

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Могилка Владислава Віталійовича

на тему **«Механічні та корозійні властивості композиційних
покриттів, синтезованих ультразвуковою ударною
обробкою сплавів на основі Ti, Cu, Al»**,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії
в галузі знань **«13 Механічна інженерія»**
за спеціальністю **«132 Матеріалознавство»**

Актуальність теми дисертації.

Застосування різноманітних сплавів на основі кольорових металів, зокрема Ti, Cu, Al, є ключовим у таких сферах, як машинобудування, електротехніка, авіаційна промисловість, суднобудування, ракетобудування та залізничний транспорт. Дані сплави відзначаються досить високими фізико-механічними властивостями, а їхнє використання, зокрема у машинобудівній промисловості, дозволяє створювати легші та більш економічні агрегати і конструкційні елементи.

Особливий інтерес викликають сплави ВТ6 та АМг6, які відрізняються не тільки легкістю, а і задовільною міцністю та корозійною стійкістю. Латунь ЛС59-1 також широко застосовується у промисловості завдяки задовільній міцності та оброблюваності. Варто зазначити, що Україна має значні резерви титану, а також володіє великим досвідом у виробництві авіаційної техніки. Зокрема, останнім часом велика увага приділяється зростанню вітчизняного виробництва БПЛА, яке повинне втричі перебільшити існуючі показники. Вирішення важливої проблеми зменшення ваги найбільш навантажених деталей – елементів крила та каркасу – БПЛА дальнього радіусу дії вимагає застосування нових більш міцних матеріалів. На сьогодні для виробництва каркасних елементів, деталей двигунів, роторів і шасі використовують переважно титанові сплави, для крил та фюзеляжу – алюмінієві сплави. Підвищення рівня експлуатаційних властивостей таких матеріалів в основному забезпечується поєднанням деформаційної та термічної обробки, проте ці способи є широко відомими та майже повністю вичерпали себе.

Але залишається низка проблем, які виникають при використанні даних сплавів, такі як термічна стабільність та довговічність, що пов'язані з

корозійною стійкістю та опором зношуванню. Дані проблеми можуть бути вирішені за допомогою застосування одного із найбільш ефективних методів інтенсивної пластичної деформації поверхні матеріалів, а саме ультразвукової ударної обробки (УЗУО). Цей метод поєднує у собі різноманітні процеси, такі як механо-хімічний синтез покриттів (поверхневих композитів), наноструктурування, зміцнення та інші, що сприяють суттєвому покращенню зносостійкості та втомної витривалості елементів багатьох конструкцій.

Таким чином, розвиток та вдосконалення методики УЗУО для поверхневого зміцнення сплавів на основі кольорових металів є важливими для забезпечення якості та довговічності виробів багатьох сучасних технологічних галузей. Оскільки дана дисертаційна робота спрямована на вирішення цих важливих наукових проблем, це засвідчує її актуальність.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження стосується наступного:

- Комбінацією ультразвукової ударної обробки з використанням керамічних порошків та термічної обробки автору вдалося синтезувати композиційне покриття на поверхні титанового сплаву ВТ6 з тришаровою структурою, яка складається з ущільненого шару порошку, армованого частинками подрібненого порошку матричного сплаву та зони деформаційного зміцнення.
- Запропонований підхід дозволив кардинально поліпшити властивості сплаву ВТ6, зокрема інструментальну твердість (до 4-х разів), коефіцієнт тертя (у 2,5 рази) та опір окисненню (у 1,5 рази). При цьому покращення опору корозійному руйнуванню у середовищі 3,5% NaCl досягає 6,5 разів.
- Встановлено фактори, які забезпечили зростання мікротвердості латуні ЛС59-1 до 5 разів після УЗУО з порошком SiC: армування високоміцними частинками карбідного порошку, диспергування зерен та перебіг фазових перетворень.
- Застосуванням попереднього електроіскрового легування алюмінієвого сплаву АМг6 титаном значно підвищено ефективність подальшої ультразвукової ударної обробки завдяки формуванню інтерметалідних включень на основі ультрадисперсної зеренної структури. Результатом є зростання до ~2,5 разів поверхневої мікротвердості та захисної ефективності від корозії у сольовому розчині 3,5% NaCl, порівняно із вихідним станом.

