

УДК 621.793.71

doi: 10.32620/aktt.2026.4sup1.17

Н. В. САВЧЕНКО, О. В. ШОРИНОВ, А. О. ВОЛКОВ, Д. О. БІЛАН

*Національний аерокосмічний університет
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна*

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНИХ ХОЛОДНИМ ГАЗОДИНАМІЧНИМ НАПИЛЮВАННЯМ, В УМОВАХ ДІЇ ВІЛЬНИМ АБРАЗИВОМ

Об'єктом дослідження є закономірності абразивного зношування композиційних покриттів, отриманих холодним газодинамічним напилюванням (ХГН). **Метою роботи** є підвищення зносостійкості деталей з титанових сплавів в умовах дії вільним абразивом шляхом нанесення композиційних покриттів на основі системи $Ni-Al_2O_3$ з додаванням порошків карбідів методом ХГН. Для досягнення мети **вирішено наступні задачі**: 1) отримано покриття на основі нікелю з додаванням порошків карбідів вольфраму (WC), карбіду бору (B_4C) і карбіду кремнію (SiC) на зразках із титанового сплаву BT9 методом ХГН; 2) досліджено закономірності зношування підготовлених зразків з покриттями в умовах дії вільним абразивом з визначенням втрати маси та зміни товщини й порівнянням із даними для зразків без покриттів. **Використані методи**: формування покриттів здійснювалося методом ХГН із використанням установки ДИМЕТ-405. Для напилювання покриттів було обрано порошкову суміш на основі нікелю з додаванням оксиду алюмінію, в яку додавали порошки вольфраму, карбіду бору й карбіду кремнію. Напилювання покриттів проводили на підготовлені зразки з титанового сплаву BT9. Трибологічні випробування проводилися за методикою ASTM G65 на спеціалізованому стенді, що моделює умови тертя об нежорстко закріплений абразив. Для аналізу використовувався кварцовий пісок зернистістю 250-500 мкм і гумовий ролик твердістю 60 за Шором А. Стійкість покриттів до зношування оцінювалася за втратою маси зразків шляхом зважування на лабораторних вагах із точністю 0,001 г. **Висновки**. Встановлено, що нанесення композиційних покриттів дає змогу суттєво підвищити зносостійкість поверхонь з титанового сплаву BT9. Додавання 30% порошку карбідів (WC, B_4C , SiC) до порошкової суміші $Ni-Al_2O_3$ забезпечує зменшення втрати маси на 25,0% відносно покриттів без карбідного зміцнення та на 71,2% відносно зразків зі сплаву BT9 без покриттів. Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей абразивного зношування композиційних покриттів системи $Ni-Al_2O_3$ з карбідним зміцненням, отриманих методом холодного газодинамічного напилювання, в умовах дії вільного абразиву.

Ключові слова: абразивна зносостійкість; зносостійкі покриття; тертя; зношування; композиційні покриття; титановий сплав; поверхнева обробка; ресурс.

1. Вступ

1.1. Мотивація

Надійність технічних систем в авіації та машинобудуванні значною мірою визначається станом поверхонь деталей, що працюють в умовах тертя та зношування. Одним із найбільш поширених видів руйнування є абразивний знос, спричинений дією пилу, піску або твердих частинок продуктів зношування, який призводить до втрати геометричних розмірів, погіршення експлуатаційних характеристик і передчасного виходу деталей з ладу [1]. Особливо гостро ця проблема проявляється під час експлуатації авіаційної техніки на ґрунтових аеродромах, де елементи шасі та інші вузли піддаються інтенсивному впливу вільного абразиву. У зв'язку з цим актуальним є розроблення ефективних захисних покриттів, здатних підвищувати зносостійкість деталей без суттєвого термічного впливу на матеріал основи. Одним із перспективних

способів вирішення цієї проблеми є холодне газодинамічне напилювання, яке дозволяє формувати щільні покриття зі збереженням структури вихідних матеріалів та мінімізацією процесів окиснення.

1.2. Сучасний стан проблеми

Надійність авіаційної та наземної техніки критично залежить від зносостійкості вузлів тертя, які в процесі експлуатації піддаються абразивному зношуванню, задиранню та фреттинг-корозії. Дослідження холоднонапилюваних покриттів із чистих міді та титану показали їхню високу стійкість до фреттингового зношування та подряпин, що підтверджує перспективність використання ХГН для деталей, які працюють в умовах циклічних контактних навантажень [2]. Традиційно для захисту використовують електроіскрове легування [3, 4], плазмове напилення [5] та високошвидкісне газополуменеве напилення (HVOF) [6]. Проте ці



методи мають обмеження, пов'язані з термічним впливом на підкладку, окисненням порошків і виникненням залишкових розтягувальних напружень.

