

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Наконечного Сергія Олеговича

на тему «Формування структури та властивостей захисних покриттів із суміші порошків «вискоентропійний сплав – тугоплавка сполука» холодним газодинамічним напиленням»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 Механічна інженерія

за спеціальністю 132 Матеріалознавство

Актуальність теми дисертації

Однією з найважливіших проблем сучасного матеріалознавства є розробка і удосконалення технологій отримання композиційних матеріалів і покриттів для зміцнення або відновлення робочих поверхонь деталей машин та обладнання, які працюють в екстремальних умов експлуатації, а саме в умовах корозії, високотемпературного окиснення та інтенсивного зношування.

Для нанесення захисних покриттів перспективними є композиційні матеріали на основі вискоентропійних сплавів з добавками тугоплавких сполук. За рахунок багатокомпонентного складу вискоентропійних сплавів вдається забезпечити стійкість покриттів до корозії та високотемпературного окиснення, а добавки високотвердих тугоплавких боридів та карбідів підвищують зносостійкість покриттів. Але на даний час приділено недостатньо уваги дослідженню процесів формування структури та властивостей композиційних покриттів на основі вискоентропійних сплавів з добавками тугоплавких сполук. Зокрема, в літературних джерелах досить обмежені дані щодо формування структури та властивостей таких покриттів, отриманих методом холодного газодинамічного напилення, який завдяки низькій температурі процесу напилення має ряд переваг порівняно з іншими методами газотермічного напилення.

Тому дана дисертаційна робота, присвячена встановленню закономірностей формування структурно-фазового складу та властивостей захисних композиційних покриттів на основі вискоентропійних сплавів з добавками тугоплавких боридів та карбідів, отриманих методом холодного газодинамічного напилення, є надвичайно актуальною. Результати досліджень, проведених в рамках даної роботи сприятимуть більш широкому використанню покриттів системи «вискоентропійний сплав – тугоплавка сполука» для

захисту деталей машин і механізмів, що експлуатуються в умовах корозійних агресивних середовищ, підвищених температур та інтенсивного зношування.

Актуальність роботи підтверджується тим, що вона виконувалась в рамках ряду науково-дослідних робіт Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є. О. Патона, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Обґрунтованість наукових результатів дисертаційного дослідження, їхня переконливість і ґрунтовність висновків та рекомендацій зумовлені застосуванням широкого спектра дослідницьких методів і сучасного експериментального обладнання. У роботі використано різнопланові експериментальні методи, зокрема рентгеноструктурний аналіз, сканувальну електронну мікроскопію, мікроіндентування для визначення мікротвердості покриттів і їхньої тріщиностійкості, диференціальну сканувальну калориметрію, а також електрохімічний метод прямої поляризації для оцінки корозійної стійкості покриттів. Окрім цього, досліджено термічну стабільність матеріалів за допомогою методу циклічного нагрівання зразків протягом 100 годин при температурі 900 °С, а також проведено трибологічні випробування композиційних покриттів в умовах тертя ковзання без мастила.

Отримані результати комплексних досліджень, проведених із використанням перелічених методів, забезпечили надійну та узгоджену інформацію про закономірності формування структурно-фазового складу й властивостей покриттів на основі високоентропійних сплавів із добавками тугоплавких сполук, отриманих методом холодного газодинамічного напилення.

Наукові результати дисертаційної роботи обґрунтовані на високому рівні і не вступають у протиріччя з фундаментальними основами матеріалознавства.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1) Встановлено повне збереження фазового складу та наноструктурного стану вихідного порошкового матеріалу в композиційних AlNiCoFeCrTi ВЕС та $\text{AlNiCoFeCr-TiB}_2/(\text{B}_4\text{C-TiB}_2)$ покриттях, отриманих за різних досліджених режимів ХГН, завдяки обмеженому тепловому впливу на нього через низьку температуру процесу напилення, що також дозволяє уникнути таких дефектів, як окислення, залишкові термічні напруження, структурні та фазові перетворення, притаманних традиційним методам газотермічного напилення.

2) Вперше на прикладі композиційних $\text{AlNiCoFeCr-TiB}_2/(\text{B}_4\text{C-TiB}_2)$ покриттів, отриманих ХГН, встановлено що, за однакових умов напилення, їх

товщина збільшується в 10,1 та 17,2 разів порівняно з ВЕС покриттям без ТС (до 1110 мкм та 1890 мкм проти 110 мкм), а їх структура пошарово деформується та додатково подрібнюється в процесі напилення за рахунок наявності частинок ТС, які активують поверхню, на яку відбувається напилення, видаляючи оксидні плівки та забезпечуючи взаємодію ювенільних поверхонь порошкових частинок.