Отримані результати та положення наукової новизни відзначаються високим рівнем професіоналізму, обґрунтованості та достовірності. Про це свідчать наступні фактори:

- 6 публікацій у наукових виданнях Scopus (Q2-Q3): оприлюднення результатів у виданнях, що індексуються базою даних Scopus, свідчить про високу якість даної наукової роботи та релевантність результатів;
- участь у міжнародних наукових конференціях: доповіді на 7 міжнародних наукових конференціях підтверджують актуальність, цінність та достатню апробованість даної роботи у глобальному науковому товаристві;
- виконання дисертації у рамках національних науково-дослідних робіт, таких як «Наукові основи механохімічного УЗУО-синтезу зносостійких покриттів конструкційних сплавів авіаційної техніки для підвищення військової спроможності» (номер державної реєстрації 0118U000220, 2018 – 2020 рр.) та «Структурно-фазові механізми керування комплексом поверхневих властивостей конструкційних і функціональних сплавів комбінованими тепловими, йонними та деформаційними впливами (номер державної реєстрації 0121U109752, 2021 – 2023 рр.), підтверджує її актуальність та зосередженість на практично значущих аспектах та актуальних проблемах матеріалознавства.

Отже, можна вважати, що поставлене в дисертації наукове завдання – визначення структурно-фазових станів, які забезпечують покращення механічних та корозійних властивостей поверхні сплавів на основі Ti, Cu, Al, повністю виконане, а дисертаційна робота є достатньо вагомим внеском до сучасного матеріалознавства, як галузі науки.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Дисертаційна робота здобувача Могилка Владислава Віталійовича за своїм змістом повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності «132 Матеріалознавство» галузі знань «13 Механічна інженерія» та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Матеріалознавство».

Зміст дисертаційної роботи повністю відповідає назві теми, висновки містять аргументовані положення щодо наукової новизни та добре узгоджуються із поставленими дисертантом завданнями дослідження.

Дисертація є завершеною науковою роботою за напрямом «Інноваційні технології інженерії поверхні» з переконливим особистим внеском здобувача.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Могилка Владислава Віталійовича є результатом його самостійних досліджень і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають відповідні посилання на літературні джерела. Отже, дотримання принципів академічної доброчесності не викликає сумніву.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою із використанням усталеної науково-технічної термінології. Структура дисертації вибудована логічно, що сприяє її сприйняттю як послідовно, наочно та доказово викладеному матеріалу.

Дисертація містить вступ, 5 розділів, висновки, список літератури та додаток з опублікованими за темою дисертації працями (13 праць). Загальний обсяг дисертації складає 172 сторінки.

У **вступі** обґрунтовано основні причини, які зумовили необхідність даної роботи для вирішення важливих проблем матеріалознавства, чітко сформульовані головні цілі, завдання та фокус дослідження. Вказано комплекс використаних експериментальних методів та підкреслено зв'язок дисертаційної роботи з актуальними науковими темами (2 державні науково-дослідні роботи). Сформульовано ключові аспекти новаторства роботи (наукової новизни) і можливості її подальшого практичне застосування (4 пункти) та доведено їх цінність для промисловості. Надано інформацію стосовно апробації та представлення результатів дослідження, а також зазначено особистий внесок здобувача.

Аналіз вищенаведеної інформації дозволяє свідчити, що здобувач брав повноцінну участь на кожному етапі дослідження: формулюванні мети, цілей та задач дисертаційної роботи, розробці комбінованих методик та їх застосуванні, виготовленні об'єктів дослідження, плануванні та проведенні експерименту, узагальненні та аналізі даних, а також формуванні висновків щодо отриманих результатів, підготовці наукових статей та участі у міжнародних конференціях.

