УДК 669.295:621.793.7:620.178.16 DOI: 10.18372/0370-2197.3(112).21606

В. О. ГЕРАСИМОВ, С. Р. МНАЦАКАНОВ

Національний університет "Київський авіаційний інститут", Україна

ВПЛИВ ПРИРОДИ ЕЛЕКТРОДНОГО МАТЕРІАЛУ НА МОРФОЛОГІЮ ТА АБРАЗИВНУ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОІСКРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ТИТАНІ

Мета роботи полягала в оцінюванні впливу природи електродного матеріалу на морфологію та абразивну зносостійкість електроіскрових покриттів, сформованих на технічно чистому титані ВТ1-0 та титановому сплаві ВТ6. Для електроіскрового легування застосовували композиційну кераміку ЦЛАБ-1, твердий сплав ВК-8, порошковий дріт системи Fe–15Cr–4B та хром. Дослідження проводили на установці «Елітрон-22» із використанням режиму обробки зі струмом короткого замикання 2 А та середньому питомому часу обробки основи 2 хв/см^2. Абразивне зношування оцінювали за умов нежорстко закріпленого абразиву – у середовищі кварцового піску зернистістю 250 мкм. Встановлено, що електроіскрове легування формує дискретний нерівномірний поверхневий рельєф, характер якого залежить від електродного матеріалу. Показано, що формування зміцненого шару супроводжується суттєвими відмінностями у характері зношування залежно від типу електрода. Для покриттів на основі ВК-8 та Fe–15Cr–4B спостерігається найбільш стабільна поведінка в умовах абразивного впливу, тоді як використання ЦЛАБ-1 та хрому не забезпечує суттєвого покращення зносостійкості порівняно з вихідним станом. Найменший ваговий знос забезпечило покриття ВК-8: 0,002 г для ВТ1-0 та 0,0015 г для ВТ6, що відповідно у 7,5 та 3,3 раза менше, ніж для немодифікованих основ. Отримані результати свідчать, що ефективність електроіскрового зміцнення визначається комплексом факторів, пов'язаних із формуванням структури поверхневого шару та його взаємодією з основою, що дозволяє цілеспрямовано підбирати електродні матеріали для підвищення експлуатаційних властивостей титану.

Ключові слова: *титан, покриття, тертя, абразив, електроіскрове легування, зносостійкість.*

Вступ. Титан і титанові сплави належать до важливих конструкційних матеріалів для відповідальних елементів авіаційної, енергетичної, суднобудівної, медичної та транспортної техніки. Їх застосування обумовлене поєднанням високої питомої міцності, корозійної стійкості та працездатності у складних середовищах.

Титанові сплави широко застосовуються в авіаційній техніці завдяки високій питомій міцності, низькій густині, корозійній стійкості та здатності працювати за значних механічних і температурних навантажень. Вони використовуються в силових і конструкційних елементах літаків, зокрема деталях планера, шасі та авіаційних двигунів, де поєднання міцності й малої маси сприяє підвищенню надійності та паливної ефективності [1]. Однією з ключових переваг титанових сплавів для авіаційних конструкцій є їх високе співвідношення міцності до густини, що забезпечує значне зниження маси деталей без пропорційної втрати міцності. Густина титанових сплавів приблизно на 50 % менша порівняно зі сталями, що робить їх особливо перспективними для відповідальних елементів літальних апаратів. Показовим є застосування сплаву Ti-10-2-3 у конструкції основної стійки шасі Boeing 777: незважаючи на нижчу межу міцності на розтяг порівняно з

високоміцною сталлю (1190 і 1930 МПа відповідно), використання титану забезпечує орієнтовне зменшення маси конструкції на 270 кг [2]. Додатковою перевагою титанових сплавів є висока корозійна стійкість, яка зменшує потребу в антикорозійному захисті та періодичному технічному обслуговуванні, сприяючи підвищенню експлуатаційної надійності авіаційних конструкцій.

Разом з тим, саме поверхневий шар таких матеріалів часто є найбільш уразливою зоною під час експлуатації, оскільки в контакті тертя виникають локальні напруження, мікропластична деформація, пошкодження оксидної плівки та накопичення дефектів. Застосування поверхневих зміцнювальних покриттів є одним із перспективних напрямів підвищення зносостійкості деталей, виготовлених із титанових сплавів. Для захисту поверхні від інтенсивного зношування та корозійного впливу розроблено широкий спектр технологій модифікування поверхневого шару. До найбільш поширених належать холодне газодинамічне напилення, високошвидкісне газополуменеве напилення, термохімічні методи обробки, газофазне осадження, лазерне плавлення та легування, плазмове напилення, подвійне плазмове поверхневе легування, дугове напилення та інші методи формування функціональних поверхневих шарів [3].

Вибір конкретної технології визначається необхідними експлуатаційними характеристиками покриття, умовами роботи деталі та особливостями взаємодії модифікованої поверхні з робочим середовищем.

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем. Типові дефекти поверхонь тертя титану і титанових сплавів можна поділити на декілька груп. До першої належать дефекти, пов’язані з безпосередньою втратою матеріалу: абразивне зношування, ерозійне руйнування, мікрорізання, утворення борозен і подряпин. До другої групи належать дефекти адгезійної природи: схоплювання, перенесення матеріалу, локальне мікроприварювання і відрив частинок поверхневого шару. Третя група охоплює дефекти підповерхневого походження: пластичну деформацію, мікротріщини, відшарування, фрагментацію зерен і зміну структури зміцненої зони [4].

