карбиду вольфраму (WC-Co) так, і заліза типу Fe-Cr-Al-B.

Побудовано криві розподілу напружень по глибині покриття за усередненими даними, отриманими на трьох зразках (Рис. 8). Виявлено, що найменший розкид при випробуваннях мають зразки аморфно-кристалічних покриттів на основі цирконію (крива 3), а найбільший розкид всередині партії відповідає покриттям на основі заліза (крива 1). Зроблено припущення, що малий розкид залишкових напружень обумовлений протіканням активних дифузійних перерозподілів на початковій стадії формування покриттів, що підтверджується результатами структурних і фазових досліджень. Відповідно, для покриттів на основі заліза навпаки, їх матеріали найбільш чутливі до технологічних параметрів напilenня.

Показано, що характер розподілу напружень по товщині істотно залежить від структури матеріалів, в одних переважають напруження стиснення, в інших - розтягування зі значним зближенням в абсолютних значеннях. Найбільш сприятливим розподілом з точки зору експлуатаційних властивостей володіють аморфно-кристалічні покриття на основі цирконію, на поверхні яких існують напруження стиснення величиною до 130 МПа, що монотонно зменшуються по товщині, і на глибині близько 150 мкм наближаються до нуля. У покриттях на

основі карбіду вольфраму (крива 2) також спостерігаються напруження стиснення, проте величина їх майже в два рази менше, і на глибині 200 мкм вони також прямують до нуля.

Крім того, необхідно відзначити, що загальний характер розподілу напружень в даних покриттях досить однотипний, тобто існують деякі залишкові напруги на поверхні, що зменшуються по глибині. У більшості випадків експлуатації слід прагнути до напруження стиснення в покриттях як найбільш безпечних.

Важливим фактором, що впливає на залежність експлуатаційних властивостей аморфно-кристалічних покриттів є величина, знак та характер розподілу макронапружень в них, що обумовлюється товщиною напилених аморфізованих покриттів.

Показано, що однією з найбільш доступних і ефективних в умовах виробництва технологічних операцій мінімізації залишкових напружень, яка не потребує дорогого обладнання, а безпосередньо пов'язана з наявністю технології є термічна обробка, а саме, відпал, в результаті якого змінюється їх величина і характер розподілу. Зміна рівня і розподілу напружень в результаті термічної обробки тим помітніше, чим вище температура відпалу. Відпал досліджуваної партії зразків проведено при температурах 250°C і 300°C.

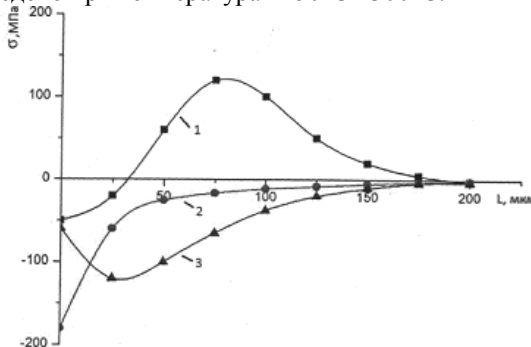


Рис. 8. Розподіл залишкових напружень по глибині покриття: 1 - на основі Fe, легованого Cr, Al, B; 2 - що містять WC типу BK15; 3 - аморфної системи Zr-Al-B.

Характер розподілу залишкових напружень після відпалу при температурі 250°C представлений на рис.9. Глибина залягання залишкових напружень в основному відповідає товщині покриттів. Поле розподілу залишкових напружень після відпалу при температурі 300°C змінюється ще більше. Величина напружень продовжує зменшуватися, і їх розподіл переходить в напруження стиску.

Доведено, що термічна обробка зразків при різних температурах призводить до перерозподілу залишкових напружень в покриттях. Зі збільшенням температури відпалу характер розподілу залишкових напружень якісно змінюється. Спостерігається помітне зменшення залишкових напружень спочатку в більш товстих покриттях, а потім і в більш тонких, і напруження з розтягувальних переходять в напруження стиску, але при цьому втрачається близько 15% аморфної фази.