У **першому розділі** дисертаційної роботи проведено глибокий аналіз наукових джерел, який розкриває сучасний стан та проблематику використання методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД) для покращення механічних властивостей металевих сплавів. У даному розділі розкрито питання вивчення впливу різних параметрів на структурно-фазові стани та властивості поверхні сплавів на основі Ti, Cu, та Al під час ІПД. Крім того, розглянуті можливості створення композиційних або захисних покриттів за допомогою ультразвукових технологій, спрямованих на вдосконалення матеріалів для авіаційної, суднобудівної промисловості та інших галузей. Також висвітлюється проблема недостатньої кількості досліджень, зосереджених на синтезі покриттів за допомогою ІПД на поверхні кольорових сплавів, що є ключовим аспектом даної дисертаційної роботи.

У **другому розділі** подано інформацію щодо особливостей проведеного експерименту та розроблених методик створення захисних композиційних покриттів. Також детально описано об'єкти та методи дослідження властивостей. Обґрунтовано вибір конкретних об'єктів дослідження та методів

їх оброблення, а саме таких як ультразвукова, термічна обробка і електроіскрове легування. Детально вказано фізико-технологічні параметри для кожного із методів у процесах обробки-дослідження. Описано ключові особливості сучасних методів дослідження властивостей та структури, таких як рентгеноструктурний аналіз, електронна мікроскопія, дюрومتрія, мікро- та макротрибологічні випробування і корозійні тести. Особливий акцент зроблено на вимірюванні зносостійкості на мікротвердості.

Третій розділ присвячений вивченню впливу УЗУО з додаванням дрібнодисперсних порошків α - Si_3N_4 , β - Si_3N_4 та Al_2O_3 та подальшим термічним впливом на комплекс властивостей поверхні титанового сплаву ВТ6. Розглядаються процеси та особливості формування мікроструктури, хімічного та фазового складу, шорсткості поверхні синтезованих покриттів (п. 3.1–3.2), їхньої товщини та термічної стабільності (п. 3.3). Значну увагу приділено процесам високотемпературного окиснення при комбінованому впливі УЗУО та термічної обробки (п. 3.4) із визначенням кінетики цих процесів (п. 3.5). Зазначається, що швидкість окиснення вихідного та модифікованого УЗУО зразків ВТ6 описується параболічним законом з енергією активації 256 кДж/моль та 264 кДж/моль, відповідно; довжина дифузійного шляху атомів кисню після обробки зменшується на порядок величини (42 мкм проти 400 мкм, відповідно). Корозійна стійкість деформаційних композитів, синтезованих комбінованим деформаційним та тепловим впливом (п. 3.6), а також характеристики та механізми зношування (п. 3.7) докладно обговорюються і представляють вагому практичну цінність. Інструментальна твердість і модуль пружності захисного композитного покриття Al_2O_3 відповідно досягають 12,8 ГПа та ~170 ГПа, що втричі та на ~50% вище, ніж для вихідного сплаву ВТ6; коефіцієнт тертя зменшується упродовж ~30 циклів випробувань в ~2,5 рази, а втрати матеріалу на зношування – в ~20 разів. Слід відмітити, що представлені результати макро- та мікротрибологічні випробувань, дозволили автору надати ґрунтовні пояснення механізмів зношування та пояснити виявлені особливості зміни механічних властивостей, вплив процесів окиснення на поверхневе зміцнення внаслідок застосованих комбінованих методів обробки (п. 3.8).