За результатами досліджень тертя та ерозійного зношування титану і титанового сплаву для трубних елементів встановлено, що недостатня зносостійкість залишається одним із чинників, який обмежує ширше застосування титанових сплавів у вузлах, що працюють у контакті з твердими частинками або у середовищах із високою інтенсивністю потоків [5]. Для технічно чистого α-титану ТА3 та корозійностійкого титанового α-сплаву ТА10, легованого паладієм (Ti-0,3Pd), характерними формами пошкодження є абразивне, адгезійне й окиснювальне зношування, а під час ерозійного впливу спостерігаються борознування, вдавлювання частинок і тріщиноутворення. Це підтверджує, що поверхневий шар титанових матеріалів повинен розглядатися не лише як геометрична межа деталі, а як функціональна зона, яка сприймає основне контактне навантаження.

Окрему групу експлуатаційних дефектів становить фретинг-зношування. Воно виникає в умовах малих відносних переміщень контактуючих поверхонь, вібрацій і циклічного навантаження. Для високміцних титанових елементів кріплення фретинг-пошкодження пов’язане з підповерхневою деформацією, руйнуванням локальних структурних зон, утворенням тріщин і поступовою втратою несучої здатності поверхні [6]. Небезпека фретингу полягає в тому, що руйнування може розвиватися локально, без значної загальної зміни форми

деталі, проте саме ці локальні пошкодження часто ініціюють подальше втомне руйнування або зростання зносу.

Для сплаву ВТ6 додатковою проблемою є схильність до схоплювання під час тертя. У дослідженні антифрикційних властивостей ВТ6 зазначено, що титанові сплави, попри високі конструкційні переваги, мають низьку зносостійкість і можуть схоплюватися під час контакту з елементами кріплення або контртілами зі сталі [7]. Це джерело використовується для обґрунтування трибологічної проблеми ВТ6 та необхідності поверхневого зміцнення; воно не розглядається як прямий доказ ефективності саме поверхневого пластичного деформування. У процесі тертя необробленого сплаву ВТ6 зі сталлю можливе мікроприварювання виступів поверхні та формування зон локального руйнування. Такі процеси є небезпечними для деталей, що працюють у вузлах тертя без стабільного мащення або в умовах періодичного контакту.

В останні роки було розроблено різні технології обробки поверхні для покращення зносостійкості титанових сплавів. До них належать хіміко-термічна обробка (ХТО) (цементація, азотування), хімічне осадження з парової фази, іонна імплантація, гальваніка, фізичне осадження з парової фази, плазмове напилення та лазерна обробка поверхні тощо. Серед них технологія лазерної обробки поверхні привернула значну увагу завдяки перевагам високої ефективності обробки, мінімальної зони термічного впливу, контрольованої товщини покриття та міцної адгезії до підкладки. Автори [8] проаналізували вплив складу покриттів, зокрема матричної, твердої та самозмащувальної фаз, а також технологічних параметрів лазерного наплавлення на мікроструктуру та трибологічні характеристики. Показано, що підвищення зносостійкості досягається комплексною оптимізацією складу покриття, режимів наплавлення та зменшенням пористості й тріщиноутворення.

Для підвищення зносостійкості титанового сплаву ВТ6 автори роботи [9] використали процес ХТО, а саме хромоалітування у порошкових сумішах в контейнерах з плавким затвором. Дослідження проводили в умовах тертя ковзання на машині тертя МТ-68 по схемі вал-вкладиш, в якості контртіла використовували сталь 65Г. Установлено, що зносостійкість титанового сплаву з покриттям ВТ6 в 2,0–3,5 рази вища у порівнянні з зносостійкістю сплаву без покриття.

Зносостійкість титанового сплаву ВТ6 після дифузійного азотування та нітроцементації в закритому реакційному просторі досліджували в умовах тертя ковзання без мастильного матеріалу на машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою диск-колодка [10]. У якості контртіла використовували сталь У8. Установлено, що в даних умовах тертя зносостійкість сплаву з покриттям на 2–3 порядки вища ніж у сплава без покриття.

У роботі [11] оцінено вплив вакуумного іонного азотування на абразивну зносостійкість технічно чистого титану ВТ1-0. Поверхневу модифікацію здійснювали на установці ВПА-1 в імпульсному режимі з формуванням дифузійного азотовмісного шару. Триботехнічні випробування проводили за умов абразивного контакту з вільними частинками піску, зокрема в середовищах «пісок», «вода + пісок» та «сольовий розчин + пісок». Порівняння результатів показало, що вихідний, неазотований титан характеризується найбільшою інтенсивністю абразивного зношування. Застосування термоциклічного азотування забезпечило підвищення зносостійкості приблизно у 3 рази в піску, у 3,5 раза у водно-піщаному середовищі та у 2,5 раза в середовищі «сіль + пісок».

Для ізотермічного режиму ефект становив відповідно близько 4, 3,5 та 2,5 раза. Підвищення довговічності модифікованої поверхні пов'язують із комплексною зміною її фізико-механічного та трибологічного стану. Основними чинниками є збільшення твердості поверхневого шару, формування сприятливого розподілу залишкових напружень, обмеження пластичного деформування приповерхневих ділянок, а також зміна хімічної активності та адгезійної взаємодії поверхні з абразивним середовищем. Додатковий внесок може мати явище трибодифузії, за якого під час тертя відбувається переміщення атомів азоту з поверхневого дифузійного шару в глибші шари матеріалу.

Встановлено [12], що технологія електроіскрового легування (ЕІЛ) є перспективним методом зміцнення та відновлення деталей і такого технологічного та енергетичного обладнання, як вали насосів та електродвигунів, робочі колеса, корпуси насосів, центрифуги тощо. Для підвищення ефективності запропонованої технології було створено ряд електродних матеріалів, таких як FeNiSi – Cr3C5, WC – TiC – Mo2C – Co – Cr та WC – TiC – Co – Cr – Ni – Al, TiC–(Fe – Cr – Si – Al), NiCrBCuC – WC, FeNiCrBSiC – TiB2 та FeNiCrBSiC – CrB2, які пройшли випробування на промислових підприємствах України. Виявлено, що застосування розроблених електродів забезпечує одночасне підвищення технологічності процесу електроіскрового легування зі збільшенням терміну служби деталей технологічного обладнання в 2,0…2,5 рази.

