УДК 621.793.7:669.14:620.18 *DOI: 10.15407/Surface.2025.17.264*

МОДИФІКАЦІЯ ПОВЕРХНІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ЛАЗЕРНИМ НАПЛАВЛЕННЯМ КОМПОЗИТІВ: СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА ТРИБОТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

С. В. Кирилаха

Національний університет «Запорізька політехніка»,
вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, 69063, Україна,
e-пошта: lanakirilaha@gmail.com

У роботі представлено огляд сучасних досліджень, присвячених лазерним композитним покриттям для титанових сплавів, які розглядаються як перспективний напрям підвищення їхньої зносостійкості та довговічності в умовах експлуатації. Новизна роботи полягає у систематизації та порівнянні підходів до формування зміцнених шарів на основі титану з використанням лазерного легування, наплавлення та композитних модифікаторів Ni, WC, Ti_3SiC_2, Y_2O_3 та ін.), що дозволяє виявити найбільш ефективні механізми керування мікроструктурою і триботехнічними характеристиками. Метою дослідження є узагальнення експериментальних результатів останніх років щодо впливу лазерних технологій на структуру та властивості титанових сплавів, а також окреслення подальших перспектив їх практичного застосування. Матеріалами для огляду стали публікації провідних дослідників (Fehg, Wang, Yan, ін.), які базуються на результатах трибологічних випробувань, мікроструктурного аналізу та порівняння з альтернативними покриттями. Методологія роботи ґрунтується на критичному аналізі експериментальних даних і зіставленні показників зносостійкості, коефіцієнта тертя та морфології поверхні у різних умовах. Основні результати свідчать, що формування зміцнених шарів з Ni–WC-композитами знижує коефіцієнт тертя титанових сплавів у середньому на 35–40%, а введення самозмащувальних фаз (Ti_3SiC_2, TiC, Ti_5Si_3) додатково підвищує стабільність трибологічних характеристик. Виявлено закономірність, згідно з якою оптимальне поєднання металевої матриці та карбідних фаз дозволяє мінімізувати пластичне деформування та зношування при навантаженнях, характерних для авіаційної і транспортної галузей. У висновках підкреслюється, що лазерні композитні покриття на титановій основі є ефективним засобом підвищення експлуатаційної надійності, однак подальші дослідження мають бути спрямовані на вивчення поведінки таких систем у морському середовищі, за підвищених температур та циклічних навантажень.

Ключові слова: *титанові сплави, лазерні композитні покриття, зносостійкість, трибологія, мікроструктура, $Ni-WC$; Ti_3SiC_2, лазерне наплавлення, модифікація поверхні, адитивні технології.*

ВСТУП

Лазерне наплавлення (Laser Cladding, LC) є високоточною адитивною технологією поверхневої обробки, яка дозволяє створювати зносостійкі композитні покриття на металевих підкладках. Ця технологія базується на локальному плавленні порошкового матеріалу та невеликого шару підкладки за допомогою потужного лазерного випромінювання, що забезпечує міцне зчеплення покриття з основним металом та мінімізацію теплового впливу на прилеглі зони термічного впливу підкладки [1–3]. Важливою особливістю LC є можливість точного керування тепловим циклом, що дозволяє

формувати мікроструктури з контрольованою дисперсністю та мінімальною кількістю дефектів. Згідно з класичними дослідженнями Steen і Mazumder [4], товщина зони термічного впливу при LC зазвичай не перевищує 0.5–1.0 мм, що є значною перевагою порівняно з традиційними методами наплавлення. Більш того, Buchanan [5] підкреслює, що дана технологія широко використовується для відновлення деталей авіаційних двигунів, валів суднових турбін і гідравлічних циліндрів, де потрібна висока зносостійкість і корозійна стійкість у складних умовах експлуатації. У випадку нікелевих і кобальтових сплавів методом LC досягають підвищення мікротвердості покриттів у 1.5–2 рази порівняно з матеріалом підкладки, що робить цю технологію конкурентною у важкому машинобудуванні [2, 4].

Особливо перспективним є застосування LC для формування композитних покриттів на титанових сплавах, зокрема Ti6Al4V (титановий сплав з 6 % алюмінію та 4 % ванадію), які широко використовуються у авіаційній, медичній та суднобудівній галузях завдяки високій міцності при низькій густині та відмінній корозійній стійкості [6]. Сучасні дослідження показують, що використання композитного порошку $Ni - WC$ (нікель з частками карбіду вольфраму, WC) дозволяє суттєво підвищити твердість та зносостійкість поверхні титанових сплавів. У цьому процесі $Ni - WC$ порошок плавиться локально під дією лазера, взаємодіє з титановою підкладкою та формує покриття з високою мікротвердістю і мінімальною кількістю тріщин. Оптимальні параметри процесу, такі як потужність лазера (W), швидкість сканування (мм $с^{-1}$) та товщина шару порошку (мм), визначають якість покриття та формування проміжних фаз, наприклад TiC, Ni_3B та WC. Дослідження показали, що при лазерному наплавленні Ti-6Al-4V із добавками WC, TiC або Al_2O_3 мікротвердість отриманих покриттів може зростати у 1.7–2.3 рази порівняно з вихідним сплавом, а зносостійкість підвищується більш ніж у 3 рази завдяки формуванню дрібнодисперсної зміцненої структури та рівномірному розподілу твердих частинок у матриці [6, 7].

Виходячи з огляду Shengyuan Sun та інші (2021), лазерне наплавлення композитних покриттів Ni-WC на титанових сплавах забезпечує високу твердість (до $1200–1400\ HV_{0.2}$), зносостійкість та однорідність мікроструктури, що робить цей метод перспективним для створення захисних шарів у промислових застосуваннях [8].

Для наочного пояснення процесу LC на Ti6Al4V запропоновано схематичну ілюстрацію процесу, що показує основні елементи технології: джерело лазера, подачу порошку $Ni - WC$, титановий підклад та формування покриття (Рис. 1).

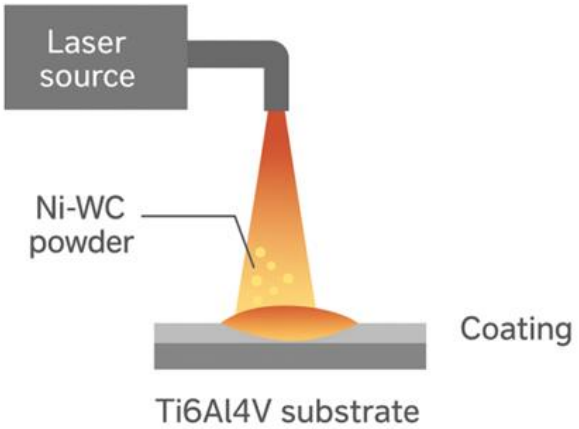

Рис. 1. Схематичне зображення лазерного напилення $Ni - WC$ порошку на підкладку Ti6Al4V

У низці досліджень показано, що використання $Ni-WC$ систем дозволяє суттєво підвищити зносостійкість титанових сплавів завдяки формуванню зміцнених фаз та надійного металургійного зчеплення з підкладкою. Зокрема, експериментальні результати засвідчили утворення в покритті фаз TiC, TiB_2, силіцидів (WSi_2, W_5Si_3), а також твердих розчинів $NiTi$ та $\gamma - Ni$, що забезпечують комбінацію високої твердості та зносостійкості. Важливим чинником виступає швидкість сканування: за низьких швидкостей формується грубодендритна структура, тоді як оптимальні режими сприяють її подрібненню, зростанню мікротвердості та зниженню втрат маси під час тертя. У середньому мікротвердість покриттів перевищувала аналогічний показник сплаву Ti-6Al-4V у 2.75–3.13 рази, а знос зменшувався на 60.1–79.7% [9–12]. Таким чином, підбір параметрів лазерного наплавлення, зокрема швидкості сканування, визначає баланс між фазоутворенням, мікроструктурою та експлуатаційними властивостями композиційних покриттів. Це зумовлює актуальність подальшого узагальнення даних та пошуку оптимальних умов для практичного застосування в авіаційній і транспортній галузях.