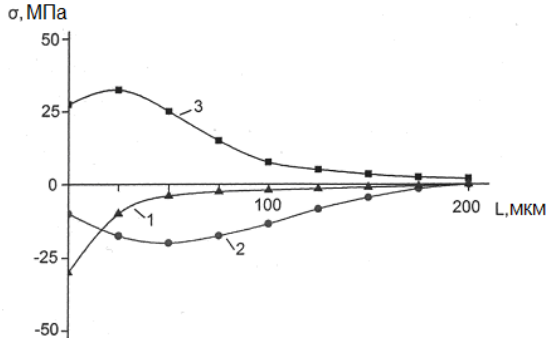


Рис. 9. Епюри розподілу напружень по глибині покриттів Zr-Al-B після відпалу (250°C):  
1 – 150 мкм; 2 – 250 мкм; 3 – 350 мкм.

Важливою характеристикою стану працездатності поверхневих шарів деталей з покриттями є внутрішні напруження. Так, внутрішні напруження розтягування знижують тимчасовий опір, а напруження стискування можуть збільшувати втомну міцність. Аналогічно діють внутрішні напруження на межу витривалості.

На підставі проведених випробувань можна зробити висновок, що в поверхневих шарах основи зміцнених шляхом детонаційного напilenня аморфно-кристалічних покриттів, в останніх виникають залишкові напруження, які за своєю абсолютною величиною і розподілом є безпечними з точки зору його надійності.

Проведено випробування з визначення оптимальної товщини аморфно-кристалічних покриттів, що відповідає максимальній зносостійкості, в результаті яких доведено, що оптимальна товщина аморфно-кристалічного покриття, яка сприяє найменшому зносу, лежить в межах 150-200 мкм. На рис. 10. наведені результати досліджень інтенсивності зношування аморфно-кристалічних покриттів оптимальної товщини (пара Zr-Al-B – сталь 45), які пройшли відпал при температурі 250°C протягом 30 хв. (крива 1) з послідовним повільним охолодженням, а також аналогічних покриттів перед термічною обробкою (крива 3).

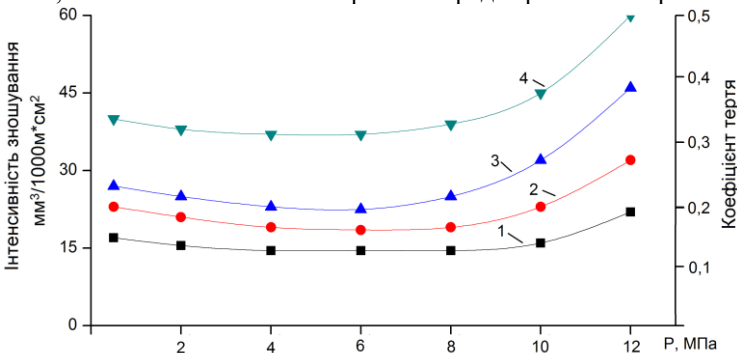


Рис. 10. Залежність інтенсивності зношування і коефіцієнту тертя:  
1,2 – після термічної обробки; 3,4 – перед термічною обробкою.



За результатами експериментальних досліджень встановлено, що аморфно-кристалічні покриття після термічної обробки (відпалу) мають більш ніж у 2,5 рази меншу інтенсивність зношування, ніж ті ж покриття без термічної релаксації. Таким чином, можна значно знизити залишкові напруження, які мають негативний вплив на зносостійкість аморфно-кристалічних покриттів, шляхом термічної обробки, що має позитивний вплив на їх експлуатаційну надійність.

При цьому слід зауважити, що для підвищення експлуатаційної надійності слід контролювати, щоб при нанесенні покриттів на поверхню деталей рівень залишкових технологічних напружень був мінімальний.

Показано, що залишкові напруження з урахуванням їх природи і конкретної схеми навантаження можна регулювати за рахунок, по-перше, управління температурно-кінетичними параметрами напилювання; при оптимізації технологічного процесу формування зносостійких покриттів; по-друге, узгодженням властивостей компонентів композиційних покриттів, а також застосуванням термічної обробки у вигляді відпалу з повільним охолодженням з піччю; по-третє, застосуванням композиційних покриттів з оптимальною товщиною.

### **ВИСНОВКИ**

В результаті виконання дисертаційної роботи вирішено важливе науково-прикладне завдання підвищення зносостійкості і ресурсу відновлюваних деталей авіаційної наземної техніки, а також одержанні нових теоретичних узагальнень і практичних результатів в питаннях формування аморфно-кристалічних покриттів.