В роботі [13] встановлено, що при використанні ЕІЛ титанових сплавів для отримання зміцнювальних покриттів Ti-Al, TiN, Ni-Cr та інших з високою твердістю, максимальна твердість нанесеного шару в шість разів вища, ніж твердість матеріалу підкладки, що значно зменшує втрату поверхні матеріалу в процесі тертя під час експлуатації та має високий зносостійкий ефект.

Перспективним методом підвищення експлуатаційної довговічності поверхні титанових сплавів є ЕІЛ, яке дає змогу локально модифікувати поверхневий шар без суттєвого термічного впливу на основний матеріал. До основних переваг методу належать низька теплова дія, незначна деформація деталі, низький рівень залишкових напружень, висока адгезійна міцність сформованого шару та можливість отримання покриттів із підвищеною твердістю, зносо- і корозійною стійкістю. Особливо важливою для авіаційних конструкцій є можливість локального зміцнення функціонально навантажених ділянок титанових деталей без зміни геометрії та суттєвого погіршення механічних властивостей основного матеріалу. Варіюванням матеріалу електрода та параметрів електроіскрового процесу можна цілеспрямовано формувати поверхневі шари на основі нітридів, інтерметалідів, карбідів та інших зміцнювальних фаз.

Мета роботи – оцінка морфологічних характеристик електроіскрових покриттів на титані та титановому сплаві та їх зносу в абразивному середовищі.

Експериментальне обладнання та методика дослідження. В якості основи використовували технічно чистий титан ВТ1-0 та титановий сплав ВТ6 (Ti-6Al-4V). ВТ1-0 має однофазну α-структуру, що забезпечує йому високу пластичність за відносно невисокої міцності. ВТ6 має складніший хімічний склад, у якому алюміній виконує роль α-стабілізатора, підвищуючи міцність і жароміцність, а ванадій є β-стабілізатором, що сприяє покращенню пластичності та технологічності сплаву (табл. 1, 2).

Таблиця 1

Порівняльні фізико-механічні властивості технічного титану ВТ1-0 та титанового сплаву ВТ6 (за ГОСТ 19807–91)

Властивості	ВТ1-0	ВТ6
Густина, г/см³	4,52	4,45
Тимчасовий опір, МПа	390-540	850-1000
Межа текучості, МПА	340	750-900
Твердість НВ	130-180	270-350
Відносне подовження, %	20	10-15
Температура плавлення, °С	1668	1650-1670
Модуль пружності, МПа	110 000	115 000

Таблиця 2

Хімічний склад в % ВТ1-0 та ВТ6 (за ГОСТ 19807–91)

Марка	Основа	Елементи, %				
		Al	V	Fe	Si	Домішки, не більше
ВТ1-0	Титан	до 0,70	-	0,25	0,10	0,640
ВТ6	Титан	5,3-6,8	3,5-5,3	0,60	0,10	0,665

Для формування модифікованих поверхневих шарів методом ЕІЛ застосовували електродні матеріали різного складу та механізму зміцнення основи. Такий підхід давав змогу оцінити вплив природи електродного матеріалу на процес формування поверхневого шару титану та його трибологічні характеристики.

Як електроди використовували композиційну кераміку ЦЛАБ-1, твердий сплав ВК8, порошковий дріт системи Fe–Cr–B та хром.

Електродний матеріал ЦЛАБ-1 на основі композиційної кераміки з Ni–Cr-зв'язкою виготовлений в Інституті проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. Його склад включав тугоплавку фазову систему гексабориду лантану та дибориду цирконію (59,19 % LaB_6, 27,47 % ZrB_2), металеву зв'язку – нікель-хромовий матричний сплав (15,33 % Ni, 5,25 % Cr), додатково легований мікрокількістю алюмінію та 0,42 % Al [14]. Електрод отримували гарячим пресуванням при температурі 1550–1600 °С протягом 25–35 хв. Пористість матеріалу не перевищувала 3 %.

Другим електродним матеріалом був твердий сплав ВК8, що містить 92 % WC та 8 % Co. Використання цього матеріалу було пов'язане з можливістю формування на поверхні титанової основи шару, збагаченого твердою карбідною фазою, здатною забезпечувати підвищення опору поверхні абразивному та адгезійному зношуванню.

Для отримання поверхневих шарів на основі заліза також застосовували порошковий дріт системи Fe–Cr–B. Базовий склад дроту відповідав сплаву Fe–15Cr–4B (мас. %). Матеріал містив близько 17–20 об. % боридних частинок $(Cr,Fe)_2B$ еліпсоїдальної морфології, розподілених у феритній матриці. Така будова електродного матеріалу створює передумови для формування композиційного поверхневого шару, у якому тверді боридні фази виконують функцію зміцнювального компонента [15].

Окрім композиційних електродних матеріалів, під час досліджень використовували хром як елементний електродний матеріал. Його застосування дозволяло оцінити особливості формування поверхневого шару при введенні до

поверхні титану окремого легувального елемента без одночасного перенесення складної багатофазної композиції.

Таким чином, вибраний набір електродних матеріалів охоплював різні підходи до поверхневого зміцнення титану: формування керамічно-боридного шару (ЦЛАБ-1), введення високотвердих карбідів (ВК8), створення металоматричного боридовмісного шару (Fe–Cr–B) та легування хромом. Це дало можливість порівняти ефективність ЕІЛ титану та титанового сплаву ВТ6 електродами різної природи та визначити найбільш перспективні варіанти поверхневого модифікування для підвищення зносостійкості.