У **четвертому розділі** представлені результати дослідження фазового складу та структурних особливостей поверхні латуні ЛС59-1 після ультразвукової ударної обробки з додаванням дрібнодисперсних порошків SiC та Al_2O_3 , а також після термічного впливу. Описано розроблені та вдосконалені методики ультразвукового ударного зміцнення латуні, відзначено, що загальна товщина синтезованих захисних композитних покриттів із покращеними механічними характеристиками становить приблизно 500 мкм (п. 4.1). Вплив механічного легування порошками Al_2O_3 та SiC (різних фракцій) на кількісний

фазовий склад латуні ЛС59-1 у вихідному стані та після УЗУО представлений в п. 4.2, особливості структуроутворення, змін хімічного складу – в п. 4.3, а морфологічні особливості поверхні латуні після модифікації – в п. 4.4. Серед ключових висновків, які є важливими для науки та практики, варто відзначити, що зростання мікротвердості поверхні латуні ЛС59-1 відбувається приблизно в 5 разів (до 6,7 ГПа) після ультразвукової ударної обробки з додаванням порошку SiC у порівнянні з початковим станом. Часткове подрібнення та втілення порошків до приповерхневих шарів латуні внаслідок інтенсивної пластичної деформації, спричиненої УЗУО, обумовлюють градієнтну структуру синтезованих покриттів: ущільнений шар порошку товщиною близько 100 мкм; матричний сплав, зміцнений частинками порошку, товщиною до 150 мкм.

У **п'ятому розділі** представлені результати аналізу структурно-фазових станів та фізико-механічних характеристик поверхні алюмінієвого сплаву АМг6 після його електроіскрового легування титаном (EIL_{Ti}) та подальшої ультразвукової ударної обробки. Висвітлено характер змін мікротвердості під дією УЗУО та комбінованої обробки (п. 5.1), особливості формування мікроструктури внаслідок створення захисного покриття (п. 5.2). Також встановлено основні закономірності дифузійних процесів та фазових змін у поверхневих шарах сплаву АМг6 (п. 5.3–5.4), що забезпечуються обраними режимами легування та ультразвукової ударної обробки. Інтенсивність зміцнення після EIL_{Ti} + УЗУО зростає майже втричі порівняно із УЗУО та складає 13,6 МПа/мкм та 33,2 МПа/мкм, відповідно. Також обговорюються причини значного підвищення корозійної стійкості (п. 5.5) – формування градієнтного захисного покриття, бімодальної структури з ультрадисперсними зернами та значної кількості оксидних включень. Захисна ефективність від корозії (опір кородуванню) після комбінованої обробки EIL_{Ti} + УЗУО зростає на 26%, порівняно із вихідним станом. Важливо, що і у даному випадку синтезоване покриття має градієнтну структуру: 1) оксидна плівка, що представлена анатазом TiO_2 або близьким за стехіометрією оксидом, 2) твердий розчин $Ti-Al$, 3) шарувата плівка з оксидів алюмінію Al_2O_3 та анатазу TiO_2 , 4) область деформаційного зміцнення.

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 висвітлені у 6 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 5 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 6 статей у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science

Core Collection та/або Scopus, з яких 6 статей у виданнях, віднесених до другого – третього квартилів (Q2–Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports; 0 патентів на винахід, що пройшли кваліфікаційну експертизу та безпосередньо стосуються наукових результатів дисертації; 0 патентів України на корисну модель; 0 одноосібних монографій, що рекомендовані до друку Вченою радою КПП ім. Ігоря Сікорського та пройшли рецензування. Також результати дисертації були апробовані на 7 наукових фахових конференціях.

Дисертація здобувача не містить елементів плагіату чи фальсифікації, а схожість тексту з відкритими джерелами є мінімальною. Всі основні наукові результати, представлені в дисертаційній роботі здобувача, повністю відображено в його наукових публікаціях. Їх високий рівень обумовлений належністю науково-періодичних видань, в яких опубліковано статті здобувача, до другого-третього квартилів.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи.