Холодне газодинамічне напилювання (ХГН) виступає як ефективна альтернатива, оскільки формування покриття відбувається в твердому стані при температурах, значно нижчих за точку плавлення. Це дозволяє уникати окиснення, фазових перетворень та зберігати властивості вихідних порошків. Технологія ХГН продемонструвала відмінні результати при нанесенні чистих металів (Al, Cu, Zn, тощо) для відновлення розмірів деталей і антикорозійного захисту. Дослідження зносостійких покриттів для деталей з авіаційних титанових сплавів підтвердили перспективність застосування ХГН для підвищення довговічності елементів авіаційної техніки [7]. Крім того, встановлено, що нікелеві покриття, сформовані на титанових сплавах методом ХГН, характеризуються щільною мікроструктурою та покращеними експлуатаційними властивостями, що розширює можливості використання цієї технології для відновлення та зміцнення відповідальних деталей [8].

Для підвищення абразивної зносостійкості м'яких матриць (зокрема алюмінію та цинку) сучасні дослідження зосереджені на створенні композиційних покриттів. До алюмінієвої або нікелевої матриці додають тверді частинки оксидів (Al_2O_3), карбідів (WC, SiC, B_4C), нітридів (TiN) [9] або квазікристалів [10]. Встановлено, що тверді включення не лише армують матрицю, але й забезпечують додатковий ефект наклепу під час удару, що призводить до подрібнення зерен та зростання мікротвердості.

Незважаючи на переваги, покриття ХГН часто мають високу крихкість і надлишкову пористість. Для покращення їхніх властивостей застосовують різні методи пост-обробки. Наприклад, термічна обробка (відпал) сприяє рекристалізації та перетворенню механічних зв'язків у металургійні. Механічна обробка, така як фрикційне перемішування або дробострумінне зміцнення, дозволяє гомогенізувати структуру та усунути дефекти. Комбіновані методи, наприклад, плазмове електролітичне окиснення, значно підвищують твердість поверхневого шару [11].

Оцінка абразивної зносостійкості в сучасній практиці найчастіше проводиться за стандартом ASTM G65 (схема «гумовий ролик – сухий пісок») [12], що дозволяє з високою відтворюваністю ранжувати матеріали та прогнозувати їхній ресурс у реальних умовах експлуатації. Ця методика є найбільш критичною для м'яких пластичних покриттів, оскільки вона точно моделює умови зношування вільним абразивом (кварцовим піском), за яких основними механізмами деградації є мікрорізання та мікрооорання поверхні. Дослідження показують, що зі збільшенням навантаження та тривалості контакту меха-

нізм руйнування еволюціонує від первинної пластичної деформації до втомного відшарування фрагментів покриття та утворення мережі мікротріщин [5].

Аналіз наукових джерел останніх років свідчить, що ключовими напрямками розвитку технологій холодного газодинамічного напилювання є створення нових металокерамічних та інтерметалідних систем, а також оптимізація міжфазної взаємодії компонентів покриття [13]. Разом із тим, питання впливу карбідних зміцнювальних фаз на абразивну зносостійкість композиційних покриттів системи Ni- Al_2O_3 , отриманих методом ХГН, висвітлені в літературі недостатньо.

З огляду на це, виникає необхідність підвищення зносостійкості деталей із титанових сплавів, що працюють в умовах абразивного впливу піску та пилу. Перспективним способом вирішення цієї проблеми є формування методом ХГН композиційних покриттів на основі системи Ni- Al_2O_3 , армованих частинками карбідів WC, B_4C та SiC. Таким чином, встановлення закономірностей абразивного зношування таких покриттів та визначення ефективності різних зміцнювальних компонентів є важливим завданням для підвищення довговічності вузлів авіаційної техніки, зокрема елементів шасі повітряних суден.

1.3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є підвищення зносостійкості деталей з титанових сплавів в умовах дії вільним абразивом шляхом нанесення композиційних покриттів на основі системи Ni- Al_2O_3 з додаванням порошків карбідів методом ХГН.

Для досягнення мети вирішено наступні задачі:

1) отримано покриття на основі нікелю з додаванням порошків карбідів вольфраму (WC), карбиду бору (B_4C) і карбиду кремнію (SiC) на зразках з титанового сплаву BT9 методом ХГН;

2) досліджено закономірності зношування підготовлених зразків з покриттями в умовах дії вільним абразивом з визначенням втрати маси та зміни товщини та порівнянням із даними для зразків без покриттів.

Стаття структурована таким чином: у розділі 2 наведено матеріали та методи дослідження; у розділі 3 подано результати досліджень абразивної зносостійкості покриттів; у розділі 4 узагальнено висновки по роботі та запропоновано подальший напрямок досліджень.

2. Матеріали і методи досліджень

2.1. Матеріали та режими напилювання

Для напилювання покриттів використовували порошкові суміші, склад яких зазначено в таблиці 1. Основою сумішей, отриманих механічним змішуванням протягом 30 хвилин, був порошок Ni + Al_2O_3 , до якого додавалися порошки карбідів.