Нанесення покриттів методом ЕІЛ здійснювали на установці «Елітрон-22». Вибір параметрів обробки (сила струму короткого замикання 2 А, частота коливань електрода 100 Гц, тривалість імпульсу ≈ 100 мкс) обґрунтований результатами дослідження [16], згідно з якими такі режими забезпечують зменшення розміру ерозійних кратерів на поверхні підкладки, що дозволяє отримати більш гладке та рівномірне покриття з мінімальною кількістю дефектів. Осадження проводилося в атмосферних умовах із застосуванням послідовних циклів осадження протягом 20 хв, що відповідає середньому питомому часу обробки основи 2 хв/см^2.

Методика випробувань базувалася на принципах стандарту ASTM G65 [17], адаптованих для дослідження тонких електроіскрових покриттів (аналог Procedure C). Для збереження цілісності покриття та уникнення деформації підкладки під час тесту, параметри було модифіковано: застосовано знижене навантаження 47 Н та лінійну швидкість 0,158 м/с [18]. Процес абразивного зношування моделювався у вільному не жорстко закріпленому абразиві. В якості абразиву використовували кварцевий пісок (SiO_2) зернистістю 250 мкм. Випробування проводилися тривалістю 20 хв, що відповідало шляху тертя 189,6 м.

Ваговий знос покриттів визначали на вагах Axis ANG200C 2-го класу точності з дискретністю 0,0001 г.

Результати досліджень та їх аналіз. Результати випробувань на зносостійкість в середовищі вільного абразиву показали, що ефективність електроіскрових покриттів на титанових сплавах істотно залежить не лише від властивостей матеріалу електрода, а й від характеру взаємодії сформованого поверхневого шару з титановою основою. Встановлено суттєву різницю у величині вагового зносу досліджуваних систем «покриття–основа» (рис. 1).

Для вихідного матеріалу ВТ1-0 втрата маси становила 0,015 г, тоді як для ВТ-6 цей показник був майже втричі нижчим і становив 0,005 г. Це свідчить про більшу опірність ВТ-6 абразивному руйнуванню порівняно з технічно чистим титаном ВТ1-0.

Морфологічний аналіз поверхні титану ВТ1-0 та титанового сплаву ВТ-6 до і після нанесення електроіскрових покриттів показав суттєву зміну характеру поверхневого рельєфу. На відміну від вихідної поверхні, яка характеризується відносно однорідною текстурою з переважно спрямованими слідами механічної обробки (рис. 2,а), після електроіскрового легування формується виражено нерівномірний, дискретний рельєф. Це пов'язано з локальним характером електроіскрового перенесення матеріалу електрода та формуванням окремих ділянок нанесеного матеріалу.

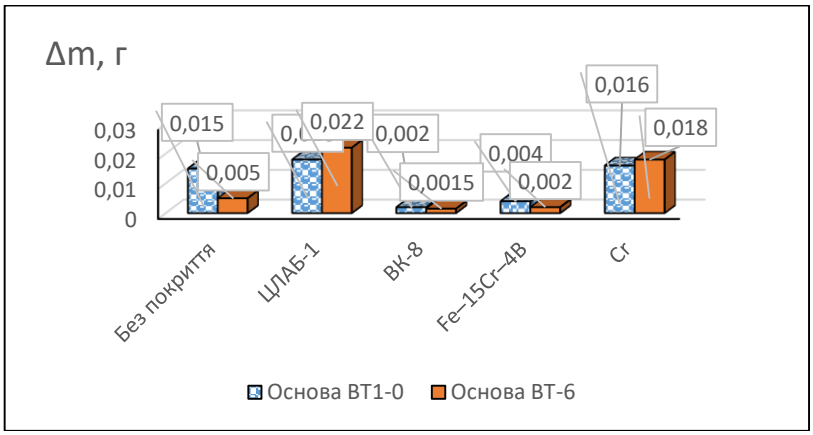


Рис. 1. Ваговий знос електроіскрових покриттів на титанових сплавах в абразивному середовищі

Поверхня, сформована електродом ЦЛАБ-1, має найбільш виражену нерівномірність (рис. 2,б).

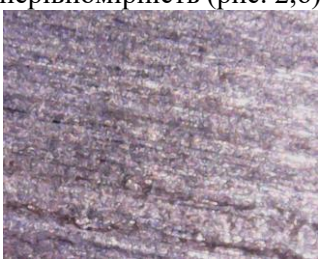
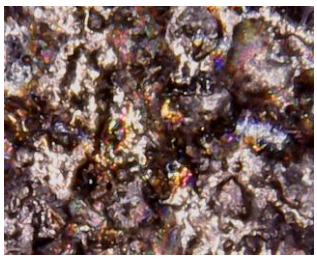
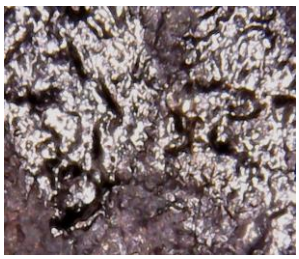
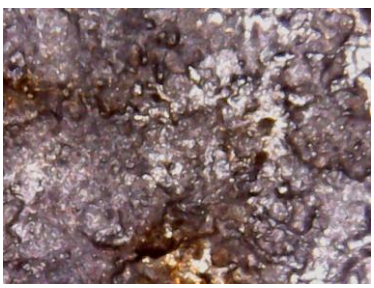
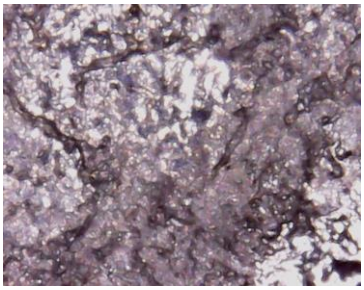

а)

б)

в)

г)

д)

Рис. 2. Морфологічні особливості ЕІП а) – сплав ВТ-6 (без покриття), б) – ЕІП ЦЛАБ-1, в) – ЕІП ВК-8; г) – ЕІП Fe–15Cr–4B; д) – ЕІП Cr.