3) Вперше доведено, що стабільність фазового складу та наноструктурного стану композиційних $\text{AlNiCoFeCr-TiB}_2/(\text{B}_4\text{C-TiB}_2)$ покриттів, отриманих ХГН, зберігається до температури 1000 °С та перевищує термічну стабільність композитів з матрицею з традиційних сплавів, що обумовлено багатоеlementним складом ВЕС матриці та впливом високої ентропії змішування, яка збільшує стабільність твердих розчинів за високих температур у порівнянні з інтерметалічними та іншими упорядкованими фазами.

4) Вперше встановлено можливість підвищення твердості, в'язкості руйнування та зносостійкості AlNiCoFeCr-TiB_2 і $\text{AlNiCoFeCr-(B}_4\text{C-TiB}_2)$ покриттів, отриманих ХГН, за рахунок відпалу за температури 1000 °С (в зоні температур фазового перетворення ГЦК→ОЦК).

5) Вперше встановлено, що AlNiCoFeCr-TiB_2 покриття мають вищу за нержавіючу сталь 316L електрокорозійну стійкість в 3,5 % розчині NaCl завдяки формуванню на поверхні суцільної та щільної пасивувальної оксидної плівки Cr_2O_3 , натомість, $\text{AlNiCoFeCr-(B}_4\text{C-TiB}_2)$ покриття не володіють антикорозійними властивостями через відсутність суцільної пасивувальної плівки оксиду хрому на поверхні та утворення складних оксидів різного складу, що, на відміну від Cr_2O_3 , можуть мати низьку стійкість в умовах корозії.

6) Вперше встановлено, що відпал композиційних AlNiCoFeCr-TiB_2 та $\text{AlNiCoFeCr-(B}_4\text{C-TiB}_2)$ покриттів за температури 800 °С та 1000 °С підвищує їх стійкість до окиснення завдяки як збільшенню розміру зерен/субзерен і, відповідно, зменшенню кількості границь зерен/субзерен (шляхів прискореної дифузії) та нижчої швидкості дифузії кисню, так і формуванню суцільного та щільного шару оксиду алюмінію, який запобігає дифузії атомів кисню та захищає покриття та підкладку від внутрішнього окиснення протягом 100 годин за температури 900 °С. Стійкість до окиснення AlNiCoFeCr-TiB_2 та $\text{AlNiCoFeCr-(B}_4\text{C-TiB}_2)$ покриттів після відпалу за температури 800 °С та 1000 °С в 1,8 і 1,3 рази, відповідно, перевищує стійкість до окиснення нержавіючої сталі 316L.

Отримані в роботі результати та положення наукової новизни достатньо повно опубліковано в 3 наукових статтях у фахових періодичних виданнях, що індексуються наукометричними базами даних (Scopus, Web of Science Core Collection); 2 статтях в матеріалах міжнародних конференцій «Nanomaterials: Applications & Properties» (IEEE, 2019 та 2021 pp.), що індексуються

наукометричними базами даних (Scopus, Web of Science Core Collection), 11 публікаціях за матеріалами доповідей на конференціях.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Наконечного Сергія Олеговича повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності зі спеціальності «132 Матеріалознавство» галузі знань «13 Механічна інженерії» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Матеріалознавство».

Зміст дисертаційної роботи відповідає назві теми, висновки містять аргументовані положення щодо наукової новизни та повністю узгоджуються із поставленими автором завданнями дослідження. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям інженерії поверхні та захисних покриттів.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Наконечного Сергія Олеговича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою. Текст дисертації викладено в науковому стилі в логічній послідовності. В роботі правильно використовуються загальноприйняті в матеріалознавстві терміни.

Дисертаційна робота здобувача Наконечного Сергія Олеговича складається зі вступу, 6 розділів, висновків та переліку джерел посилань. Робота містить 3 таблиці, 74 рисунки, та 2 додатки. Загальний обсяг дисертації складає 203 сторінки. Список використаних джерел нараховує 165 найменувань.

У вступі детально обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, визначено її зв'язок із науковими програмами та сформульовано ключові завдання дослідження. У роботі чітко окреслено об'єкт і предмет досліджень, представлено комплекс використаних методів та обладнання, розкрито основні аспекти наукової новизни й визначено практичну значущість отриманих результатів. Окрім цього, наведено особистий внесок здобувача, а також

інформацію щодо публікацій за темою дисертації та апробацію результатів досліджень на міжнародних наукових конференціях.