Підкладкою для покриття слугували пластини з титанового сплаву ВТ9 розміром 50×50 мм і товщиною 1,5 мм.

Таблиця 1

Склад порошкових сумішей

Суміш	Склад, % мас.
1	42% Ni + 28% Al ₂ O ₃ + 30% SiC
2	42% Ni + 28% Al ₂ O ₃ + 30% B ₄ C
3	42% Ni + 28% Al ₂ O ₃ + 30% WC
4	60% Ni + 40% Al ₂ O ₃

Вибір карбідних частинок як зміцнювальної фази зумовлений їх високою твердістю та стійкістю до абразивного зношування. Карбід вольфраму (WC) характеризується високою зносостійкістю та міцністю, карбід бору (B₄C) має одну з найвищих твердостей серед конструкційних матеріалів, а карбід кремнію (SiC) поєднує високу твердість із відносно малою густиною. Це дозволяє оцінити вплив різних типів карбідних зміцнювачів на експлуатаційні характеристики композиційних покриттів.

Мікронізмітки використаних порошків показано на рис. 1.

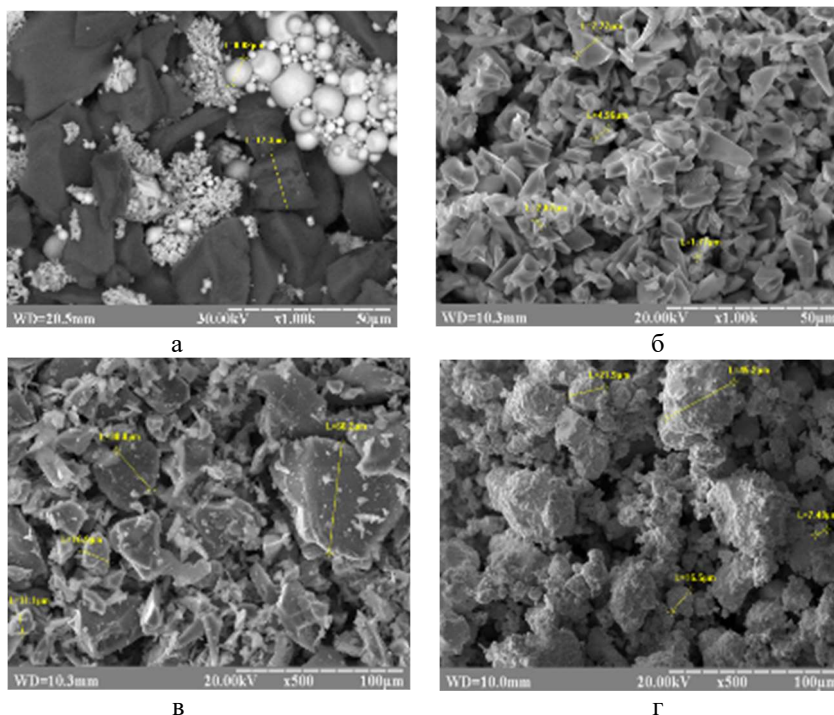


Рис. 1. Мікрофотографії використаних порошків
а – Ni + Al₂O₃; б – SiC; в – B₄C; г – WC

Перед нанесенням покриттів підкладки знежирувалися септилом та активувалися абразивно-струминною обробкою корундом із зернистістю F100 – F320. Після абразивно-струминної обробки параметр шорсткості Rz становив від 20 до 160 мкм.

Покриття наносили за допомогою установки холодного газодинамічного напилання ДИМЕТ-405 (рис. 2) із використанням режимів напилування, наведених у таблиці 2.



Рис. 2. Установка ХГН ДИМЕТ-405

Таблиця 2

Режими напилування	
Параметр	Значення
Тиск гальмування газу, МПа	0,8
Температура гальмування газу, °C	650
Витрата порошку, г/с	0,5
Швидкість сканування, мм/с	30
Дистанція напилування, мм	15

Після нанесення покриття поверхня додатково фрезерувалася для забезпечення площини контакту.

2.2. Методика дослідження абразивної зносостійкості

Випробування на абразивне зношування проводили відповідно до вимог ASTM G65 за схемою «гумовий ролик – сухий пісок» [1] (рис. 3). Використовувався кварцовий пісок (SiO₂) зернистістю F40–F60.

Пісок вводився між випробувальним зразком і обертовим колесом з хлорбутиловою гумовою шиною твердістю 60 од. за Шором А. Перед випробуванням пісок просушували в електричній печі. Зразок притискався до колеса з силою 130 Н за допомогою важеля протягом 30 хв за постійної частоти обертання колеса 200 ± 10 об/хв. Контактна поверхня колеса рухалася в напрямку потоку абразиву. Подача піску здійснювалася з витратою 300 г/хв. Випробування розпочинали лише після встановлення рівномірного потоку абразиву.