Спостерігаються численні локальні виступи та западини неправильної форми, що формують неоднорідний поверхневий рельєф. Для покриття на ВТ1-0 характерні окремі крупні ділянки перенесеного матеріалу, тоді як на ВТ-6 поверхня має більш розвинену та дрібнодисперсну текстуру. Після тертя в середовищі абразиву рельєф покриття частково вирівнюється, однак зберігаються локальні нерівності та заглиблення (рис. 3). При цьому величина вагового зносу для ЦЛАБ-1 становила 0,018 г для ВТ1-0 та 0,022 г для ВТ-6, що у 1,2 та 4,4 раза перевищує відповідні значення для немодифікованих ЕІЛ поверхонь.

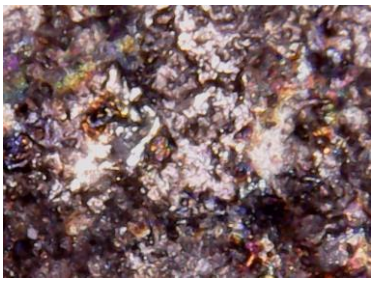
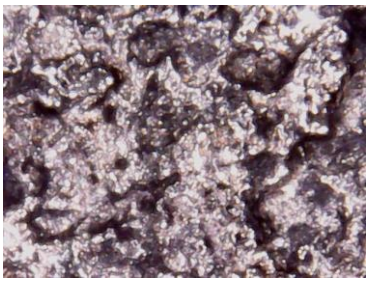
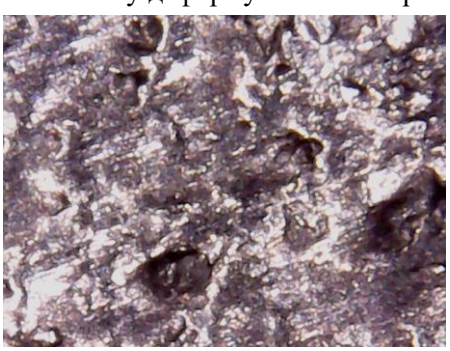

а)

б)

Рис. 3. Морфологія ЕІП композиційної кераміки ЦЛАБ-1 на титані ВТ1-0 в вихідному стані (а) та після тертя (б).

Отже, висока твердість керамічної складової не забезпечила відповідної експлуатаційної ефективності покриття. Однією з можливих причин цього є підвищена чутливість крихкого керамічного шару до локальних механічних і термічних напружень. Під час абразивного контакту тверда частинка створює локальну концентрацію напружень у поверхневому шарі. За недостатньої тріщиностійкості покриття ці напруження можуть ініціювати мікротріщини, які поширюються до межі «покриття–основа». У результаті замість поступового мікрозношування може реалізовуватися локальне відшаровування або сколювання частинок покриття. Такий механізм є принципово несприятливим для тонких ЕІП-шарів, оскільки після їх локального руйнування абразив безпосередньо взаємодіє з відносно м'якою титановою основою.

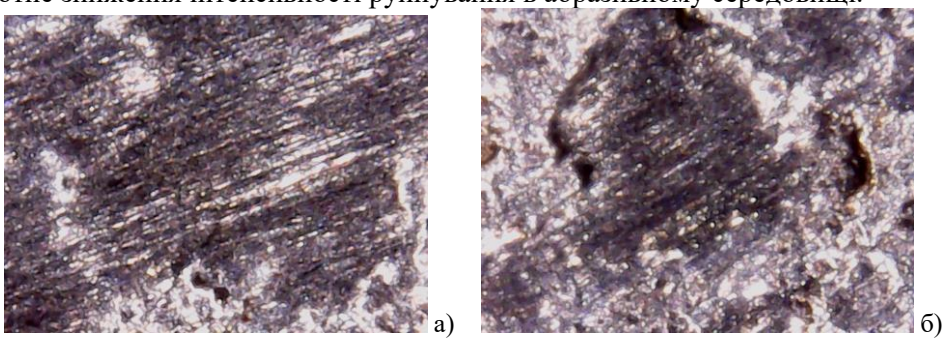
Покриття ВК-8 характеризується більш рівномірним розподілом поверхневого рельєфу порівняно з ЦЛАБ-1. Вихідна поверхня після електроіскрового нанесення має неоднорідну, але відносно компактну структуру з локальними виступами та заглибленнями. Після абразивного впливу спостерігається часткове згладжування найбільш виступаючих ділянок, а також поява окремих локальних заглиблень (рис. 4). Незважаючи на це, загальний характер поверхні зберігається. Для покриття ВК-8 зафіксовано найменші значення вагового зносу: 0,002 г на ВТ1-0 та 0,0015 г на ВТ-6, що відповідно у 7,5 та 3,3 раза менше, ніж для непокритих основ. Такий результат спричинений формуванням на поверхні титану високотвердого карбідовольфрамового шару. ВК-8 являє собою твердий сплав на основі WC із кобальтовою зв'язкою; висока твердість карбідної складової забезпечує ефективний опір мікрорізанню та пластичному деформуванню поверхні абразивними частинками.


а)

б)

Рис. 4. Поверхня ЕІП ВК-8 на ВТ1-0 (а) та ВТ-6 (б) після тертя в абразивному середовищі.

Покриття Fe–15Cr–4B також забезпечило суттєве підвищення абразивної зносостійкості. Втрата маси ВТ1-0 після нанесення цього покриття становила 0,004 г, що приблизно у 3,75 раза менше, ніж для непокритого титану. Для ВТ-6 знос зменшився до 0,002 г, тобто приблизно у 2,5 раза. Після тертя морфологія поверхні ЕІП Fe–15Cr–4B змінюється: з'являються виражені сліди ковзання та окремі ділянки локального руйнування або видалення поверхневого матеріалу. На ВТ1-0 після тертя спостерігається більш протяжний напрямлений рельєф, тоді як на ВТ-6 переважають локальні нерівності та заглиблення (рис. 5). Таким чином, за ефективністю захисту це покриття поступається ВК-8, але також забезпечує істотне зниження інтенсивності руйнування в абразивному середовищі.