Актуальність та наукова проблема. Попри значний прогрес у застосуванні лазерного наплавлення для модифікації титанових сплавів, низка аспектів залишається недостатньо вивченою. Зокрема, відкритим є питання впливу легувальних оксидних добавок (наприклад, Y_2O_3, CeO_2, La_2O_3), а також композиційних систем на основі $NiCrBSi, B_4C$ чи TiC на формування мікроструктури та механізм зміцнення $WC-Ni$ покриттів на титанових підкладках. Дослідження показують, що подібні модифікатори можуть істотно змінювати кінетику фазоутворення, знижувати схильність до утворення пор і тріщин, а також оптимізувати співвідношення твердості та корозійно-зносостійких властивостей. Водночас систематизованих даних щодо їхнього впливу на титанові сплави поки що бракує.

Окрім оксидних модифікаторів, перспективними напрямами є застосування карбідо- та силіцидоутворювальних добавок, які забезпечують формування зміцнених фаз у нікелевій матриці та додатково підвищують трибологічні характеристики покриттів.

Згідно з Yan та співавтори, 2020 [21] синтезували самозмащувальні композитні покриття на Ti-6Al-4V, що містили тверді фази Ti_3SiC_2, TiC і Ti_5Si_3 у $\gamma - Ni$ матриці, що призвело до зниження коефіцієнта тертя. Цей приклад демонструє широкий спектр підходів до підвищення триботехнічних властивостей поверхонь титанових сплавів.

Більшість досліджень зосереджувалася на сталевих підкладках, тоді як для титанових сплавів систематичний аналіз мікроструктурних змін та експлуатаційних характеристик покриттів є обмеженим. Крім того, бракує експериментальних даних щодо порівняння впливу різних модифікаторів та режимів наплавлення на комплекс властивостей.

Наукова новизна. Очікується, що використання WC–Ni систем із додатковим легуванням рідкісноземельними оксидами дозволить реалізувати новий підхід до підвищення довговічності титанових деталей, поєднавши ефект дисперсного зміцнення з утворенням термодинамічно стабільних фаз.

Метою даної роботи є дослідження впливу технологічних параметрів лазерного наплавлення та легувальних добавок на мікроструктуру й зносостійкість WC–Ni покриттів на титановому сплаві Ti-6Al-4V, а також порівняння отриманих результатів із сучасними літературними даними для аналогічних систем.

ОБЄКТИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єкт дослідження – композитні покриття на основі $WC-Ni$ систем ($Ni60/WC$ або $WC - Ni$) на титановому сплаві Ti-6Al-4V, формовані методом лазерного наплавлення з різними технологічними модифікаторами: у Feng et al. – $Ni60 +$

35 % WC порошок (без додаткових оксидів) [13]; у Wang et al. – $WC-Ni$ з додаванням оксиду Y_2O_3 [14].

У роботі Feng et al., як матеріал використовувався Ti-6Al-4V як підкладка, а покриття наносили методом попередньо нанесеного порошку (pre-layered powder) з $Ni60 +$ 35 % WC, попередньо нанесеного на поверхню товщиною 1 мм та висушеного при 100°C протягом 2 годин [13]. Лазерне наплавлення проводили з використанням CO_2-лазера моделі DL-HL-T200 (максимальна потужність до 2000 Вт), досліджуючи вплив різних швидкостей сканування (8, 10, 12 та 14 мм/с) [13].

У протилежному підході Kaiming Wang et al. (2019) використали Ni-based порошок, армований WC та легований Y_2O_3. Дослідження було спрямоване на процес лазерного наплавлення цього композитного порошку на підкладку зі сплаву Ti-6Al-4V [14].

Для досліджень застосовано типову фізико-хімічну характеристику матеріалів:

Рентгенівська дифракція (XRD) – визначення фазового складу покриттів, зокрема синтезованих фаз TiC, TiB_2, силіцидів $WSi_2, W_5Si_3, NiTi, \gamma - Ni$ й інші фази.

Сканувальна електронна мікроскопія (SEM) – дослідження мікроструктури, морфології, а також характеру металургійного зчеплення між покриттям і підкладкою.

У дослідженні Wang et al передбачено застосування трансмісійної електронної мікроскопії (TEM) – для уточненого аналізу структури й фазового розподілу [14].

Мікротвердість визначали методом індентування $HV0.2$ на алмазному пірамідальному інденторі, що дозволяє оцінювати локальні зміни твердості в композитних покриттях і вказує на ефективність дисперсійного зміцнення WC-частинками. Експериментально встановлено, що твердість Ni60–WC покриттів є у 2.8–3.0 рази вищою порівняно з підкладкою Ti6Al4V [13, 14].

Для оцінювання трибологічних характеристик покриттів у роботі Feng та співавторів [13] було використано високошвидкісний рециркуляційний тестер на втому при терті (reciprocating fatigue wear tester), що дозволяє моделювати циклічне навантаження та визначати опір покриття до повторюваних тертєвих контактів. У свою чергу, Wang та інші [14] застосували випробувач на знос (wear tester), призначений для визначення інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя покриттів.

Автори виявили наявність металургійної межі злиття (metallurgical fusion line) між покриттям і підкладкою, що свідчить про міцне зчеплення, а також зміну мікроструктури залежно від швидкості сканування: при низькій – грубодендритна структура, із збільшенням швидкості – структура дрібніша, із покращеною міцністю [13].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХНЄ ОБГОВОРЕННЯ

Важливий внесок у розуміння впливу зміцнюючих фаз у $Ni-WC$ покриттях на титанових сплавах зробили Lu та Xu [15], які експериментально показали формування фаз TiC та Ni_3B у процесі лазерного наплавлення і довели їхній позитивний вплив на підвищення зносостійкості. Додатково, суттєві результати отримали Wang та Chang [16], які продемонстрували, що введення Y_2O_3 у систему $Ni-WC$ забезпечує зменшення кількості тріщин та формування більш рівномірної мікроструктури покриття.

На основі узагальнення даних літератури можна стверджувати, що поєднання карбідів, боридів та інтерметалічних фаз у структурі Ni-базованих композитних шарів визначає їхню підвищену твердість та зносостійкість. Далі розглянемо окремі аспекти фазового складу, мікроструктури та експлуатаційних властивостей подібних покриттів.

Фазовий склад покриття

Дослідження фазового складу покриттів $Ni60/WC$, отриманих методом лазерного наплавлення на підкладку $Ti6Al4V$, показало складну картину фазоутворення, зумовлену взаємодією між матричним сплавом, частинками WC та легувальними елементами. XRD-

аналіз (Рис. 2) підтвердив наявність вихідних фаз (WC та $\gamma - Ni$) і новоутворених твердих фаз – $TiC, TiB_2, NiTi$-інтерметаліди, а також силіцидів вольфраму (WSi_2, W_5Si_3). Утворення TiC та TiB_2 відображає інтенсивні реакції розчинення WC у титановій матриці, тоді як $NiTi$-інтерметаліди формуються внаслідок взаємодії розплавленої нікелевої основи з титановою підкладкою.

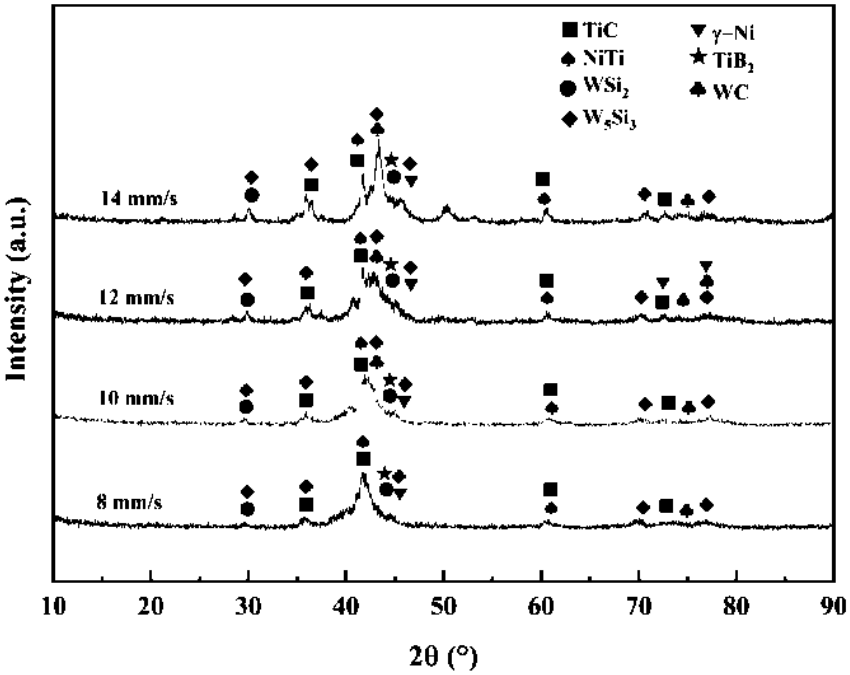

Рис. 2. Дифрактограма лазерно-наплавленого композиційного покриття Ni60–WC [13]

Ці фазові утворення відіграють ключову роль у формуванні мікроструктури та забезпеченні підвищеної твердості й зносостійкості покриттів, оскільки вони діють як ефективні армуючі частинки в матриці на основі нікелю.