Товщину покриттів до та після випробувань вимірювали субмікронним конусним мікрометром Sylvac S_Mike PRO з дискретністю відліку 0,001 мм. На кожному зразку виконували три вимірювання вздовж доріжки тертя з кроком 3 мм. Середнє значення величини зносу покриття обчислювали за формулою

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

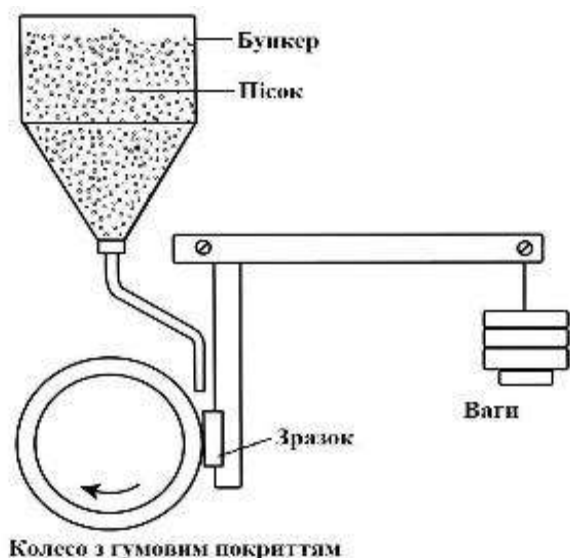


Рис. 3. Принципова схема установки.

де x_i – результат i -го вимірювання;

n – кількість вимірювань.

Для визначення втрати маси зразки до та після випробувань зважували на лабораторних вагах LOSSO CX-128 з точністю 0,001 г.

Оцінку зносостійкості здійснювали за величиною втрати маси та зміною товщини покриття після випробувань. Для підвищення достовірності результатів усі вимірювання проводили для трьох зразків, після чого визначали середні значення досліджуваних параметрів. Отримані результати використовували для порівняльної оцінки ефективності різних карбідних наповнювачів у складі композиційних покриттів.

3. Результати й обговорення

У цьому розділі наведено результати експериментального дослідження абразивної зносостійкості композиційних покриттів, отриманих методом ХГН. Оцінювання експлуатаційних характеристик проводилося шляхом порівняння втрати маси та зміни товщини покриттів після випробувань за стандартом ASTM G65. Особлива увага приділена впливу карбідних наповнювачів WC, B₄C та SiC на механізми зношування та загальну зносостійкість системи покриття-основа.

На рис. 4 показано установку для проведення випробувань на абразивне зношування за схемою «гумовий ролик – сухий пісок» відповідно до ASTM G65.



Рис. 4. Установка для проведення досліджень на абразивне зношування вільним абразивом

На рис. 5 представлено зовнішній вигляд зразків з композиційними покриттями до та після випробувань на абразивну зносостійкість.

Можна бачити, що після тестування спостерігаються сліди інтенсивного абразивного впливу у вигляді подряпин, борозен і часткового видалення поверхневого шару, що є характерним для механізму мікрорізання та мікроорання.

Для більш наочного порівняння на рис. 6 наведено зовнішній вигляд зразка з титанового сплаву BT9 без покриття після випробувань на абразивну зносостійкість, що дозволяє чітко виділити базовий характер руйнування титанової основи. У цьому випадку спостерігається значно більш інтенсивне пошкодження поверхні у вигляді глибоких борозен, виражених слідів пластичної деформації та активного мікрорізання абразивними частинками. Це свідчить про низьку стійкість незахищеного титану до дії вільного абразиву.

Порівняльний аналіз показує, що характер пошкодження суттєво залежить від типу карбідного наповнювача у складі покриття. Найбільш виражені сліди зношування спостерігаються для зразків без карбідного зміцнення, тоді як композиційні покриття з додаванням WC, B₄C та SiC демонструють більш рівномірне зношування без значного відшарування.

Зменшення інтенсивності руйнування для карбидовмісних покриттів пояснюється високою твердістю частинок зміцнювальної фази, які сприймають частину навантаження абразиву та знижують глибину проникнення зерен піску в матрицю покриття.