а) б)

Рис. 5. Локальні ділянки ковзання на поверхні ЕІП Fe–15Cr–4B в зоні тертя в абразивному середовищі (а) – основа ВТ1-0; б) – основа ВТ-6).

Відмінність поведінки Fe–15Cr–4B та ВК-8 може бути пов'язана з комплексом структурно-механічних факторів. Для боридовмісного покриття Fe–15Cr–4B тверді зміцнювальні фази протидіють проникненню абразивних частинок, тоді як металева складова забезпечує певну здатність до релаксації локальних напружень. Така гетерогенна структура потенційно сприяє зниженню концентрації напружень на межі покриття й основи порівняно з твердим поверхневим шаром ВК-8. Водночас остаточне встановлення механізму потребує додаткового дослідження фазового складу та мікроструктури поперечного перерізу покриття.

Поверхня після нанесення хрому характеризується неоднорідним рельєфом із системою локальних виступів, западин і ділянок різної морфології (рис. 2, д). Після тертя поверхня стає більш текстурованою, при цьому проявляються напрямлені сліди абразивного впливу та локальні заглиблення. На ВТ1-0 і ВТ-6 характер зміни поверхні є подібним, однак ступінь її пошкодження візуально відрізняється. Відповідно до результатів вагового зношування (рис. 1), покриття Cr не забезпечило підвищення абразивної зносостійкості порівняно з немодифікованою електроіскровим легуванням основою: величина зносу становила 0,016 г для ВТ1-0 (зростає в 1,1 рази) та 0,018 г для ВТ-6 (зростає в 3,6 рази).

Таким чином, морфологічні дослідження свідчать, що електроіскрове легування істотно змінює характер поверхні титанових матеріалів, формуючи неоднорідний дискретний рельєф. Найбільш виражена нерівномірність поверхні спостерігається для покриття ЦЛАБ-1, тоді як покриття ВК-8 характеризується більш компактною морфологією та найменшою зміною поверхні після тертя в абразивному середовищі. Для ЕІПFe–15Cr–4B після тертя спостерігаються переважно напрямлені сліди з локальними ділянками пошкодження, тоді як для

Cr характерне формування виражених слідів абразивного зношування. Виявлена морфологічна неоднорідність покриттів узгоджується з істотною різницею їхньої зносостійкості в абразивному середовищі.

Висновки

1. Встановлено, що електроіскрове легування істотно змінює морфологію поверхні технічно чистого титану ВТ1-0 та титанового сплаву ВТ6, формуючи дискретний нерівномірний рельєф, характер якого визначається природою електродного матеріалу. Найбільш виражена неоднорідність поверхні характерна для покриття ЦЛАБ-1, тоді як покриття ВК-8 формує більш компактний та стабільний поверхневий шар.

2. Проаналізовано абразивну зносостійкість електроіскрових покриттів ЦЛАБ-1, ВК-8, Fe–15Cr–4B та Cr на титанових основах. Встановлено, що найвищу ефективність забезпечує покриття ВК-8, для якого ваговий знос становив 0,002 г на ВТ1-0 та 0,0015 г на ВТ6, що відповідно у 7,5 та 3,3 рази менше порівняно з немодифікованими основами. Покриття Fe–15Cr–4B також забезпечило суттєве зниження зносу, тоді як ЦЛАБ-1 і Cr не підвищили абразивну зносостійкість поверхні.

3. Визначено, що ефективність електроіскрового зміцнення титану в абразивному середовищі залежить від його морфології, структурно-механічних властивостей та характеру взаємодії з основою. Для ВК-8 висока зносостійкість пов’язана з формуванням високотвердого карбідовольфрамового шару, тоді як для Fe–15Cr–4B позитивний ефект забезпечується поєднанням твердих боридних фаз і металевої матриці, здатної до релаксації локальних напружень.

Список літератури

1. Yolcu M. E. Titanium Alloys in Aviation and Aerospace Technologies. *KÜRE*. 2025. Access: https://kureansiklopedi.com/en/detay/titanium-alloys-in-aviation-and-aerospace-technolo (Access Date: August 18, 2026).

2. Williams J.C., Boyer R.R. Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components. *Metals*. 2020. 10(6). 705. https://doi.org/10.3390/met10060705

3. Hu W., Markovych S., Tan K., Shorinov O., Cao T. Research on wear resistance coating of aircraft titanium alloy parts by cold spraying. Technology. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. № 6(166). С.66-71 https://doi.org/10.32620/aktt.2020.6.07

4. Al-Quraan T. M.A., Khimko A., Khimko M., Mikosianchyk O., Mnatsakanov R., Yakobchuk O. Increasing the Wear Resistance of Titanium Alloys in Plain Bearings with Galvanic and Vacuum-Arc Coatings. *Tribology in Industry. 2026.* Vol. 48, 1. P. 72-82. https://doi.org/10.24874/ti.2043.10.25.11

5. Mao T., Yu Z., Yan J., Xu Y., Zhang S., Peng L. Investigation of Friction and Erosion Wear Properties of Titanium and Titanium Alloy Pipes. *Materials.* 2024. Vol. 17. Article 5043. https://doi.org/10.3390/ma17205043

6. Tong Y., Hua K., Xie H., Cao Y., Huang Z., Liang Z., Li X., Wu H., Wang H. Subsurface deformation mechanism and the interplay relationship between strength–ductility and fretting wear resistance during fretting of a high-strength titanium alloy. *Friction*. 2024. Vol. 12, No. 10. P. 2259–2280. https://doi.org/10.1007/s40544-024-0870-y