Основними науковими та практичними результатами дисертаційного дослідження є:

1. Створено і випробувано композиційні аморфно-кристалічні зносостійкі покриття на основі Zr. Як легуючі елементи, які сприяють аморфізації матричної фази та реалізації механізмів зміцнення, застосовано Al та В.

2. Досліджено закономірності процесів тертя та зношування розроблених аморфно-кристалічних композиційних покриттів. Встановлено у всьому діапазоні випробувань, наближених до реальних умов експлуатації, високі зносостійкі властивості зазначених покриттів, що у порівнянні зі зразками, отриманими на базі карбіду вольфраму та покриттів на основі нікелю, перевищують у 2-2,5 рази.

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 важкоактивованій комплекс вторинних структур у вигляді простих оксидів та сполук типу шпінелі на основі Al, В, що блокують адгезійно-молекулярну взаємодію і запобігають розвитку процесу захоплення.

4. Розроблено математичну модель для формування аморфно-кристалічних покриттів, що відтворює закономірності технологічних і експлуатаційних властивостей в умовах детонаційно-газового напилення.

5. Вивчено за допомогою сучасної електронної мікроскопії і рентгенофазового аналізу структурний склад досліджуваних покриттів, в результаті чого встановлено однорідність градієнту хімічного складу по глибині від поверхні.

6. Вивчено вплив основних технологічних параметрів, що характеризують детонаційне напилення, на формування покриттів та їх фізико-механічні характеристики. Отримані результати використані при технології напилення, що дозволило оптимізувати технологічний процес.

7. На основі аналізу експериментальних досліджень визначено глибину завантаження порошкових матеріалів, її вплив на особливості нагріву, встановлення дистанції напилення, розкрито вплив швидкості частинок і температури порошоків, а також вплив робочої суміші на міцність зчеплення з підложкою.

8. Досліджено закономірності впливу залишкових напруг на зносостійкість аморфно-кристалічних покриттів, при цьому визначено температурний режим мінімізації величин розподілу глибини залягання залишкових напружень. Доведено, що покриття з мінімізованими залишковими напружками за рахунок термообробки мають зносостійкість більшу майже у 2 рази.

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

10. На підставі проведених досліджень розроблено технологію нанесення досліджуваних покриттів та рекомендації щодо підвищення експлуатаційної надійності деталей, зміцнених покриттями системи Zr-Al-B.

### **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

#### Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Харченко Е.В. Износостойкость аморфно-кристаллических покрытий на основе циркония / Е.В. Харченко, В.В. Щепетов // Проблемы техники: наук.-вир. журн.–О.: Вид-во ОНМУ. – 2012. – №4. – С. 103-108.

2. Харченко Е.В. Технологические факторы формирования аморфных детонационных покрытий системы Zr-Al-B / Е.В.Харченко // Проблемы тертя та зношування. – 2013.–№ 59.–С.98-103.

3. Харченко Е.В. Влияние технологических параметров детонационного напыления на структуру покрытий Zr-Al-B и степень их аморфизации / Е.В.Харченко, С.С.Бись // Вісник ХНУ: наук. журн. – 2013. – Вип.5. – С.75-77.

4. Харченко Е.В. Трехослойность детонационных аморфно-кристаллических покрытий Zr-Al-B при нагружении трением / Е.В.Харченко, С.С.Бись // Вісник ХНУ. – 2013. – №6. – С24-27.

5. Бабак В.П. Изнашивание детонационных аморфно-кристаллических покрытий при нагружении трением / В.П. Бабак, Я.Н. Гладкий, Е.В. Харченко, В.В. Щепетов // Проблемы трибології. – 2014. – №3. – 28-34.

6. Features of Formation Stress State of Amorphized Detonation Coatings of the Zr-Al-B Systems / М. Pashechko , О. Kharchenko , V. Shchepetov , К. Lenik , Y. Gladkiy // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2019. – V.13. – Is. 2. – P. 46-50. SCOPUS

#### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Харченко О.В. Формування аморфних покриттів Zr-Al-B при нанесенні детонаційно-газовим методом / О.В.Харченко // Матеріали XI МНТК „АВІА-2013”. – 2013. – Т3. – С.15.5-15.8.

8. Харченко О.В. Структурообразование детонационных покрытий системы Zr-Al-B / О.В.Харченко // Матеріали 4-ї МК HighMatTech. – 2013. – С.330.

9. Харченко О.В. Аморфно-кристаллические детонационные покрытия Zr-Al-B в условиях трения / О.В.Харченко // Матеріали МНТК „Сучасні проблеми машинознавства”. – 2013. – С.10.