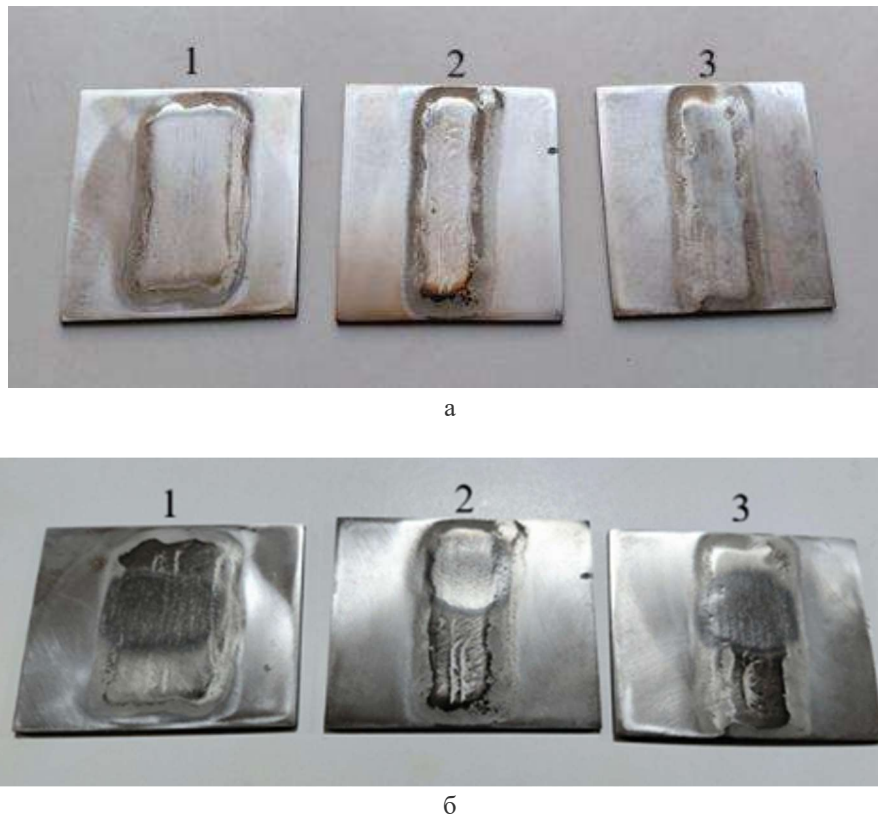


Рис. 5. Зовнішній вигляд зразків з покриттями до (а) та після (б) досліджень на абразивну зносостійкість
1 – покриття Ni + Al₂O₃ + SiC; 2 – покриття Ni + Al₂O₃ + B₄C; 3 – покриття Ni + Al₂O₃ + WC

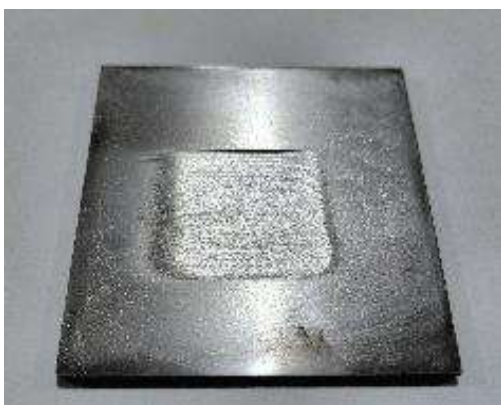


Рис. 6. Зовнішній вигляд зразка з титанового сплаву ВТ9 без покриття після досліджень на абразивну зносостійкість

Крім того, тверді включення сприяють дисперсному зміцненню та стабілізації мікроструктури поверхневого шару. Кількісна оцінка змін маси та товщини досліджуваних зразків після випробувань наведена в таблиці 3, де представлено усереднені значення, отримані за результатами трьох паралельних вимірювань для кожної серії зразків.

Аналіз отриманих даних дозволяє встановити фундаментальні закономірності деградації поверхонь і виявити роль кожного компонента композиції. Низька зносостійкість чистого сплаву ВТ9 ($\Delta m = 0,520$ г) зумовлена високою пластичністю та відносно низькою матричною твердістю титанової основи під локалізованим динамічним тиском твердих зерен кварцу (SiO₂). Абразивні частинки легко впроваджуються вглиб металу, реалізуючи механізм мікрорізання з утворенням стружки та глибоких борозен

орання (рис. 6). Нанесення базового гетерофазного покриття $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$ знижує втрату маси до 0,200 г. У цьому випадку пластикна нікелева матриця забезпечує демпфування ударів абразиву, а включення оксиду алюмінію (Al_2O_3) виступають як первинні бар'єри. Крім того, в процесі ХГН частинки Al_2O_3 за рахунок високої кінетичної енергії здійснюють інтенсивний наклеп нікелевої матриці, підвищуючи її щільність та мікротвердість шляхом дислокаційного зміцнення. Найвищий опір зношуванню продемонстрували трикомпонентні системи з додаванням 30% карбідів, де втрата маси зменшилась на 25% відносно базового покриття та на 71,2% відносно основи. Фізичний механізм такого захисту базується на ефекті «тіньового екранування». Тверді карбідні частинки, закріплені в пластикній Ni -матриці, виступають над її поверхнею на мікрорівні та приймають на себе пряму стиральну дію рухомого кварцового піску. Оскільки твердість карбідів ($\text{WC} \approx 18\text{--}22$ ГПа, $\text{SiC} \approx 28\text{--}33$ ГПа, $\text{B}_4\text{C} \approx 35\text{--}40$ ГПа) суттєво перевищує твердість кварцового абразиву ($\approx 10\text{--}12$ ГПа), мікрорізання самих зміцнювальних фаз стає енергетично утрудненим. Замість зрізання матеріалу відбувається сколювання або затуплення вершин абразивних зерен піску.