Термодинамічний аналіз реакцій у зоні розплавлення

Під час лазерного наплавлення $Ni60/WC$ порошків на підкладку Ti-6Al-4V відбуваються численні хімічні реакції, що призводять до утворення різноманітних фаз. Згідно з дослідженням Feng et al. (2024), основні реакції можна описати наступними рівняннями:

$$Ti + C \rightarrow TiC, \quad (1)$$

$$Ti + 2B \rightarrow TiB_2, \quad (2)$$

$$Ni + Ti \rightarrow NiTi, \quad (3)$$

$$W + 2Si \rightarrow WSi_2, \quad (4)$$

$$5W + 3Si \rightarrow W_5Si_3 \quad (5)$$

Реакції (1)–(2) відображають утворення карбідів і боридів титану, які є надтвердими фазами та формують армовану структуру з підвищеною стійкістю до абразивного зношування.

Реакція (3) свідчить про ймовірність формування інтерметалідної фази NiTi, яка не лише підвищує адгезію покриття до титанової основи, але й сприяє зміцненню завдяки високій еластичності та зносостійкості.

Реакції (4)–(5) описують можливе утворення силіцидів вольфраму, які стабілізують мікроструктуру та забезпечують додатковий внесок у термостійкість покриття.

Таким чином, поєднання цих реакцій зумовлює формування зміцнюючих фаз у системі Ni–WC/Ti6Al4V, де ключову роль відіграють саме карбіди та бориди титану, тоді як інтерметаліди NiTi та силіциди вольфраму виконують допоміжну стабілізуючу функцію.

Ці реакції відбуваються в умовах високої температури розплавленої зони, де елементи з порошку та підкладки взаємодіють, утворюючи нові фазові сполуки. Рентгенівський дифракційний аналіз (XRD) підтвердив наявність таких фаз, як TiC, TiB_2, $NiTi, WSi_2$ та W_5Si_3 у складі покриття. Особливо слід відзначити, що пік дифракції для TiC та NiTi був виразнішим, що свідчить про їхню більшу кількість у покритті. Ці фазові утворення значно підвищують зносостійкість покриття завдяки своїй високій твердості та хімічній стабільності.

Таким чином, фазовий склад покриття є результатом поєднання первинних і вторинних реакцій, що відбуваються при високій швидкості охолодження розплавленої зони. Зокрема, утворення фаз TiC та TiB_2 забезпечує значне зміцнення поверхневого шару титанових сплавів завдяки високій твердості та хімічній стабільності, тоді як інтерметаліди NiTi додатково підвищують їх зносостійкість.

Крім того, у системі можливе формування додаткових сполук, що стабілізують структуру покриття:

$$Ti + W \rightarrow TiW, \quad (6)$$

$$Ti + Ni_3 \rightarrow TiNi_3, \quad (7)$$

$$W + C \rightarrow WC, \quad (8)$$

$$2Ti + C \rightarrow Ti_2C, \quad (9)$$

$$2Ni + Ti \rightarrow Ni_2Ti, \quad (10)$$

Мікроструктура покриттів

Дослідження мікроструктури методом сканувальної електронної мікроскопії (SEM) виявило характерні зміни морфології покриттів залежно від швидкості сканування лазерного променя (Рис. 2). При швидкості 8 мм/с формувалися грубі дендритні кристаліти, що свідчить про тривалий час кристалізації та розвиток колоніальної структури. З підвищенням швидкості до 10–12 мм/с спостерігалося подрібнення дендритів і більш рівномірний розподіл твердих фаз, що відповідає інтенсивнішому градієнту охолодження. Додаткове збільшення швидкості до 14 мм/с призводило до утворення ще більш дрібнозернистої структури, проте надмірно висока швидкість могла зумовлювати неповне розплавлення частинок WC та появу локальних дефектів у покритті, що потребує подальшого контролю технологічного процесу для забезпечення оптимальної якості матеріалу.

Як видно з наведених SEM-зображень (Рис. 3), зі збільшенням швидкості сканування відбувається поступове подрібнення та зміна морфології дендритних кристалів у центральній зоні покриття Ni60/WC. При швидкості 8 мм/с (Рис. 3*a*) формується переважно грубодендритна структура з витягнутими дендритами та значною різницею в розмірах структурних елементів, що свідчить про відносно повільну швидкість кристалізації. При збільшенні швидкості до 10 мм/с (Рис. 3*b*) спостерігається зменшення розмірів дендритів і часткове формування більш ізотропної морфології, що пов’язано з підвищенням градієнта охолодження. За 12 мм/с (Рис. 3*c*) мікроструктура характеризується переважно дрібнодендритною морфологією з окремими еквіаксними зернами, що свідчить про

інтенсивніше охолодження та обмежений ріст кристалів. За максимальної швидкості 14 мм/с (Рис. 3*d*) структура стає більш рівномірною, з формуванням дрібнозернистої матриці та рівномірним розподілом зміцнювальних частинок, що забезпечує підвищену однорідність і потенційно кращий комплекс механічних властивостей.

Таким чином, оптимальною для формування дрібної та рівномірної структури є швидкість 10–12 мм/с, яка забезпечує баланс між повнотою розплавлення та швидкістю кристалізації.

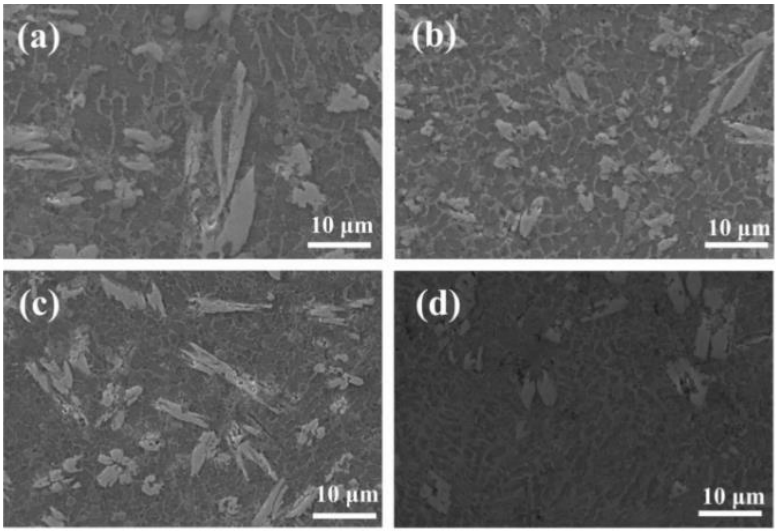

Рис. 3. SEM-зображення дендритної мікроструктури в середній зоні Ni60/WC покриття при різних швидкостях сканування: (a) 8 мм/с; (b) 10 мм/с; (c) 12 мм/с; (d) 14 мм/с [13]

Мікротвердість

Результати вимірювання мікротвердості (Рис. 4) продемонстрували суттєве підвищення цього показника в покритті порівняно з вихідною підкладкою Ti6Al4V. Так, у центральній зоні покриття середнє значення мікротвердості становило:

820 $HV_{0.2}$ при 8 мм/с,

870 $HV_{0.2}$ при 10 мм/с,

915 $HV_{0.2}$ при 12 мм/с,

940 $HV_{0.2}$ при 14 мм/с.

Для порівняння, вихідна мікротвердість підкладки сплаву Ti-6Al-4V становить близько 350 $HV_{0.2}$. Отримані результати свідчать, що утворені зміцнювальні фази TiC і TiB_2 істотно підвищують твердість матриці. Зростання швидкості сканування супроводжується подрібненням дендритних структур та формуванням більш однорідного розподілу твердих частинок у матриці, що зумовлює подальше підвищення загальної твердості покриття.