Перший розділ містить огляд літературних джерел, присвячених тематиці дисертації. Проведено ґрунтовний аналіз основних властивостей високоентропійних сплавів (ВЕС) та композиційних матеріалів на їхній основі. Висвітлено ключові підходи та параметри, необхідні для розробки ВЕС із заданим фазовим складом, структурою та властивостями. Окрім цього, наведено інформацію про склад та характеристики композиційних матеріалів на основі ВЕС із різними тугоплавкими сполуками (ТС). Особливу увагу приділено аналізу літературних даних щодо різних типів покриттів на основі ВЕС та композитів, а також детально розглянуто переваги й недоліки існуючих методів їх отримання.

У другому розділі дисертаційної роботи представлено детальну інформацію про склад високоентропійних сплавів, а також обґрунтовано вибір вихідних металевих компонентів для їх синтезу та тугоплавких сполук для армування. Описано методику холодного газодинамічного напилення (ХГН) покриттів, а також комплекс методів дослідження, зокрема аналіз структури, фазового складу, механічних властивостей та термостабільності порошкових матеріалів і композиційних покриттів. Крім того, розглянуто питання стійкості покриттів до корозії, окиснення та зносу.

У третьому розділі дисертаційної роботи представлено результати дослідження структури та фазового складу вихідних порошків високоентропійних сплавів. Встановлено, що AlNiCoFeCr ВЕС має композиційну структуру на основі ОЦК твердого розчину з включеннями σ -фази та TiC, тоді як інший варіант AlNiCoFeCr ВЕС містить ОЦК твердий розчин із включеннями ГЦК твердого розчину.

AlNiCoFeCr ВЕС було обрано як матричний компонент для створення композиційних сумішей ВЕС–ТС, призначених для напилення покриттів. Крім того, експериментально доведено, що для забезпечення високої однорідності розподілу компонентів у порошкових композиційних сумішах ВЕС–ТС достатньо двогодинного змішування в планетарному млині.

У четвертому розділі дисертаційної роботи досліджено вплив технологічних параметрів холодного газодинамічного напилення, зокрема тиску та температури потоку стисненого повітря, на характеристики покриттів із порошків високоентропійних сплавів та їхніх сумішей із тугоплавкими сполуками. Проаналізовано зміни товщини, відносної щільності, структури, фазового складу та механічних властивостей отриманих покриттів.

Встановлено, що за різних параметрів тиску (0,7–0,9 МПа) та температури (200–550 °С) потоку стисненого повітря вихідний фазовий склад та структура порошків залишаються незмінними. Водночас збільшення тиску та/або температури призводить до значного зростання товщини покриттів та подрібнення їхньої структури.

Додавання тугоплавких сполук до складу AlNiCoFeCr ВЕС суттєво підвищує кінетичну енергію частинок, що, у свою чергу, забезпечує значне збільшення товщини композиційних AlNiCoFeCr–TiB₂/(B₄C–TiB₂) покриттів — до 1110 мкм та 1890 мкм відповідно, у порівнянні з 450 мкм та 110 мкм для AlNiCoFeCrTi та AlNiCoFeCr покриттів. Однак додавання тугоплавких сполук до більш твердого AlNiCoFeCrTi ВЕС спричиняє руйнування верхніх шарів покриття через зростання швидкості удару частинок та низьку пластичність ВЕС.

Методи мікро- та макроіндентування дозволили визначити, що отримані композиційні покриття мають оптимальне поєднання мікротвердості та в'язкості руйнування. Зокрема, для AlNiCoFeCrTi покриття ці показники становлять 10,30 ГПа та 5,21 МПа·м^{1/2}, для AlNiCoFeCr–TiB₂ — 6,91 ГПа та 9,80 МПа·м^{1/2}, а для AlNiCoFeCr–(B₄C–TiB₂) — 11,18 ГПа та 9,42 МПа·м^{1/2}. У порівнянні з композиційними покриттями на основі чистих металів та їхніх сплавів, а також інших ВЕС, отриманих високотемпературними методами напилення, ці покриття демонструють переваги завдяки збереженню вихідної структури та фазового складу порошків. Це стало можливим завдяки низькотемпературному процесу ХГН, а також деформаційному зміцненню, спричиненому інтенсивною пластичною деформацією та подрібненням структури в ході напилення.