Проте аналіз таблиці 3 виявляє важливу аномалію: попри те, що карбід бору (B_4C) майже вдвічі твердіший за карбід вольфраму (WC), показники лі-

нійного зносу ($\Delta h = 0,170$ мм) для всіх трьох карбідних покриттів виявилися однаковими, а різниця за втратою маси (Δm) між ними є мінімальною (в межах 0,140–0,160 г). Це пояснюється двома факторами:

1. Крихке руйнування надтвердих фаз. Надзвичайно тверді карбіди (B_4C та SiC) мають низьку трищинистікість (K_{Ic}). Під дією нормального навантаження у 130 Н від гумового ролика та циклічних ударів піщинок, ці частинки частково розтріскуються та кришаться на мікрорівні. Водночас WC є більш в'язким, що компенсує його меншу твердість.

2. Когезійна міцність зв'язку «матриця-частинка». У технології ХГН утримання частинок відбувається суто за рахунок механічного зачеплення та адгезії під час пластичної деформації нікелю. Важкі та міцні частинки WC за рахунок більшої маси та імпульсу при ударі глибше й міцніше інкорпуються в нікелеву матрицю. Карбіди B_4C і SiC , маючи меншу густину, утримуються матрицею трохи гірше, і під тривалим впливом абразиву може відбуватися їхнє часткове «вистришування» разом із вимиванням м'якої нікелевої зв'язки навколо них.

Таким чином, інтегральна зносостійкість композиту при ХГН визначається не лише абсолютною твердістю карбіду, а балансом між твердістю наповнювача, його крихкістю та міцністю його механічного утримання пластикною матрицею.

Таблиця 3

Результати досліджень на абразивне зношування вільним абразивом
(середні результати)

Стан поверхні	h до, мм	h після, мм	Δh , мм	m до, г	m після, г	Δm , г	Δm , %
$\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$	2,120	1,950	0,170	19,210	19,050	0,160	0,83
$\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{B}_4\text{C}$	2,110	1,940	0,170	19,100	18,960	0,140	0,73
$\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{WC}$	2,130	1,960	0,170	19,350	19,200	0,150	0,78
$\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (без карбідів)	2,100	1,900	0,200	18,900	18,700	0,200	1,060
Без покриття (BT9)	1,500	1,320	0,180	17,250	16,730	0,520	3,02

Висновки

У роботі досліджено абразивну зносостійкість композиційних покриттів системи $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$, отриманих методом ХГН на титановому сплаві BT9, в умовах дії вільного абразиву за методикою ASTM G65. Встановлено, що формування покриттів дозволяє суттєво підвищити зносостійкість титанового сплаву порівняно з незахищеним станом. При цьому введення карбідної фази (WC , B_4C , SiC) забезпечує додаткове зниження інтенсивності зношування. Показано, що найвищу зносостійкість мають

композиційні покриття з карбідним зміцненням, що пов'язано з високою твердістю частинок карбідів, які зменшують глибину проникнення абразиву та інтенсивність мікрорізання поверхні. Додавання 30% карбідів дозволило знизити втрату маси на 25% порівняно з покриттями $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ та на 71,2% порівняно з незахищеним сплавом BT9.

Таким чином, використання композиційних покриттів на основі системи $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ з карбідним зміцненням є ефективним методом підвищення абразивної зносостійкості титанових сплавів, що може бути рекомендовано для елементів авіаційних

конструкцій, які працюють в умовах дії вільного абразиву.

Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення фізико-механічних властивостей покриттів із досліджуваних порошкових сумішей.

Внесок авторів: концептуалізація дослідження, розробка загальної методології, наукова інтерпретація результатів, фінальне редагування рукопису – **О. В. Шорінов**; аналіз літератури, узагальнення висновків – **Н. В. Савченко**; проведення експериментальних досліджень, збір первинних даних – **А. О. Волков**, **Д. О. Білан**; обробка та візуалізація отриманих результатів, написання первісного тексту рукопису – **Н. В. Савченко**, **Д. О. Білан**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій роботі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Gurbanov, N. *Experimental design in the study of wear resistance of polymer composite materials* / N. Gurbanov, K. Ismailova, M. Y. Ashkin // *Functional Materials*. – 2025. – Vol. 32, № 3. – P. 391–397.
2. *Fretting wear and scratch resistance of cold-sprayed pure Cu and Ti* / R. F. Váz, A. Silvello, P. D. Cavalière et al. // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. – 2021. – Vol. 10. – P. 496–513. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00758-2>.
3. Сковорцов, О. О. Дослідження зносостійкості електроіскрових покриттів в умовах впливу абразиву / О. О. Сковорцов, О. О. Мікосьянчик // *Проблеми тертя та зношування*. – 2023. – № 3 (100). – С. 64–72. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895).