Не зважаючи на високий загальний рівень представленої дисертації, вона не позбавлена певних дискусійних моментів, які потребують додаткового уточнення:

1. Для випадку титанового сплаву ВТ6 випробування на зносостійкість проводились у квазістатичному (рис. 3.24, а) та динамічному (рис. 3.24, б) режимах (с. 108), але в методичній частині роботи про це не згадується. У табл. 3.7 (с. 110) наводяться характеристики зношування за різних умов досліджень, у тому числі дані склерометрії, але ґрунтового порівняння цих даних не проведено.
2. Використання порошку SiC дозволяє досягти максимального ефекту зміцнення латуні ЛС59-1 у ~5 разів, значення мікротвердості складають ~5,65 ГПа та ~6,7 ГПа для фракцій 28 мкм–40 мкм та 160 мкм–200 мкм, відповідно (рис. 4.1, с. 124). А які значення мікротвердості для інших фракцій порошку, розмір яких знаходяться у проміжку між 20 та 200 мкм? Необхідно було б пояснити такий суттєвий розкид цього параметру і чим саме він був обумовлений. Можливо автор прогнозував, що залежність властивостей від розміру порошку буде лінійною? Якщо все ж таки такі дослідження проводилися, то чому вони не представлені?
3. В розділі 3.5. «Кінетика окиснення приповерхневих шарів внаслідок УЗУО» (с. 99) наведено схематичну будову композиційного покриття (рис. 3.17), однак недостатньо наочним виглядає співставлення цієї моделі з експериментальними даними. Переконливих пояснень саме такої структури не наводиться. Тому було б доцільно надати пояснення в тексті роботи.

4. В тексті роботи не надається пояснень з яких міркувань після електроіскрового легування титаном алюмінієвого сплаву АМгб застосовується контактнo-зсувна схема ударного навантаження замість статичної. Крім того, в п. 5.1 зазначається тільки амплітуда та час УЗУО (с.139), а схема і середовище обробки взагалі не вказані, що вимагає повернення до с. 59 для з'ясування цього питання.

5. В пункті 5.2 «Особливості впливу комбінованої обробки на мікроструктуру поверхневих шарів» на рисунку 5.2 (с. 142) представлено результати трансмісійної електронної мікроскопії для поверхневих шарів алюмінієвого сплаву АМГ6. На мою думку, для повноти картини стосовно змін фазового складу доцільно було б провести розшифровку електронограм та підтвердити формування інтерметалідів та оксидів, про які йдеться у науковій новизні.

У роботі допущено також декілька стилістичних огріх. Так, спостерігаються порушення пунктуації, наприклад, на с. 5 «Усі результати, що виносяться на захист є новими» та на с. 27 «Для прикладу у роботі...» не вистачає ком, на с. 31, 32 при позначенні хімічного складу ($\text{CuC}_3\text{Sn}_{11}$, $\text{CuPb}_{10}\text{Sn}_{10}$, $\text{CuPb}_{24}\text{Sn}_4$ та $\text{CuPb}_{24}\text{Sn}$) не застосовано нижній регістр, не уніфіковано маркування сплавів у літературному огляді, на с. 50 відсутні пояснення на рисунках 2.1, б та 2.1, в тощо.

Вказані недоліки не мають принципового характеру, тому не применшують загальної позитивної оцінки виконаного дослідження, його теоретичної та практичної значимості.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Могилка Владислава Віталійовича на тему «Механічні та корозійні властивості композиційних покриттів, синтезованих ультразвуковою ударною обробкою сплавів на основі Ti , Cu , Al », виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним науковим дослідженням, яке за сукупністю теоретичних і практичних результатів сприяє розв'язанню вельми важливого для галузі знань «13 Механічна інженерія» наукового завдання. 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 № 44 від 12 січня 2022 р.

Здобувач Могилко Владислав Віталійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань «13 Механічна інженерія» за спеціальністю «132 Матеріалознавство».

Офіційний опонент:

Завідувач відділу
фізики високоміцних та
метастабільних сплавів
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

 Микола ЄФІМОВ

Підпис Миколи ЄФІМОВА засвідчую:

В.о. вченого секретаря Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича НАН України,
кандидат фізико-математичних наук,
старший дослідник



Денис МИРОНІОК

« 22 » січня 2024 року