П'ятий розділ дисертаційної роботи присвячено вивченню термічної стабільності структури, фазового складу та механічних властивостей отриманих методом холодного газодинамічного напилення покриттів на основі високоентропійних сплавів за підвищених температур експлуатації. За допомогою диференційної сканувальної калориметрії порошків, високотемпературних рентгенівських досліджень та відпалу покриттів визначено температурні межі фазових перетворень та/або існування метастабільних твердих розчинів у порошковому високоентропійному сплаві AlNiCoFeCr і встановлено вплив температури на фазовий склад, структуру та механічні властивості (мікротвердість, в'язкість руйнування) композиційних AlNiCoFeCr–TiB₂/(B₄C–TiB₂) покриттів.

Встановлено, що структура AlNiCoFeCr ВЕС, що складається з ОЦК та ГЦК твердих розчинів, залишається стабільною при температурах нагрівання до 1000 °С, хоча відбувається фазове перетворення та перерозподіл елементів. При температурі

600–870 °C спостерігається зростання вмісту ГЦК твердого розчину, а при температурах понад 870 °C — збільшення частки ОЦК твердого розчину.

При додаванні TiB_2 до AlNiCoFeCr ВЕС температурні межі фазових перетворень залишаються незмінними. Водночас введення армованої композитної кераміки ($\text{B}_4\text{C-TiB}_2$) сприяє стабілізації ОЦК структури до температури 800 °C та формуванню включень боридів типу MeB_2 ($\text{Me} = \text{Cr}, \text{Co}, \text{Fe}$) через посилення зернограничної дифузії на межі між частинками. Лише за температури 900–1000 °C в $\text{AlNiCoFeCr-(B}_4\text{C-TiB}_2)$ покриттях спостерігається перерозподіл елементів між ОЦК і ГЦК твердими розчинами з незначним зростанням вмісту останнього у структурі. Окрім цього, під час нагрівання покриттів відбувається зниження залишкових напружень та збільшення розмірів ОКР, зерен і субзерен фазових складових внаслідок термічного впливу.

Встановлено, що мікротвердість покриттів AlNiCoFeCr-TiB_2 зменшується з 6,91 ГПа до 5,02 ГПа при відпалі за 800 °C через збільшення частки ГЦК твердого розчину. Однак при нагріванні до 1000 °C зі зростанням вмісту ОЦК твердого розчину вона підвищується до 7,42 ГПа, перевищуючи показники невідпалених покриттів. Аналогічна тенденція спостерігається і для $\text{AlNiCoFeCr-(B}_4\text{C-TiB}_2)$ покриттів: їхня мікротвердість знижується з 11,18 ГПа до 9,75 ГПа при 800 °C через зменшення концентрації Al та Cr у ОЦК твердому розчині, але при 1000 °C вона зростає до 12,59 ГПа завдяки формуванню міцніших контактів між частинками та наявності боридних фаз типу MeB_2 .

В'язкість руйнування покриттів $\text{AlNiCoFeCr-TiB}_2/(\text{B}_4\text{C-TiB}_2)$ після відпалу за 1000 °C підвищується у 1,85 раза (до 18,16 МПа·м^{1/2}) та у 1,4 раза (до 13,16 МПа·м^{1/2}) відповідно, що зумовлено зниженням залишкових напружень та утворенням міцніших контактів між частинками.

Аналіз зносостійкості показав, що покриття AlNiCoFeCr-TiB_2 втрачають стійкість при відпалі за 600 °C та 800 °C через збільшення частки м'якої ГЦК фази, однак при 1000 °C вона зростає завдяки підвищенню вмісту ОЦК твердого розчину та зміцненню контактів між частинками. Покриття $\text{AlNiCoFeCr-(B}_4\text{C-TiB}_2)$ демонструють зростання зносостійкості при 800 °C та 1000 °C, що пояснюється їхньою високою твердістю, посиленням міцності міжчастинкових зв'язків та утворенням боридів типу MeB_2 .

Шостий розділ дисертації присвячено дослідженню стійкості розроблених покриттів до корозії та високотемпературного окиснення.

Електрохімічні випробування у 3,5% розчині NaCl показали, що покриття AlNiCoFeCr-TiB_2 мають значно вищу корозійну стійкість порівняно з нержавіючою сталлю. Це зумовлено утворенням пасивувальної оксидної плівки Cr_2O_3 на поверхні, яка ефективно уповільнює процес корозії. Водночас

покриття $\text{AlNiCoFeCr}-(\text{B}_4\text{C}-\text{TiB}_2)$ продемонстрували нижчу корозійну стійкість через локальну корозію частинок армованого керамічного композиту $(\text{B}_4\text{C}-\text{TiB}_2)$, що проявляється на поверхні покриття.