Отримані результати свідчать, що варіювання швидкості сканування є ефективним інструментом регулювання механічних властивостей, а саме забезпечення більш ніж дворазового зростання твердості відносно підкладки, що має принципове значення для підвищення експлуатаційної довговічності покриттів.

Зносостійкість

Зносостійкість покриттів оцінювали методом випробувань на знос в умовах сухого тертя (dry sliding wear test), який полягає у ковзанні зразка по контртелу без застосування мастильного середовища при заданих навантаженні та швидкості. Випробування на знос проводили за схемою «зразок – контртіло» (sample–counterbody) відповідно до стандарту ASTM G99-17.

Результати випробувань на зносостійкість, проведених методом dry sliding wear test, показали, що нанесені покриття мають істотно вищу опірність тертю порівняно з титановою підкладкою. Об'єм втрат матеріалу зменшувався зі зростанням швидкості сканування лазера, що зумовлено одночасним впливом удосконаленої мікроструктури, підвищеної твердості та утворенням стійких до зношування зміцнювальних фаз.

при 8 мм/с втрати складали ~2.1 мм^3,

при 10 мм/с – 1.6 мм^3,

при 12 мм/с – 1.3 мм^3,

при 14 мм/с – лише 1.0 мм^3.

Для порівняння, вихідна підкладка Ti6Al4V мала об'єм зношування близько 4.8 мм^3.

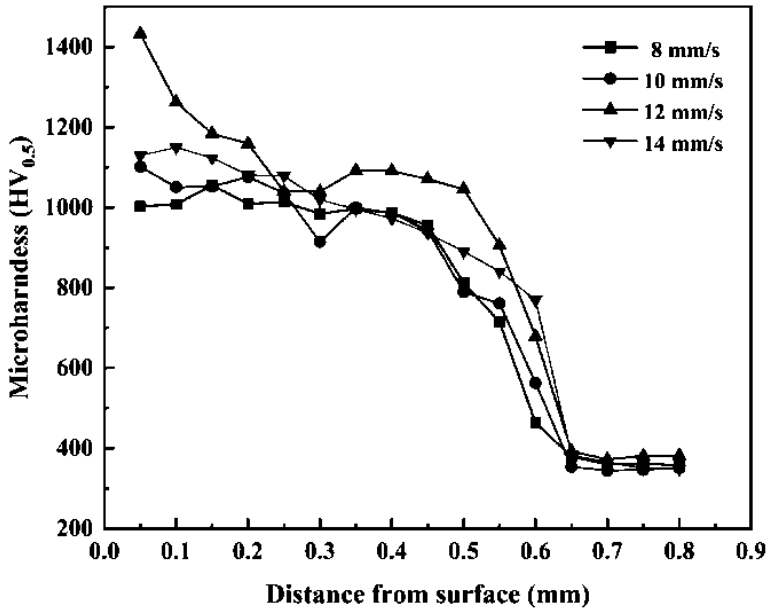

Рис. 4. Мікротвердість лазерно-наплавлених покриттів при різних швидкостях сканування [13]

Зменшення зносу пояснюється комбінацією зміцнюючих фаз $(TiC, TiB_2, NiTi)$ та формуванням дрібнодендритної мікроструктури при оптимальних режимах наплавлення. Особливо важливим є ефект зменшення зношування у 4–5 разів порівняно з титановою підкладкою, що вказує на перспективність Ni60/WC-покриттів для підвищення ресурсу деталей з Ti6Al4V.

Узагальнення результатів

Таким чином, дослідження підтвердило, що поєднання нікелевої матриці з WC-підсилювачами та контроль параметрів наплавлення дозволяють значно поліпшити експлуатаційні характеристики покриттів на титанових сплавах. Оптимальним виявився інтервал швидкостей 10–12 мм/с, який забезпечує збалансоване поєднання високої твердості ($> 900\ HV_{0.2}$) та низьких втрат при терті (< 1.5 мм^3).

Фрикційні та зносостійкі властивості покриттів Ni60/WC

Згідно з [13] досліджували коефіцієнт тертя та зносостійкість покриттів Ni60/WC, отриманих методом лазерного сплавлення, при різних швидкостях сканування (8–14 мм/с). Показано, що середні коефіцієнти тертя демонструють тенденцію спочатку до зниження, а потім до підвищення зі збільшенням швидкості сканування: 0.56, 0.52, 0.43 та 0.50 відповідно. Така поведінка корелює з варіаціями мікротвердості: максимальна твердість спостерігається при 12 мм/с, що підвищує опір покриття абразивним силам та сприяє зменшенню коефіцієнта тертя.

На початковій стадії тертя поверхня зразків характеризується високою шорсткістю, що спричинює значні коливання коефіцієнта тертя. У стабільній стадії тертя коливання коефіцієнта зменшуються, що пояснюється мікрорізанням твердих фазових частинок покриття при контакті з контр-абразивною кулею.

Встановлено, що масові втрати матеріалу під час зносу демонструють аналогічну тенденцію: спочатку зменшуються, а потім збільшуються зі збільшенням швидкості сканування. Зокрема, покриття показує значно менші втрати маси порівняно з підкладкою Ti6Al4V, що підтверджує пряму кореляцію між підвищеною твердістю та зносостійкістю. Відносне зменшення масових втрат покриття у порівнянні з підкладкою становить 60.1%, 77.2%, 79.7% та 77.9% при швидкостях 8, 10, 12 та 14 мм/с відповідно, що забезпечує максимальне підвищення зносостійкості у 4.9 рази. Це перевищує результати попередніх досліджень, де TiC/Ni60 покриття на Ti6Al4V забезпечували 4-кратне покращення.

Авторами показано, що значне підвищення зносостійкості обумовлене реакціями порошків Ni60/WC у лазерній ванні, що призводить до утворення твердих фаз $(TiC, TiB_2, W5Si_3, WSi_2)$. Ці фази підвищують твердість покриття та одночасно підтримують його міцність і зносостійкість. На ранній стадії зношування, при контакті шліфувальної кулі з гладкою поверхнею, коефіцієнт тертя низький. Згодом тверді фази і частинки WC виступають на поверхню, спричиняючи різання та фрагментацію, що формує абразивний знос. Після накопичення тертя поверхня покриття вирівнюється, контактна площа збільшується, і процес зношення переходить у стабільну фазу з мінімальними коливаннями коефіцієнта тертя.

Механізм тертя та зношування покриттів Ni60/WC [13, 22]

Було розроблено детальну модель фрикції та зношування покриттів Ni60/WC, отриманих методом лазерного сплавлення, що ілюструє розвиток контактних процесів на поверхні матеріалу [13]. Показано, що при початковому контакті шліфувальної кулі з гладкою поверхнею покриття коефіцієнт тертя низький через обмежену контактну площу. Поступово тверді фази (TiC, TiB_2) та силіциди $(W5Si_2, WSi_2)$, а також частинки WC виступають на поверхню покриття, спричиняючи процеси різання та мікрофрагментації. Внаслідок цього формується абразивний знос із появою дрібних частинок-абразивів. Зі збільшенням часу тертя вершини виступів покриття вирівнюються, контактна площа збільшується, і процес зношування переходить у стабільну стадію з мінімальними коливаннями коефіцієнта тертя.

З цієї моделі витікає, що висока твердість і наявність твердих фаз є ключовими факторами, що забезпечують одночасно зменшення коефіцієнта тертя та підвищення зносостійкості покриттів. Автори підкреслюють, що оптимальні параметри лазерного сплавлення, зокрема швидкість сканування, безпосередньо впливають на формування цих фаз і, як наслідок, на триботехнічні властивості покриття.

Таким чином, наведена модель механізму зношування узгоджується з даними структурного аналізу, які демонструють, що саме утворення зміцнювальних фаз карбідів і боридів визначає високі триботехнічні характеристики покриттів Ni-основи. Важливим підтвердженням цього є результати Wang та співавторів (2019) [14], де було досліджено композитні покриття $Ni/WC-Y_2O_3$, отримані методом лазерного наплавлення на сплав Ti-6Al-4V.