7. Студент М. М., Лук’яненко О. Г., Погрелюк І. М., Маркович С. І., Труш В. С. Антифрикційні властивості титанового сплаву ВТ6, зміцненого дифузійним насиченням елементами втілення. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. II. С. 148–153. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.148-153

8. G. Li, X. Zhang, H. Li et al. The strategies for enhancing the wear resistance of titanium alloy via laser cladding: A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2026. Vol. 136. 107607. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107607

9. Лоскутова Т. В., Хижняк В. Г., Погребова І. С., Смокович І. Я., Кузьменко Т. М. Зносостійкість сплаву ВТ6 з комплексними покриттями на основі хрому та алюмінію. *Актуальні напрями матеріалознавства: збільшення ресурсу конструкцій на основі конвергенції сучасних технологій обробки матеріалів* : матеріали міжнародної науково-практичної конференції, Харків, 24–25 вересня 2020 р. Харків : ХНАДУ, 2020. С. 87–89.

10. Бобіна М. М., Соловар О. М., Романішин Р. Зносостійкі покриття на основі азоту та вуглецю на титановому сплаві ВТ6. *Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6»*, 1–2 грудня 2016 р., м. Київ. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. С. 156–159.

11. Рутковський А. В., Маркович С. І., Магопець С. О., Маркович В. С. Зносостійкість титанового сплаву ВТ1-0 з модифікованою поверхнею в умовах абразивного впливу. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 8(39). Ч. 2. С. 41–47. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.41-47

12. Стороженко М. С., Уманський О. П., Шелудько В. Є., Губін Ю. В., Курінна Т. В. Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 10. С. 21–25. https://doi.org/10.37434/as2020.10.04

13. Wang J., Zhang M., Dai S., Zhu L. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*. 2023. 13(8).1473. https://doi.org/10.3390/coatings13081473

14. Панашенко В.М. Склад, структура і властивості електроіскрових і лазерно-електроіскрових ZrB2-вмісних покриттів на титанових сплавах. *Електричні контакти та електроди*. 2014. № 12. С.134-143.

15. Sorour A. A. Fe–Cr–B-based wear-resistant alloys – A review on microstructure and tribological properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 33. P. 7888-7901. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.143

16. Penyashki T., Kostadinov G., Kandeva M. Improvement of Surface Properties of Carbon Steel Through Electrospark Coatings from Multicomponent Hard Alloys. *Materials*. 2025. *18*(10), 2211. https://doi.org/10.3390/ma18102211

17. Doering A., Danks D., Mahmoud S., Scott J. Evaluation of ASTM G65 abrasive — Spanning 13 years of sand. *Wear*. 2011. Vol. 271, Is. 9–10. P. 1252-1257. https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.051

18. Al-Quraan TMA, Mikosianchyk O, Mnatsakanov R, Shevchenko O, Popov O, Lopata O and Miroshnyk O. Evaluation of wear resistance of electrospark coatings VK15 and R6M5 on steel 1045 in an abrasive environment. *Front. Mech. Eng*. 2026. Vol. 12 12:1827682. https://doi.org/10.3389/fmech.2026.1827682

Отримано: 26 серпня 2026
Прийнято: 01 вересня 2026
Опубліковано: 18 жовтня 2026

Герасимов Володимир Олегович – здобувач вищої освіти третього рівня ОС «Доктор філософії» спеціальності G9 Прикладна механіка, Національний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058

Мнацаканов Степан Рудольфович – здобувач вищої освіти освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 134 «Авіаційна та ракетно-космічна техніка», освітньо-професійна програма «Обладнання повітряних суден», Державний університет «Київський авіаційний інститут», пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058.

V. HERASYMOV, S. MNATSAKANOV

INFLUENCE OF ELECTRODE MATERIAL NATURE ON THE MORPHOLOGY AND ABRASIVE WEAR RESISTANCE OF ELECTROSPARK COATINGS ON TITANIUM

The aim of this study was to evaluate the effect of electrode material composition on the morphology and abrasive wear resistance of electrospark coatings formed on commercially pure titanium VT1-0 and titanium alloy VT6. Electrospark alloying was performed using composite ceramic CLAB-1, VK-8 hard alloy, Fe–15Cr–4B powder wire, and chromium. The experiments were conducted using an Elitron-22 installation at a short-circuit current of 2 A and an average specific treatment time of 2 min/cm². Abrasive wear was evaluated under conditions of a loosely fixed abrasive using quartz sand with a particle size of 250 μm. It was established that electrospark alloying produces a discrete, non-uniform surface relief, the characteristics of which depend on the electrode material. The formation of the hardened layer was shown to result in significant differences in wear behavior depending on the electrode type. Coatings based on VK-8 and Fe–15Cr–4B demonstrated the most stable behavior under abrasive loading, whereas the use of CLAB-1 and chromium did not provide a significant improvement in wear resistance compared with the untreated substrates. The lowest mass wear was recorded for the VK-8 coating: 0.002 g for VT1-0 and 0.0015 g for VT6, which was 7.5 and 3.3 times lower, respectively, than that of the unmodified substrates. The obtained results indicate that the effectiveness of electrospark surface strengthening is governed by a combination of factors associated with the formation of the surface-layer structure and its interaction with the substrate, enabling the targeted selection of electrode materials to improve the service properties of titanium.

Key words: *titanium, coating, friction, abrasive, electrospark alloying, wear resistance.*

References

1. Yolcu M. E. Titanium Alloys in Aviation and Aerospace Technologies. *KÜRE*. 2025. Access: https://kureansiklopedi.com/en/detay/titanium-alloys-in-aviation-and-aerospace-technolo (Access Date: August 18, 2026).