Проведено випробування покриттів в умовах високотемпературного окиснення протягом 100 годин при $900\text{ }^\circ\text{C}$. Встановлено, що вихідні композиційні покриття $\text{AlNiCoFeCr}-\text{TiB}_2/(\text{B}_4\text{C}-\text{TiB}_2)$ без термічної обробки мають нижчу стійкість до окиснення порівняно з нержавіючою сталлю. Це пояснюється фазовими перетвореннями між ОЦК і ГЦК твердими розчинами AlNiCoFeCr ВЕС при $900\text{ }^\circ\text{C}$, а також високими термічними та залишковими напруженнями, які активують процес взаємодії покриття з киснем на ранніх стадіях окиснення. Натомість покриття AlNiCoFeCrTi відзначаються високою стійкістю до окиснення без термічної обробки, що пояснюється стабільністю фазових перетворень та рівномірним перерозподілом елементів після гомогенізуючого відпалу вихідного порошку перед його розмелом для процесу ХГН.

Після термічного відпалу покриттів $\text{AlNiCoFeCr}-\text{TiB}_2/(\text{B}_4\text{C}-\text{TiB}_2)$ їхня стійкість до окиснення значно зростає, перевищуючи показники нержавіючої сталі (приріст маси становить $0,05\text{ мг/мм}^2$ та $0,07\text{ мг/мм}^2$ відповідно, проти $0,09\text{ мг/мм}^2$ для сталі). У покриттях, що пройшли відпал за $800\text{ }^\circ\text{C}$, спостерігається зростання частки ОЦК твердого розчину, що сприяє збільшенню мікротвердості до $7,52\text{ ГПа}$ та $12,16\text{ ГПа}$. Водночас в'язкість руйнування дещо знижується — до $11,56\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ та $8,91\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ відповідно.

Після окиснення покриттів, які пройшли термічну обробку при $1000\text{ }^\circ\text{C}$, відбувається збільшення частки ГЦК твердого розчину, що призводить до зменшення мікротвердості до $5,88\text{ ГПа}$ та $9,81\text{ ГПа}$. При цьому в'язкість руйнування покриттів $\text{AlNiCoFeCr}-\text{TiB}_2$ залишається майже незмінною ($11,56\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$), а для $\text{AlNiCoFeCr}-(\text{B}_4\text{C}-\text{TiB}_2)$ вона зростає до $14,65\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Загалом, зміни механічних характеристик покриттів після окиснення не перевищують 15% , що свідчить про їхню високу термічну стабільність і перспективність для подальшого використання.

Таким чином, термічний відпал композиційних покриттів $\text{AlNiCoFeCr}-\text{TiB}_2/(\text{B}_4\text{C}-\text{TiB}_2)$ при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ суттєво покращує їхні механічні властивості, зносостійкість та стійкість до високотемпературного окиснення. Отримані покриття можуть ефективно використовуватися для багатофункціонального захисту деталей і виробів, виготовлених із традиційних матеріалів, металів і сплавів.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлено у 19 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, з яких 3 статті у виданнях, віднесених до першого — третього квартилів (Q1—Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports; також результати дисертації були апробовані на 13 наукових фахових конференціях.

Високий рівень публікацій не викликає сумніву, оскільки 3 статті здобувача опубліковано в наукових виданнях першого-третього квартилів, де забезпечується ґрунтовне рецензування статей спеціалістами у відповідній області. Всі заявлені здобувачем публікації мають безпосереднє відношення до теми дисертаційної роботи та в повній мірі висвітлюють основні результати дисертаційного дослідження.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

1. У дисертаційній роботі некоректно сформульовано об'єкт дослідження. Об'єктом має бути процес або явище, що породжує проблемну ситуацію і підлягає вивченню. Відтак, об'єктом дослідження є не самі покриття, а процеси їх формування на основі високоентропійних сплавів AlNiCoFeCr та AlNiCoFeCrTi, а також композиційних матеріалів AlNiCoFeCr–TiB₂ та AlNiCoFeCr–(B₄C–TiB₂), отриманих методом холодного газодинамічного напилення.