4. *Interface microstructure and abrasive wear properties of WC-iron matrix composites with Ni, Mo, Fe added to the preforms* / F. Zhang, H. Gou, W. Zhang et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2024. – Vol. 28. – P. 439–444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.007>.

5. Дослідження зносостійкості плазмових покриттів в умовах абразивного зношування / О. В. Мельник, І. В. Смірнов, В. Ф. Лабунець, А. В. Чорний // *Проблеми тертя та зношування*. – 2020. – № 3 (88). – С. 126–131. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(88\).14928](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(88).14928).

6. *Comparison of microstructure and erosion wear resistance of HVOF and cold sprayed coatings* / A. Keslová, S. Houdková, M. Vostřák, J. Antoš // *29th International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, EU, May 20-22, 2020*. – 6 p. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2020.3551>.

7. *Research on wear resistance coating of aircraft titanium alloy parts by cold spraying technology* / W. Hu, S. Markovych, K. Tan et al. // *Aerospace Technic and Technology*. – 2020. – № 6 (166). – С. 61–71. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2020.6.07>.

8. Мікроструктура та характеристики нікелевих покриттів, отриманих на титановому сплаві холодним газодинамічним напилюванням / О. В. Шорінов, С. О. Поливаний, Н. В. Савченко, Р. С. Інатов // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2025. – № 3 (203). – С. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.3.06>.

9. Chupong, P. *Characterization and sliding wear behavior of low-pressure cold-spray Al-Al₂O₃ and Al-Al₂O₃/TiN composite coatings* / P. Chupong, M. Sukpat, K. Tuchinda // *Metals*. – 2025. – Vol. 15, № 1. – 18 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/met15010051>.

10. *A comparative study on wear resistance of cold-sprayed aluminum/quasicrystal composite coatings* / R. Jafari, J. Cizek, F. Lukac et al. // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2024. – Vol. 33. – P. 705–718. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01758-8>.

11. *Research progress on post-treatment technologies of cold spray coatings* / Y. Huang, H. Li, J. Liu et al. // *Coatings*. – 2025. – Vol. 15, № 3. – 36 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings15030265>.

12. ASTM G65–00. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. – West Conshohocken, PA: ASTM International, 2000. – 11 p.

13. Burlachenko, O. *Cermet powders based on TiAl intermetallic for thermal spraying* / O. Burlachenko, N. Vigilianska, C. Senderowski // *Materials Science Forum*. – 2024. – Vol. 1113. – P. 77–85. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-7riS3B>.

References

1. Gurbanov, N., Ismailova, K., Ashkin, M. Y. *Experimental design in the study of wear resistance of polymer composite materials*. *Functional Materials*, 2025, vol. 32, no. 3, pp. 391–397.

2. Fretting wear and scratch resistance of cold-sprayed pure Cu and Ti. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2021, vol. 10, pp. 496–513. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13632-021-00758-2>
3. Skvortsov, O. O., Mikos'ianchyk, O. O. Doslidzhennya znosostiykosti elektroiskrovnykh pokryttiv v umovakh vplyvu abrazyvu [Study of wear resistance of electrospark coatings under the influence of abrasive]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Problems of Friction and Wear*, 2023, no. 3(100), pp. 64–72. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(100\).17895](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(100).17895) (In Ukrainian).
4. Zhang, F., Gou, H., Zhang, W. Interface microstructure and abrasive wear properties of WC-iron matrix composites with Ni, Mo, Fe added to the preforms. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, vol. 28, pp. 439–444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.04.007>
5. Mel'nyk, O. V., Smirnov, I. V., Labunets', V. F., Chornyi, A. V. Doslidzhennya znosostiykosti plazmovykh pokryttiv v umovakh abrazyvnoho znoshuvannia [Study of wear resistance of plasma coatings under abrasive wear conditions]. *Problemy tertia ta znoshuvannia – Problems of Friction and Wear*, 2020, no. 3(88), pp. 126–131. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(88\).14928](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(88).14928) (In Ukrainian).
6. Keslová, A., Houdková, S., Vostřák, M., Antoš, J. Comparison of microstructure and erosion wear resistance of HVOF and cold sprayed coatings. *29th International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, EU, May 20–22, 2020. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.37904/metal.2020.3551>
7. Hu, W., Markovych, S., Tan, K. Research on wear resistance coating of aircraft titanium alloy parts by cold spraying technology. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 6(166), pp. 61–71. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2020.6.07>
8. Shorynov, O. V., Polyvianyich, S. O., Savchenko, N. V., Ipatov, R. S. Mikrostruktura ta kharakterystyky nikelovykh pokryttiv, otrymanykh na tytanovomu splavi kholodnym hazodynamichnym napylyuvannyam [Microstructure and characteristics of nickel coatings obtained on titanium alloy by cold gas-dynamic spraying]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologia – Aerospace technic and technology*, 2025, no. 3(203), pp. 60–68. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2025.3.06> (In Ukrainian).
9. Chupong, P., Sukpat, M., Tuchinda, K. Characterization and sliding wear behavior of low-pressure cold-spray Al-Al₂O₃ and Al-Al₂O₃/TiN composite coatings. *Metals*, 2025, vol. 15, no. 1, art. 51. DOI: <https://doi.org/10.3390/met15010051>
10. Jafari, R., Cizek, J., Lukac, F. A comparative study on wear resistance of cold-sprayed aluminum/quasicrystal composite coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2024, vol. 33, pp. 705–718. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-024-01758-8>
11. Huang, Y., Li, H., Liu, J. Research progress on post-treatment technologies of cold spray coatings. *Coatings*, 2025, vol. 15, no. 3, art. 265. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings15030265>
12. ASTM G65–00. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*. West Conshohocken, PA: ASTM International Publ., 2000. 11 p.
13. Burlachenko, O., Vigilianska, N., Senderowski, C. Cermet powders based on TiAl intermetallic for thermal spraying. *Materials Science Forum*, 2024, vol. 1113, pp. 77–85. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-7riS3B>