10. Харченко Е.В. Сопротивление износу аморфно-кристаллических детонационных покрытий системы Zr-Al-B / Е.В.Харченко // Матеріали 8-ї МК „Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий”. – 2014. – С.94.

11. Kharchenko O.V. Regulregularities of friction and wear amorphouscrystalline coating on the basis of zirconium / O.V. Kharchenko// THE SIXTH WORLD CONGRESS „AVIATION IN THE XXI-st CENTURY”. – 2014. – P.1.1.56-1.1.59.

12. Kharchenko O.V. Tribological problems of efficiency of machine parts / O.V. Kharchenk o// The Fourteenth International Conference of Science and Technology „AVIA-2019”. – 2019. – С.17.35-17.38.

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

13. Патент № 82902 України. Зносостійкий аморфний матеріал на основі цирконію; С22С 16/00/ Харченко О.В., Щепетов В.В., Яковлева М.С., Більчук Є.Ю., Євсюков Є. Ю.// Заявл. від 27.08.2013; Бюл.№ 16.

## АНОТАЦІЯ

**Харченко О.В. Закономірності опору зносу аморфно-кристалічних покриттів системи Zr-Al-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. – Національний авіаційний університет, Київ, 2020.

Робота присвячена встановленню закономірностей формування напруженого стану, тертя та зношування аморфно-кристалічних покриттів в парах тертя.

У роботі наведено закономірності формування аморфно-кристалічних покриттів. Обґрунтовано вибір компонентів та підбрано основні технологічні параметри формування аморфно-кристалічних покриттів Zr-Al-B.

На базі розрахунково-теоретичних методик прогнозування структурного стану газотермічних покриттів і, зокрема, детонаційно-газових, які засновані на аналізі діаграм стану в єдиному температурно-часовому полі визначені основні технологічні чинники наплення покриттів з аморфною структурою.

Показано результати дослідження впливу технологічних параметрів на формування аморфно-кристалічних покриттів та закономірностей зношування покриттів Zr-Al-B при навантаженні тертям.

Встановлено, що зміна принципу подачі порошкового матеріалу в ствол установки дозволяє досягати збільшення кількості аморфної фази в структурі покриття до 80%. Отриманий результат зумовлений змінами взаємного термічного впливу напилованих частинок в процесі формування детонаційних покриттів, так при поздовжній подачі порошку забезпечується більш висока ступінь аморфізації структури матеріалу, ніж при поперечній.

Показано результати досліджень рівня напруженого стану аморфно-кристалічних покриттів системи Zr-Al-B. Дано оцінку рівню технологічних залишкових напруг, а також розподілу залишкових напруг по товщині детонаційного покриття.

Були визначені і проаналізовані величина і характер розподілу залишкових напружень по товщині зносостійких композиційних покриттів як на основі карбиду вольфраму (WC-Co) і заліза типу Fe-Ni-Al-B, а також аморфного покриття системи Zr-Al-B.

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

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

**Ключові слова:** аморфно-кристалічні композиційні покриття, тертя, зношування, технологічні та експлуатаційні параметри, пари тертя.

Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані в 13 наукових працях.

## АНОТАЦІЯ

**Харченко Е.В. Закономерности сопротивления износу аморфно-кристаллических покрытий системы Zr-Al-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. - Национальный авиационный университет, Киев, 2020.

Работа посвящена установлению закономерностей формирования напряженного состояния, трения и износа аморфно-кристаллических покрытий в парах трения.

В работе приведены закономерности формирования аморфно-кристаллических покрытий. Обоснован выбор компонентов и подобраны основные технологические параметры формирования аморфно-кристаллических покрытий Zr-Al-B.

На базе расчетно-теоретических методик прогнозирования структурного состояния газотермических покрытий и, в частности, детонационно-газовых, основанные на анализе диаграмм состояния в едином температурно-временном

поле определены основные технологические факторы напыления покрытий с аморфной структурой.

Показаны результаты исследования влияния технологических параметров на формирование аморфно-кристаллических покрытий и закономерностей износа покрытий Zr-Al-B при нагрузке трением.

Установлено, что изменение принципа подачи порошкового материала в ствол установки позволяет достигать увеличения количества аморфной фазы в структуре покрытия до 80%. Полученный результат обусловлен изменениями взаимного термического влияния напыляемых частиц в процессе формирования детонационных покрытий, так при продольной подачи порошка обеспечивается более высокая степень аморфизации структуры материала, чем при поперечной.