У роботі (Wang, 2019) [14] досліджено композитні покриття на основі $Ni/WC-Y_2O_3$, отримані методом лазерного наплавлення на сплав Ti-6Al-4V. За даними рентгенівського фазового аналізу (XRD) у структурі покриття ідентифіковано фази $\gamma - Ni, TiC, TiB_2, Ni_3B, M_{23}C_6$, а також залишки частково розчинених частинок WC. Це свідчить про активні реакції між WC та титановою підкладкою, що призвели до утворення зміцнювальних фаз карбідів і боридів.

Мікроструктурні дослідження (SEM, TEM) підтвердили наявність щільного металургійного контакту між покриттям і підкладкою без утворення тріщин чи пор. Розподіл залишкових частинок WC у матриці $\gamma - Ni$ є рівномірним, а присутність модифікатора Y_2O_3 сприяє рафінуванню зерен та зменшенню мікроструктурної неоднорідності.

Встановлено, що мікротвердість покриття становить 920–950 HV, що приблизно у 3.0–3.2 рази вище, ніж мікротвердість титанової підкладки Ti-6Al-4V (близько 300 HV) та у 1.4 рази вище, ніж твердість нікелевого шару без WC ($\sim 680\ HV$). Це свідчить про ключову роль дисперсійного зміцнення, зумовленого формуванням дрібнодисперсних фаз (TiC, TiB_2) та ефектом модифікації Y_2O_3.

Трибологічні випробування показали, що коефіцієнт тертя знижується з 0.68 (для підкладки) до 0,42 (для композитного покриття), а зносостійкість підвищується у 5,5 рази. Покриття демонструє стабільний характер тертя на стадії усталеного зношування, що пояснюється механізмом мікрорізання твердих карбідних частинок і утворенням захисного шару продуктів зношування.

Аналіз:

SEM- та TEM-аналіз чітко демонструють, що надійний металургійний зв'язок забезпечується відсутністю тріщин або дефектів на межі «покриття – підкладка». Рівномірний розподіл залишкових WC-частинок і формування карбідних/боридних фаз (TiC, TiB_2) свідчать про високоефективне дисперсійне зміцнення.

Ключовим механізмом зміцнення є комбінований вплив дисперсійного зміцнення (TiC, TiB_2), зернорозмірного зміцнення (завдяки Y_2O_3) та стабілізації мікроструктури. Результатом є тривале підвищення мікротвердості ($\sim 3\times$) та зносостійкості – саме такі ключові властивості, що забезпечують практичну цінність покриття.

У порівнянні:

Наявність Y_2O_3, CeO_2 або La_2O_3 як модифікаторів: вони забезпечують аналогічні ефекти – подрібнення зерна, зниження пористості, стабілізацію твердих фаз.

Наприклад, покриття з CeO_2 модифікатором демонструє збільшену структурну однорідність, а La_2O_3 – зниження тріщиностійкості та корозійної чутливості.

Таким чином, механізм зміцнення зводиться до комплексного впливу дисперсійного твердіння карбідами й боридами, зернорозмірного зміцнення завдяки Y_2O_3, а також формування міцного металургійного зв'язку. Подібний підхід до модифікації структури відомий і для інших оксидних добавок: наприклад, введення CeO_2 забезпечує інтенсивне подрібнення зерен і зменшення розмірів дендритних структур, тоді як La_2O_3 сприяє стабілізації твердих фаз і зниженню пористості покриттів. Усі ці ефекти у комплексі дають змогу значно підвищувати мікротвердість і зносостійкість лазерних покриттів.

У роботі Wang et al. [14] методом лазерного наплавлення було отримано композитні покриття на основі Ni, зміцнені частинками WC. Встановлено, що мікротвердість чистої нікелевої матриці становила близько 620 HV, тоді як після введення WC вона зросла до понад 900 HV. Такий приріст пов'язують із формуванням у структурі дрібнодисперсних карбідних фаз (TiC, WC залишкові частинки), що забезпечують дисперсійне зміцнення. Отримані дані переконливо підтверджують ключову роль WC у підвищенні твердості нікелевих покриттів, що узгоджується з сучасними уявленнями про механізми зміцнення лазерно-наплавлених композитів.

Отримані результати узгоджуються з даними інших досліджень: зокрема, Liu et al. (2025) дослідили одношарове Ni/60 % WC покриття, нанесене методом лазерного наплавлення, і зафіксували середню мікротвердість на рівні 2066 $HV_{0.5}$, тобто приблизно в 4.3 разів вищу, ніж у підкладки, при товщині покриття 600–900 μm [18].

Важливий внесок у дослідження модифікації поверхні Ti-6Al-4V методом лазерного наплавлення зробили Wang та співавтори [14], які застосували Ni-WC порошок із

додаванням Y_2O_3. Показано, що введення оксиду ітрію сприяє рафінуванню зерен і стабілізації мікроструктури, що зумовило утворення комплексних фаз $\gamma - Ni, TiC, TiB_2$, Ni_3B та $M_{23}C_6$. У результаті мікротвердість покриттів зросла майже утричі порівняно з підкладкою, а зносостійкість значно підвищилася. Таким чином, дослідження продемонструвало ефективність використання модифікатора Y_2O_3 для керування фазоутворенням у Ni-основних композитах.

У протилежному підході Liu та співавтори [15–19] застосували NiCrBSi матрицю, армовану WC, для наплавлення покриттів на Ti-6Al-4V. На відміну від Ni-WC систем, використання NiCrBSi як зв'язувальної фази забезпечило формування більш однорідної мікроструктури з меншою схильністю до утворення тріщин. Встановлено, що основними фазами є $\gamma - Ni, Cr_7C_3$ та WC, які забезпечили комбінацію високої твердості й зносостійкості. Результати продемонстрували, що введення WC-частинок у NiCrBSi-матрицю забезпечує значне підвищення експлуатаційних характеристик у порівнянні з незміненим титановим сплавом, хоча механізм зміцнення відрізняється від $Ni - WC + Y_2O_3$ системи. Таким чином, порівняння двох підходів – модифікації Ni-WC порошку за допомогою Y_2O_3 [14] та застосування NiCrBSi/WC композитів [18, 19] – дозволяє окреслити різні стратегії керування фазоутворенням і підвищення зносостійкості титанових сплавів при лазерному наплавленні.

Результати аналізу покриттів на Ti-6Al-4V. Для аналізу ефективності модифікованих нікелевих покриттів Wang та співавтори (2019) здійснили лазерне наплавлення композиційного порошку Ni-WC з добавкою Y_2O_3 на підкладку зі сплаву Ti-6Al-4V. Вибір оксиду ітрію зумовлений його рафінуючим впливом на мікроструктуру, що сприяє формуванню дрібнодисперсних фаз та підвищенню механічних властивостей. В ході досліджень було проведено аналіз фазового складу, мікротвердості та зносостійкості отриманих покриттів. Узагальнені результати наведено у Табл. 1.

Таблиця 1. Основні характеристики покриттів $Ni - WC + Y_2O_3$ на Ti-6Al-4V [14]

Параметри процесу (лазерне наплавлення)	**Фазовий склад**	**Мікротвердість ($HV_{0\cdot2}$)**	**Зносостійкість**
$Ni - WC + Y_2O_3$, підкладка Ti-6Al-4V	$\gamma - Ni, TiC, TiB_2, Ni_3B, M_{23}C_6$	↑ ~3 × (порівняно з Ti-6Al-4V)	Значне підвищення опору зносу

Для порівняння з результатами Wang et al., у подальших роботах розглянуто інший підхід до легування, зокрема застосування порошків системи NiCrBSi/WC при лазерному наплавленні на Ti-6Al-4V. Така система відрізняється від Ni-основних покриттів за рахунок присутності бору та кремнію, які забезпечують утворення боридних і силіцидних фаз, що додатково підвищують твердість та трибологічну стійкість. У Табл. 2 наведено основні технологічні параметри, особливості фазоутворення та порівняльні характеристики властивостей покриттів.