2. Williams J.C., Boyer R.R. Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components. *Metals*. 2020. 10(6). 705. https://doi.org/10.3390/met10060705

3. Hu W., Markovych S., Tan K., Shorinov O., Cao T. Research on wear resistance coating of aircraft titanium alloy parts by cold spraying. Technology. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2020. № 6(166). С.66-71 https://doi.org/10.32620/aktt.2020.6.07

4. Al-Quraan T. M.A., Khimko A., Khimko M., Mikosianchyk O., Mnatsakanov R., Yakobchuk O. Increasing the Wear Resistance of Titanium Alloys in Plain Bearings with Galvanic and Vacuum-Arc Coatings. *Tribology in Industry. 2026.* Vol. 48, 1. P. 72-82. https://doi.org/10.24874/ti.2043.10.25.11

5. Mao T., Yu Z., Yan J., Xu Y., Zhang S., Peng L. Investigation of Friction and Erosion Wear Properties of Titanium and Titanium Alloy Pipes. *Materials.* 2024. Vol. 17. Article 5043. https://doi.org/10.3390/ma17205043

6. Tong Y., Hua K., Xie H., Cao Y., Huang Z., Liang Z., Li X., Wu H., Wang H. Subsurface deformation mechanism and the interplay relationship between strength–ductility and fretting wear resistance during fretting of a high-strength titanium alloy. *Friction*. 2024. Vol. 12, No. 10. P. 2259–2280. https://doi.org/10.1007/s40544-024-0870-y

7. Student M. M., Lukianenko O. H., Pohreliuk I. M., Markovych S. I., Trush V. S. Antyfryktsiini vlastyvosti tytanovoho splavu VT6, zmitsnenoho dyfuziinym nasychenniam elementamy vtilennia. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. 2025. Vyp. 12(43), ch. II. S. 148–153. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.148-153

8. G. Li, X. Zhang, H. Li et al. The strategies for enhancing the wear resistance of titanium alloy via laser cladding: A review. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2026. Vol. 136. 107607. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107607

9. Loskutova T. V., Hizhnjak V. G., Pogrebova I. S., Smokovich I. Ja., Kuz'menko T. M. Znosostijkist' splavu VT6 z kompleksnimi pokrittjami na osnovi hromu ta aljuminiju. Aktual'ni naprjami materialoznavstva: zbil'shennja resursu konstrukcij na osnovi konvergenciї suchasnih tehnologij obrobki materialiv : materiali mizhnarodnoї naukovo-praktichnoї konferenciї, Harkiv, 24–25 veresnja 2020 r. Harkiv : HNADU, 2020. S. 87–89.

10. Bobina M. M., Solovar O. M., Romanishin R. Znosostijki pokrittja na osnovi azotu ta vuglecju na titanovomu splavi VT6. Mizhnarodna naukova konferencija «Materiali dlja roboti v ekstremal'nih umovah – 6», 1–2 grudnja 2016 r., m. Kiïv. Kiïv : KPI im. Igorja Sikors'kogo, 2016. S. 156–159.

11. Rutkovs'kij A. V., Markovich S. I., Magopec' S. O., Markovich V. S. Znosostijkist' titanovogo splavu VT1-0 z modifikovanoju poverhneju v umovah abrazivnogo vplivu. Central'noukraïns'kij naukovij visnik. Tehnichni nauki. 2023. Vip. 8(39). Ch. 2. S. 41–47. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.41-47

12. Storozhenko M. S., Umans'kij O. P., Shelud'ko V. Є., Gubin Ju. V., Kurinna T. V. Rozrobka tehnologij i materialiv dlja elektroiskrovogo nanesennja pokrittiv z metoju pidvishhennja terminu ekspluataciї i nadijnosti detalej tehnologichnogo i energetichnogo obladnannja ta instrumentiv. Avtomatichne zvarjuvannja. 2020. № 10. S. 21–25. https://doi.org/10.37434/as2020.10.04

13. Wang J., Zhang M., Dai S., Zhu L. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review. *Coatings*. 2023. 13(8).1473. https://doi.org/10.3390/coatings13081473

14. Panashenko V.M. Sklad, struktura i vlastivosti elektroiskrovih i lazerno-elektroiskrovih ZrB2-vmisnih pokrittiv na titanovih splavah. Elektrichni kontakti ta elektrodi. 2014. № 12. S.134-143.

15. Sorour A. A. Fe–Cr–B-based wear-resistant alloys – A review on microstructure and tribological properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2024. Vol. 33. P. 7888-7901. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.143

16. Penyashki T., Kostadinov G., Kandeva M. Improvement of Surface Properties of Carbon Steel Through Electrospark Coatings from Multicomponent Hard Alloys. *Materials*. 2025. *18*(10), 2211. https://doi.org/10.3390/ma18102211

17. Doering A., Danks D., Mahmoud S., Scott J. Evaluation of ASTM G65 abrasive — Spanning 13 years of sand. *Wear*. 2011. Vol. 271, Is. 9–10. P. 1252-1257. https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.01.051

18. Al-Quraan TMA, Mikosianchyk O, Mnatsakanov R, Shevchenko O, Popov O, Lopata O and Miroshnyk O. Evaluation of wear resistance of electrospark coatings VK15 and R6M5 on steel 1045 in an abrasive environment. *Front. Mech. Eng*. 2026. Vol. 12 12:1827682. https://doi.org/10.3389/fmech.2026.1827682

Volodymyr Herasymov – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail: 5805561@stud.kai.edu.ua, https://orcid.org/0009-0005-4167-7629

Stepan Mnatsakanov – Bachelor's degree candidate in Higher Education, specializing in 134 «Aviation and rocket-space engineering», educational and professional program «Aircraft Eguipment», State University "Kyiv Aviation Institute", 1 Lubomyra Huzar Ave., Kyiv, Ukraine, 03058, E-mail:8388503@stud.nau.edu.ua, https://orcid.org/0009-0008-5416-2714