Приведены результаты исследования трения и износа аморфно-кристаллических покрытий при отсутствии смазочного материала. Представлены результаты исследований физико-механических свойств детонационных покрытий на основе циркония, легированного алюминием и бором.

Установлено, что варьирование содержания компонентов покрытия обуславливает изменения физико-механических свойств поверхностной зоны и оптимальное содержание компонентов соответствующее максимальному значению показателей поверхностной прочности при трении, соответствует соотношению (мас.%) Zr - 60%, Al - 25%, B - 12%. При этом рассчитаны для испытуемых покрытий: значение предела текучести ( $\sigma_T$ ), модуля Юнга (E) и степени деформационного упрочнения (m) превышают предельные значения для аморфных сплавов ( $E = 180000 \text{ Н / мм}^2$  и  $m = 2,5$ ), что подтверждает присутствие в структуре материала нанокристаллических фаз.

Показаны результаты исследований уровня напряженного состояния аморфно-кристаллических покрытий системы Zr-Al-B. Дана оценка уровню технологических остаточных напряжений, а также распределения остаточных напряжений по толщине детонационного покрытия.

Были определены и проанализированы величина и характер распределения остаточных напряжений по толщине износостойких композиционных покрытий как на основе карбида вольфрама (WC-Co) и железа типа Fe-Ni-Al-B, а также аморфного покрытия системы Zr-Al-B.

Проведенные аттестационные испытания, которые показали, что предложенные покрытия для поверхностного упрочнения деталей при сравнении с материалами, которые применяются при восстановлении подвижных составляющих авиационной техники, обладают повышенной износостойкостью в 1,5-2 раза.

На основании проведенных исследований разработана технология нанесения исследуемых покрытий и рекомендации по повышению эксплуатационной надежности деталей, упрочненных покрытиями системы Zr-Al-B.

**Ключевые слова:** аморфно-кристаллические композиционные покрытия, трение, износ, технологические и эксплуатационные параметры, пары трения.

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 13 научных работах.

## ANNOTATION

**Kharchenko O.V. Wear resistance regulations of the Zr-Al-B system amorphous crystalline coatings.** – The manuscript.

The thesis for obtaining a candidate of engineering degree in major 05.02.04 - machine friction and wear. - National Aviation University. - Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to establishing the laws of stress state formation, friction and wear of amorphous crystalline coatings in friction pairs.

The regularities of amorphous crystalline coatings formation are presented in the paper. The choice of components is substantiated and the basic technological parameters of formation of Zr-Al-B amorphous crystalline coatings are selected.

On the basis of the calculation-theoretical methods for predicting the structural state of gas-thermal coatings and detonation-gas ones, in particular, based on the analysis of state diagrams in a single temperature-time field, the main technological factors of coating sputtering with amorphous structure are determined.

The results of studying the influence of technological parameters on the formation of amorphous crystalline coatings and patterns of Zr-Al-B coatings wear under friction loading are shown.

It was found that the change in the principle of powder material supply to the barrel of the installation allows to achieve 80% increase in the amount of amorphous phase in the coating structure. The result is due to the changes in the mutual thermal action of the deposited particles during the formation of detonation coatings, so the longitudinal flow of powder provides a higher degree of amorphization of the structure of the material than the transversal one.

The results of studies of the level of stress state of the Zr-Al-B system amorphous crystalline coatings are shown. The level of technological residual stresses, as well as the distribution of residual stresses over the thickness of the detonation coating are estimated.

The magnitude and nature of the residual stress distribution over the thickness of the wear-resistant composite coatings were determined and analyzed on the basis of tungsten carbide (WC-Co) and Fe-Ni-Al-B iron, as well as the amorphous coating of the Zr-Al-B system.

The certification tests conducted showing that the coatings proposed for surface hardening of parts are 1.5-2 times more durable as compared with the materials used in restoration of movable components aeronautical engineering.

Based on the conducted research, the technology of depositing the coatings investigated and recommendations for improving the operational reliability of the parts strengthened by the Zr-Al-B system coatings were developed.

**Keywords:** amorphous crystalline composite coatings, friction, wear, technological and operational parameters, friction pairs.

The main results of the research have been published in 13 scientific papers.