Таблиця 2. Характеристики покриттів NiCrBSi/WC на Ti-6Al-4V [18]

Параметри процесу (лазерне наплавлення)	**Фазовий склад**	**Мікротвердість ($HV_{0\cdot2}$)**	**Зносостійкість**
NiCrBSi/WC, підкладка Ti-6Al-4V	$\gamma - Ni, CrB, Ni_3Si, WC$	↑ у 2,5–3× (порівняно з Ti-6Al-4V)	Значне підвищення (dry sliding wear test)

Отримані результати демонструють, що обидва підходи забезпечують істотне підвищення механічних властивостей титанового сплаву, проте механізми зміцнення мають відмінності. У випадку Wang et al. ключову роль відіграє модифікація оксидом ітрію, що забезпечує рафінування зеренної структури та формування карбідних і боридних фаз з високою твердістю. Натомість у системі NiCrBSi/WC додатковий ефект зміцнення пов'язаний із наявністю бору та кремнію, які сприяють утворенню боридів та силіцидів, що підвищують мікротвердість покриття й забезпечують стабільність при трибологічних

навантаженнях. Таким чином, обидві стратегії легування є ефективними для підвищення зносостійкості титанових сплавів, однак використання Y_2O_3 демонструє більш виражений вплив на мікроструктурне рафінування, тоді як NiCrBSi-система забезпечує комплексний ефект за рахунок фазового зміцнення.

Поряд із підходом, що базується на модифікуванні Ni-основних композитів оксидами рідкісноземельних елементів, заслуговує уваги робота Jianhua Yao та співавт. [Yao et al., 2016] [19], у якій використано попередньо легований порошок WC-NiCrMo для лазерного наплавлення на Ti-6Al-4V. Автори дослідили вплив різних діаметрів лазерного пучка на формування мікроструктури, фазовий склад та трибологічні властивості отриманих покриттів. Було встановлено, що варіювання розміру лазерної плями призводить до зміни розподілу WC-частинок у NiCrMo-матриці та впливає на формування зміцнювальних фаз $(WC, M_6C, \gamma - Ni)$. При цьому покриття характеризувалися підвищеною мікротвердістю та значним покращенням зносостійкості порівняно з титановим сплавом-основою.

Використання модифікаторів у лазерних композитних покриттях на Ti-6Al-4V

У сучасних дослідженнях лазерного наплавлення на сплавах титану значна увага приділяється вибору модифікаторів, які дозволяють цілеспрямовано керувати фазоутворенням, мікроструктурою та трибологічними властивостями покриттів. Показовими є роботи Wang et al. (2019) та Yao et al. (2016), що представляють два принципово різних підходи. У дослідженні Wang et al. (Surface Engineering, 2019) застосовано композицію Ni-WC з додаванням Y_2O_3, який виступив у ролі модифікатора росту зерен. Це забезпечило утворення зміцнювальних фаз $(\gamma - Ni, TiC, TiB_2, Ni_3B, M_{23}C_6)$ та підвищення мікротвердості приблизно у три рази, що призвело до значного зростання зносостійкості.

На відміну від цього, у роботі Yao et al. (Applied Surface Science, 2016) застосовано попередньо легований порошок WC-NiCrMo. У цьому випадку контроль структури здійснювався не за рахунок зовнішнього оксидного модифікатора, а шляхом варіювання складу матриці. Встановлено, що зміна діаметра лазерної плями впливає на рівномірність розподілу WC-частинок у NiCrMo-матриці та на утворення зміцнювальних фаз $(WC, M_6C, \gamma - Ni)$. Це забезпечило формування покриттів із підвищеною мікротвердістю та покращеними трибологічними характеристиками порівняно з основним сплавом Ti-6Al-4V. Таким чином, використання різних типів модифікаторів демонструє альтернативні стратегії підвищення експлуатаційних властивостей: у випадку Wang et al. – акцент на оксидні добавки, у випадку Yao et al. – зміна складу металевої матриці. Це свідчить про перспективність комбінованих підходів для подальшого розвитку нанотехнологій поверхневої інженерії.

Дослідження показали, що зміна розміру лазерної плями при наплавленні визначає мікроструктуру шарів та рівномірність розподілу WC-частинок, що напряму впливає на зносостійкість покриттів. Таким чином, комбіноване використання WC та легувальних добавок дозволяє гнучко керувати структурою та властивостями титанових сплавів, що є перспективним напрямом для авіаційного та енергетичного машинобудування.

Лазерне наплавлення покриттів на основі Ni60 + WC на підкладку Ti6Al4V призводить до значного підвищення мікротвердості (2.75–3.13× порівняно з підкладкою) та зменшення масових втрат при зносі на 60.1–79.7%. Особливу увагу заслуговує ефект модифікаторів. Наприклад, введення Y_2O_3 у покриття Ni-WC (Wang et al., 2019) сприяє стабілізації структури $\gamma - Ni$ та рівномірному розподілу зміцнювальних фаз, що підвищує зносостійкість. У системі на сталеву підкладку 45 (Jingquan Wu et al., 2025), [20] додавання CeO_2 до покриття Ni60/60% WC стимулює формування $\gamma - (Fe, Ni)$, WC та W_2C разом із карбідами та силіцидними фазами $(Cr_{23}C_6, Fe_{37}W_{9.43}C_{3.54})$, що забезпечує максимальне

підвищення мікротвердості до $\sim 5{,}47\times$ і зниження масових втрат на знос до 79%. Загальна тенденція показує, що модифікатори (Y_2O_3, CeO_2) відіграють ключову роль у контролі мікроструктури, розподілі твердих фаз та формуванні інтенсивних реакцій між матричним сплавом і карбідами. Це безпосередньо відображається у зносостійкості: покриття з модифікаторами демонструють найменші масові втрати та стабільніший коефіцієнт тертя.

Порівняння всіх систем у таблиці (Табл. 3) свідчить, що оптимальне поєднання матричного сплаву, твердих фаз і модифікатора дозволяє досягти значного підвищення механічних властивостей покриттів, при цьому системи на сталевій підкладці демонструють більший приріст мікротвердості порівняно з титановими підкладками, що пояснюється хімічним складом підкладки і активністю модифікатора CeO_2.

У дослідженні Yan et al. (2020) [21] методом лазерного наплавлення отримані композитні покриття на Ti-6Al-4V, що містили тверді фази Ti_3SiC_2, TiC і Ti_5Si_3 у γ-Ni матриці. Коефіцієнт тертя покриттів зменшувався від ~0.6–0.65 для підкладки до ~0.35–0.4, а масова втрата при зносі зменшувалась на 40–50%. Механізм дії полягає у самозмащувальній поведінці Ti_3SiC_2 та структурній стабілізації твердих фаз, що підвищує стійкість до абразивного зносу. Ці результати узгоджуються з ефектом модифікаторів у Ni60 + WC покриттях (Y_2O_3, CeO_2), де формування твердих фаз ($TiC, TiB_2, WSi_2, W_5Si_3, NiTi$) забезпечує підвищення мікротвердості та зносостійкості (Feng et al., 2024; Wu et al., 2025).

Таблиця 3. Порівняння різних підходів до модифікації лазерних композитних покриттів на Ti-6Al-4V

Автори, рік	Система / модифікатор	Основні фази	Мікротвердість (зміна)	Зносо-стійкість	Зниження зносу (%)
Wang et al., 2019	Ni-WC + Y_2O_3	γ-Ni, TiC, $TiB_2, Ni_3B, M_{23}C_6$	$\approx 3\times$ вища за Ti-6Al-4V	Значне підвищення	(зазвичай суттєве)
Yao et al., 2016	WC-NiCrMo (pre-alloyed)	$WC, M_6C, \gamma - Ni$	Вища порівняно з Ti-6Al-4V	Покращена	–
Zhang et al., 2019	NiCrBSi + WC	γ-Ni, WC, CrB, Cr_7C_3	↑ у 2– 2.5 ×	Суттєво підвищена	–
Feng et al., 2024	Ni60 + WC	TiC, $TiB_2, WSi_2, W_5Si_3, NiTi, \gamma - Ni$	2.75–3.13×	Значне покращення	60.1–79.7%
Metals, 2025	Ni60/60 % WC (сталь 45)	γ-(Fe,Ni), WC, $W_2C, Cr_{23}C_6, Fe_{37}W_{9.43}C_{3.54}$	$\sim 5.47\times$	Значне покращення	79 %

Таким чином, дослідження показали, що лазерне наплавлення Ni60/WC покриттів на титанову підкладку Ti6Al4V суттєво підвищує поверхневі властивості. Саме титановий сплав забезпечує активну взаємодію з твердими фазами ($TiC, TiB_2, NiTi$), що формуються у процесі наплавлення, і визначає ефективність зміцнення поверхні. Для порівняння, аналогічні тенденції спостерігаються і на сталевій підкладці, проте основну увагу варто приділяти титановим системам, які є ключовими для підвищення експлуатаційних характеристик.