Надійшла до редакції 15.06.2026, отримано в доопрацьованому вигляді 27.07.2026.

Дата ухвалення 19.08.2026, дата публікації 03.09.2026

INVESTIGATION OF THE WEAR RESISTANCE OF COMPOSITE COATINGS PRODUCED BY COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING UNDER FREE ABRASIVE CONDITIONS

Nina Savchenko, Oleksandr Shorinov, Andrii Volkov, Dmytro Bilan

The object of the study is the regularities of abrasive wear in composite coatings produced by cold gas dynamic spraying (CGDS). **The aim of the work** is to increase the wear resistance of titanium alloy parts under loose abrasive conditions by applying CGDS composite coatings based on the Ni-Al₂O₃ system, incorporating carbide powders. To achieve this aim, the following **tasks** were solved: 1) nickel-based coatings with the addition of tungsten carbide (WC), boron carbide (B₄C), and silicon carbide (SiC) powders were deposited on VT9 titanium alloy samples using CGDS; 2) the wear regularities of the prepared coated specimens were investigated under loose abrasive conditions, determining mass loss and thickness changes, and comparing them with data for uncoated specimens. **Methods** used: coating formation was carried out by the CGDS method using a DYMET-405 system. A nickel-based powder mixture with the addition of aluminum oxide was selected for coating deposition, into which tungsten, boron carbide, and silicon carbide powders were added. Coating deposition was performed on specimens prepared from VT9 titanium alloy. Tribological testing was conducted in accordance with the ASTM G65 standard on a specialized test rig simulating friction conditions against a non-rigidly fixed abrasive. Quartz sand with a grain size of 250–500 μm and a rubber wheel with a hardness of 60 Shore A were used for the analysis. The wear resistance of the coatings was evaluated by measuring the mass loss of the specimens on laboratory balances with an accuracy of 0.001 g. **Conclusions.** It was established that applying composite coatings significantly increases the wear resistance of VT9 titanium alloy surfaces. The addition of 30% carbide powder (WC, B₄C, SiC) to the Ni-Al₂O₃ powder mixture ensures a 25.0% reduction in mass loss compared to coatings without carbide reinforcement

and a 71.2% reduction compared to uncoated VT9 alloy specimens. The scientific novelty lies in establishing the regularities of abrasive wear of carbide-reinforced Ni-Al₂O₃ system composite coatings obtained by cold gas dynamic spraying under the action of a loose abrasive.

Keywords: abrasive wear resistance; wear-resistant coatings; friction; wear; composite coatings; titanium alloy; surface treatment; service life.

Савченко Ніна Валеріївна – канд. фіз.-мат. наук, доц., зав. каф. вищої математики та системного аналізу, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Шорінов Олександр Володимирович – канд. техн. наук; доц., доц. каф. технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Волков Андрій Олегович – старший викладач каф. технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Білан Дмитро Олексійович – аспірант кафедри технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Nina Savchenko – Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Associate Professor; Head of the Department of Higher Mathematics and System Analysis, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: n.savchenko@khai.edu, ORCID: 0000-0001-8144-9368,

Oleksandr Shorinov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Aircraft Engines Manufacturing Technology, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.shorinov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5057-6679,

Andrii Volkov – Senior Lecturer; Department of Aviation Engine Manufacturing Technology, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.volkov@khai.edu, ORCID: 0000-0002-5899-1252.

Dmytro Bilan – PhD student of the Department of Aircraft Engines Manufacturing Technology of National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: d.o.bilan@khai.edu, ORCID: 0009-0001-4843-2449.