2. Серед недоліків роботи слід відзначити відсутність системного порівняння властивостей розроблених покриттів із еталонними або комерційними аналогами. Автор обмежується порівнянням властивостей покриттів, отриманих за різних технологічних режимів холодного газодинамічного напилення та відпалу. Окрім того, у роботі міститься аналіз мікротвердості покриттів AlNiCoFeCrTi, отриманих методом холодного газодинамічного напилення, у порівнянні з покриттями з інших високоентропійних сплавів, отриманими іншими методами газотермічного напилення (с. 97, рис. 4.5). Однак, таке порівняння не дає об'єктивної картини внаслідок різного складу високоентропійних сплавів, що порівнюються. Стійкість покриттів AlNiCoFeCr–TiB₂ та AlNiCoFeCr–(B₄C–TiB₂) до корозії та високотемпературного окиснення оцінюється в порівнянні зі сталлю (розділи 6.1, 6.2). Оскільки в роботі акцентується увага на перевагах методу холодного газодинамічного напилення для нанесення покриттів на основі

високоентропійних сплавів, то доцільно було б провести напилення отриманих в роботі сплавів методом плазмового або HVOF-напилення, які сьогодні широко використовуються в промисловості. Це дозволило б порівняти властивості розроблених покриттів однакового складу, але отриманих різними методами напилення і довести переваги методу холодного газодинамічного напилення.

3. У другому розділі, пункті 2.7.3, не зазначено кількість випробувань зразків на одну точку під час триботехнічних досліджень, що є важливим параметром для коректного аналізу отриманих результатів.

4. Автор детально представив мікроструктури покриттів із високоентропійних сплавів AlNiCoFeCr та AlNiCoFeCrTi, а також композиційних матеріалів AlNiCoFeCr–TiB₂ та AlNiCoFeCr–(B₄C–TiB₂), отриманих за різних технологічних режимів холодного газодинамічного напилення. Водночас у дисертації відсутні дані мікроспектрального аналізу, що ускладнює інтерпретацію отриманих результатів. Зокрема, у рисунку 5.5 представлено СЕМ-зображення поверхні покриттів AlNiCoFeCr BEC–TiB₂ до (а) та після термічного відпалу при 600 °С (б), 800 °С (в) і 1000 °С (г). Однак із тексту та ілюстрацій не зрозуміло, яким чином автор визначав окремі фази на поверхні покриттів, зокрема ОЦК та ГЦК. Для більшої точності та обґрунтованості висновків доцільно було б доповнити рисунки таблицями з результатами мікрорентгеноспектрального аналізу, які відображають вміст хімічних елементів у кожній фазі.

5. У роботі містяться деякі неточності у використанні термінології. Зокрема, на сторінці 74 замість «сухе тертя» коректніше вказати «тертя без мастила», замість «швидкість зношування» – «інтенсивність зношування», а «об'єм зношування» слід замінити на «об'ємний знос». Аналогічні термінологічні неточності спостерігаються і в розділі 5 (сторінки 131, 132, 143).

6. У дисертації перелік умовних скорочень та їх розшифрування подано лише після вступу (с. 30). Згідно наказу МОН №40 від 2017 р. перелік умовних скорочень має бути після змісту перед основною частиною дисертації - тобто перед вступом, а не після. Слід також зазначити, що автор використовує скорочення вже у змісті роботи (с. 18–21), що може ускладнювати сприйняття тексту.

7. На деяких рисунках (рис. 4.7, 4.15, 5.7) мікроструктури покриттів, отриманих при різних технологічних режимах, мають різну орієнтацію - зверху, знизу та збоку. Це ускладнює розуміння їхньої будови відносно підкладки.

8. У тексті дисертації виявлено граматичні помилки та некоректні формулювання: «давання» замість «додавання» (с. 171), «причому їх мікротвердість та зносостійкість AlNiCoFeCr BEC–(B₄C–TiB₂) ХГН значно вищі, ніж у AlNiCoFeCr BEC–TiB₂ ХГН покриттів» (с. 144), тощо.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Наконечного Сергія Олеговича на тему «Формування структури та властивостей захисних покриттів із суміші порошків «вискоентропійний сплав – тугоплавка сполука» холодним газодинамічним напиленням» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для 13 Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Наконечний Сергій Олегович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

Зав. відділу міжнародних зв'язків
та трансферу технологій
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича
Національної академії наук України
д.т.н., доцент

 Марина СТОРОЖЕНКО

Підпис Марини Стороженко
засвідчую:

Учений секретар
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича
Національної академії наук України
к.ф.-м.н.

М.П.



 Денис МИРОНЮК

« 26 » травня 20 25 року