ВИСНОВКИ

1. Лазерне наплавлення покриттів на основі Ni із додаванням твердих частинок (WC) та рідкісноземельних оксидів (Y_2O_3) забезпечує формування щільної бездефектної структури з надійним металургійним з'єднанням із підкладкою з Ti-6Al-4V. У мікроструктурі виявлено рівномірний розподіл зміцнювальних фаз ($TiC, TiB_2, Ni_3B, NiTi$), що підтверджує ефективність реакційного зміцнення.

2. Додавання WC сприяє істотному підвищенню мікротвердості покриттів: значення для Ni60–WC сягають 920–950 HV, що у 2.5–3 рази перевищує твердість титанової підкладки ($\approx 350\ HV$) та перевищує Ni60 без карбідної фази ($\approx 680\ HV$). Аналогічно, за даними Wang et al. (2019), введення WC підвищує твердість покриттів з $\sim 620\ HV$ до понад 900 HV.

3. Зносостійкість покриттів Ni60–WC істотно зростає: втрати маси зменшуються приблизно на 40–45% у порівнянні з немодифікованим Ni60. Це узгоджується з результатами Wang et al. (2019) та Feng et al. (2024), які експериментально підтвердили, що наявність WC знижує інтенсивність абразивного зношування.

4. Використання Y_2O_3 (Wang et al.) додатково сприяє подрібненню зерна та зменшенню мікроструктурної неоднорідності, тоді як WC (Feng et al.) забезпечує дисперсійне зміцнення і стабілізацію твердих фаз. Обидва підходи доводять високу ефективність комбінованого легування для підвищення експлуатаційних характеристик титанових сплавів.

5. Сукупний аналіз підтверджує, що оптимізація складу нікелевих покриттів з армувальними частинками та модифікаторами дозволяє значно підвищити мікротвердість і зносостійкість титанових сплавів, що має практичну цінність для їх використання в умовах інтенсивного тертя та підвищених навантажень.

Результати аналізу сучасних досліджень свідчать про доцільність і перспективність використання лазерних композитних покриттів для модифікації поверхні титанових сплавів, оскільки така обробка дозволяє істотно підвищити їх зносостійкість, стабілізувати експлуатаційні характеристики та забезпечити надійну роботу в агресивних середовищах і за підвищених навантажень.

Подальші дослідження доцільно зосередити на:

тривалих випробуваннях у різних агресивних середовищах (морська вода, фізіологічні розчини, високотемпературна атмосфера);

оцінюванні втомної довговічності та стійкості до циклічних навантажень;

визначенні термічної стабільності фазового складу та мікроструктури під час роботи при підвищених температурах;

комплексному порівнянні лазерних покриттів з альтернативними методами поверхневої модифікації.

Практичне значення отриманих результатів

Аналіз отриманих даних показує, що формування лазерних композитних покриттів Ni–WC–Y_2O_3 має безпосереднє практичне значення для підвищення експлуатаційної надійності деталей із титанових сплавів. Зокрема, встановлене зростання мікротвердості у 2.5–3 рази та зниження втрат маси під час абразивного зношування на 40–45% свідчать про можливість ефективного використання таких покриттів у вузлах, що працюють в умовах інтенсивного тертя та навантажень.

Результати роботи можуть бути застосовані при виготовленні та відновленні елементів авіаційних газотурбінних двигунів (лопатки компресора, напрямні апарати), медичних імплантатів на основі Ti-6Al-4V, а також деталей енергетичного та транспортного машинобудування, де потрібна висока зносостійкість і стабільність властивостей у агресивних середовищах. Світовий досвід (наприклад, програми NASA з використання лазерних технологій модифікації титанових сплавів) підтверджує доцільність і перспективність подібних підходів для забезпечення тривалої роботи відповідальних вузлів.

Практична реалізація подібних підходів підтверджується сучасними дослідженнями та досвідом промислових центрів (наприклад, National Institute for Materials Science, Японія; Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology, Німеччина), де лазерне наплавлення використовується для підвищення довговічності деталей двигунів та медичних виробів.

Таким чином, отримані результати мають не лише теоретичне, але й прикладне значення, відкриваючи можливість практичного впровадження лазерних композитних покриттів у сучасне високотехнологічне виробництво.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Махненко В. І., Коваленко В. С., Лазаренко А. Г.* Лазерная обработка материалов. – К.: Наукова думка, 2012. – 352 с.
2. *Коваленко В. С., Кутепов А. М.* Лазерная обработка и наплавка металлов. – Харків: НТУ «ХПИ», 2008. – 284 с.
3. *Венгер Є. Ф., Семчук О. Ю., Гаврилюк О. О. Лазер-індуковані структури у твердих тілах. – К.: Академперіодика, 2016. – 236 с.*
4. *Steen W. M., Mazumder J.* Laser Material Processing. – London: Springer, 2010. – 558 p.
5. *Buchanan V.* Laser Cladding. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2011. – 312 p.
6. *Arif Z. U., Khalid M. Y., Ans Al Rashid, Ehtsham ur Rehman, Atif M.* Laser deposition of high-entropy alloys: A comprehensive review // Opt. Laser Technol. – 2022. – V. 145. – P. 107447.
7. *Huijun Yu ,Lu Lu ,Zifan Wang* Chuanzhong Chen Microstructure and Wear Resistance of a Composite Coating Prepared by Laser Alloying with Ni-Coated Graphite on Ti-6Al-4V Alloy // Materials. – 2022. – V. 15(16). – P. 5512.
8. *Sun S., Wang J., Xu J., Xiangyu C., Chenghu J., Zhendong C., Ru H., Yongyue L., Junke J.* Preparing WC-Ni coatings with laser cladding technology: A review // Mat. Today Communications. – 2023. – V. 37. – P. 106939.
9. *Kang L., Chen F., Wu B., Liu X., Ge H.* Mechanical properties and microstructure of laser-cladding additively manufactured 316L stainless steel sheets // J. Constr. Steel Res. – 2022. – V. 199. – P. 107603.
10. *Kang L., Zhang C., Bradford Mark A., Liu X.* Residual stresses in circular steel tubular columns repaired by laser-cladding additive manufacturing // Thin-Walled Struct. – 2023. –V. 193. – P. 111275.
11. *Vasyliev M. O., Nyshchenko M. M., Gurin P. O.* Laser-Assisted Modification of a Surface of Titanium Implants // Usp. Fiz. Met. – 2010. – V. 11, N. 2. – P. 209–247 [in Russian].
12. *Gu B., Wang Y., Xu G., Gao L.* Effect of ultrasonic impact on the microstructure and properties of 30%WC-Ni ceramic coatings by laser cladding // Ceram. Int. – 2025. – V. 51, N. 4. – P. 4677–4692.
13. *Feng M., Ma Y., Tian Y. Cao H.* Microstructure and Wear Resistance of Ti6Al4V Titanium Alloy Laser-Clad Ni60/WC Composite Coatin // *Materials.* – 2024. – V. 17(1). – P. 264.
14. *Wang K., Du D., Liu G., Chang B., Hong Y.* Microstructure and properties of WC reinforced Ni-based composite coatings with Y_2O_3 addition on titanium alloy by laser cladding // Sci. Technol. Weld. Join. – 2019. – V. 24(5). – P. 517–524.
15. *Lu Y., Li J., Xu J., Chen H., Yang Y., Zhang L.* Microstructure and wear resistance of Ti-6Al-4V composite coatings prepared by laser cladding // Appl. Surf. Sci. – 2006. – V. 252(8). – P. 2832–2837.
16. *Farahmand P., Liu S., Zhang, Z., Kovacevic R.* Laser cladding assisted by induction heating of Ni–WC composite enhanced by nano-WC and La_2O_3. // Ceram. Int. – 2014. – V. 40. – P. 15421–15438A.

17. *He B.F.,Ma F., Ma D.Y., Xu K. W.* Study of Wear and Corrosion Resistances of Ni60-WC+TiC Composite Coating // *J.* Nanoelectron. Optoelectron. – 2020. – V. 15. – P. 1300–1305.
18. *Liu J., Liu C., Zhang X., Yin X., Yin X., Meng F., Liu C.* The Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladding Ni60/60%WC Composite Coatings // Metals. – 2025. – V. 5(2). – P. 166.
19. *Yao J., Zhang J., Wu, G., Wang L., Zhang Q., Liu R.* Microstructure and wear resistance of laser cladded composite coatings prepared from pre-alloyed WC-NiCrMo powder with different laser spots // Opt. Laser Technol. – 2018. – V. 101. – P. 520–530.
20. *Wu J., Zhang J., Chen D., Huang J., Shi W., An F., Wu X.* Study on the Effect of CeO_2 on the Performance of WC + Ni60 Laser Cladding Coating // Lubricants. – 2025. – V. 13(1). – P. 24.
21. *Yan J., Li H., Zhang X., Chen D., Huang J., Shi W., An F., Wu X.* Fabrication and tribological behaviors of Ti_3SiC_2/Ti_5Si_3/TiC/Ni-based composite coatings by laser cladding for self-lubricating applications // Opt. Laser Technol. – 2020. – V. 124. – P. 105989.
22. *Zhao J. N., Liang J., Chen S. Y., LIU C.S., Liu F. H.* Microstructure and Wear Properties of Laser Synthesized Composite Coatings on Ti-6Al-4V // AMM. – 2012. – V. 217–219. – P. 1354–1358.

REFERENCES

1. Makhnenko V. I., Kovalenko V. S., Lazarenko A. G. *Laser Processing of Materials* (Kyiv: Naukova Dumka, 2012) [in Ukrainian].
2. Kovalenko V. S., Kutepov A. M. *Laser Processing and Cladding of Metals* (Kharkiv: NTU “KhPI”, 2008) [in Ukrainian].
3. Venger Ye. F., Semchuk O. Yu., Havryliuk O. O. *Laser-Induced Nanostructures in solids* (K.: Akademperiodyka, 2016) [in Ukrainian].
4. Steen W. M., Mazumder J. *Laser Material Processing* (London: Springer, 2010).
5. Buchanan V. *Laser Cladding* (Cambridge: Woodhead Publishing, 2011).
6. Arif Z. U., Khalid M. Y., Ans Al Rashid, Ehtsham ur Rehman, Atif M. Laser deposition of high-entropy alloys: A comprehensive review. *Opt. Laser Technol*. 2022. **145**: 107447.
7. Huijun Yu ,Lu Lu ,Zifan Wang Chuanzhong Chen Microstructure and Wear Resistance of a Composite Coating Prepared by Laser Alloying with Ni-Coated Graphite on Ti-6Al-4V Alloy. *Materials*. 2022. **15**(16): 5512.
8. Sun S., Wang J., Xu J., Xiangyu C., Chenghu J., Zhendong C., Ru H., Yongyue L., Junke J. Preparing WC-Ni coatings with laser cladding technology: A review. *Mat. Today Commun.* 2023. **37**: 106939.
9. Kang L., Chen F., Wu B., Liu X., Ge H. Mechanical properties and microstructure of laser-cladding additively manufactured 316L stainless steel sheets. *J. Constr. Steel Res.* 2022. **199**: 107603.
10. Kang L., Zhang C., Bradford Mark A., Liu X. Residual stresses in circular steel tubular columns repaired by laser-cladding additive manufacturing. *Thin-Walled Struct*. 2023. **193**: 111275.
11. Vasyliev M. O., Nyshchenko M. M., Gurin P. O. Laser-Assisted Modification of a Surface of Titanium Implants. *Usp. Fiz. Met.* 2010. **11**(2): 209 [in Russian].

12. Gu B., Wang Y., Xu G., Gao L. Effect of ultrasonic impact on the microstructure and properties of 30%WC-Ni ceramic coatings by laser cladding. *Ceram. Int*. 2025. **51**(4): 4677.
13. Feng M., Ma Y., Tian Y. Cao H. Microstructure and Wear Resistance of Ti6Al4V Titanium Alloy Laser-Clad Ni60/WC Composite Coating. *Materials*. 2024. **17**(1): 264.
14. Wang K., Du D., Liu G., Chang B., Hong Y. Microstructure and properties of WC reinforced Ni-based composite coatings with Y_2O_3 addition on titanium alloy by laser cladding. *Sci. Technol. Weld. Join*. 2019. **24**(5): 517.
15. Lu Y., Li J., Xu J., Chen H., Yang Y., Zhang L. Microstructure and wear resistance of Ti-6Al-4V composite coatings prepared by laser cladding. *Appl. Surf. Sci*. 2006. **252**(8): 2832.
16. Farahmand P., Liu S., Zhang Z., Kovacevic R. Laser cladding assisted by induction heating of Ni–WC composite enhanced by nano-WC and La_2O_3. *Ceram. Int.* 2014. **40**: 15421A.
17. He B.F., Ma F., Ma D.Y., Xu K.W. Study of Wear and Corrosion Resistances of Ni60-WC+TiC Composite Coating. *J. Nanoelectron. Optoelectron.* 2020. **15**: 1300.
18. Liu J., Liu C., Zhang X., Yin X., Yin X., Meng F., Liu C. The Microstructure and Wear Resistance of Laser Cladding Ni60/60%WC Composite Coatings. *Metals*. 2025, **15**(2): 166.
19. Yao J., Zhang J., Wu, G., Wang L., Zhang Q., Liu R. Microstructure and wear resistance of laser cladded composite coatings prepared from pre-alloyed WC-NiCrMo powder with different laser spots. *Opt. Laser Technol*. 2018. **101**: 520.
20. Wu J., Zhang J., Chen D., Huang J., Shi W., An F., Wu X. Study on the Effect of CeO_2 on the Performance of WC + Ni60 Laser Cladding Coating. *Lubricants*. 2025. **13**(1): 24.
21. Yan J., Li H., Zhang X., Chen D., Huang J., Shi W., An F., Wu X. Fabrication and tribological behaviors of Ti_3SiC_2/Ti_5Si_3/TiC/Ni-based composite coatings by laser cladding for self-lubricating applications. *Opt. Laser Technol*. 2020. **124**: 105989.
22. Zhao J. N., Liang J., Chen S. Y., LIU C.S., Liu F. H. Microstructure and Wear Properties of Laser Synthesized Composite Coatings on Ti-6Al-4V. *AMM*. 2012. **217-219**: 1354.

UDC 621.793.7:669.14:620.18 *DOI: 10.15407/Surface.2025.17.264*

MODIFICATION OF TITANIUM ALLOY SURFACES BY LASER CLADDING OF COMPOSITES: STRUCTURAL FEATURES AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES

S. V. Kyrylakha

National University "Zaporizhzhia Polytechnic",
64 Zhukovskogo Str., Zaporizhzhia-69063, Ukraine,
e-mail: lanakirilaha@gmail.com

This paper presents a review of recent studies on laser composite coatings for titanium alloys, which are considered a promising approach to improving their wear resistance and service life under operating conditions. The novelty of the work lies in the systematization and comparison of approaches to the formation of reinforced layers on titanium-based substrates using laser alloying, cladding, and composite modifiers (Ni, WC, Ti_3SiC_2, Y_2O_3, ect.), which makes it possible to identify the most effective mechanisms for controlling microstructure and tribological characteristics. The aim of the study is to summarize recent experimental findings on the influence of laser technologies on the structure and properties of titanium alloys, as well as to outline further prospects for their practical application. The review materials include publications of leading researchers (Fehg, Wang, Yan, et al.), which are based on tribological tests, microstructural analysis, and comparison with alternative coatings. The methodology of the work is grounded in a critical analysis of experimental data and the correlation of wear resistance, friction coefficient, and surface morphology under different conditions. The main results demonstrate that the formation of reinforced Ni–WC composite layers reduces the friction coefficient of titanium alloys on average by 35–40%, while the introduction of self-lubricating phases Ti_3SiC_2, TiC, Ti_5Si_3) further enhances the stability of tribological characteristics. A regularity has been revealed according to which the optimal combination of a metallic matrix and carbide phases minimizes plastic deformation and wear under loads typical for the aviation and transportation industries. The conclusions emphasize that laser composite coatings on titanium substrates are an effective means of improving operational reliability; however, further research should be directed towards investigating the behaviour of such systems in marine environments, at elevated temperatures, and under cyclic loading.

Keywords: *titanium alloys; laser composite coatings; wear resistance; tribology; microstructure; $Ni-WC$; Ti_3SiC_2; laser cladding; surface modification; additive manufacturing.*