

ВІДЗИВ
офіційного опонента
на дисертаційну роботу Задорожної Христини Романівни

**«ПІДВИЩЕННЯ АБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ
СПЛАВІВ ФОРМУВАННЯМ ПОКРИТТІВ, ЗМІЩЕНИХ
КАРБІДАМИ SiC ТА VC»**

представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Актуальність теми дисертації.

Для динамічного розвитку приладо-, авіа- та машинобудування, газовидобувної та поліграфічної промисловостей актуальним завданням на сучасному етапі є створення на поверхні конструкційних алюмінієвих сплавів бар'єрних шарів, які здатні тривалий час надійно працювати в парах тертя за умов наявності абразивних частинок, а також в корозивних середовищах. Такі шари повинні мати структуру композитного типу з підвищеною мікротвердістю та зносостійкістю. Їх доцільно створювати методами інженерії поверхні, що дає можливість керувати структурою та фазовим складом поверхні конструкційних матеріалів.

Донедавна, для захисту деталей від абразивного зношування, застосовували покриття, отримані методом гальванічного хромування. Проте через використання канцерогенних та екологічно небезпечних електролітів, малу товщину отриманих покриттів та високу вартість цей метод поступово вилучають із виробництва. У зв'язку з цим виникає необхідність прийняття спеціальних заходів, які забезпечують радикальне підвищення зносостійкості та інших важливих характеристик поверхні матеріалів. Ця задача може бути успішно вирішена застосуванням поверхневої обробки алюмінієвих сплавів – лазерного поверхневого модифікування твердими частинками, а також газотермічними методами, зокрема високошвидкісним газополуменевим напиленням. Попри їх екологічну безпеку і відносно невисоку вартість ці методи забезпечують поверхневим шаром високу зносостійкість.

На основі викладеного, є всі підстави вважати, що дисертаційна робота Задорожної Христини Романівни, яка присвячена з'ясуванню закономірностей формування структури поверхневих шарів алюмінієвих сплавів, одержаних лазерним модифікуванням твердими часточками, та високошвидкісним газополуменевим напиленням, та прогнозуванню їх роботоздатності під впливом експлуатаційних чинників, зокрема наявності абразиву в місцях фрикційної взаємодії, та в корозивному середовищі, є, без сумніву, актуальною, має теоретичне, наукове і промислове значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Актуальність роботи підтверджується її виконанням у рамках держбюджетної тематики Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України за відомчим замовленням НАН України, а саме: "Розробка нових електродних матеріалів, методів відновлення і захисту тонкостінних деталей обладнання, які експлуатуються в умовах абразивного та газоабразивного зношування" (Ресурс-2) (№ держреєстрації 0116U006347, 2016–2019 pp.);

“Вивчення механізму корозії активованих механічними напруженнями легких сплавів із поверхнево модифікованими шарами та покриттями” (№ держреєстрації 0105U004303, 2005–2007 рр.); “Розроблення комбінованих металооксидних покриттів на основі алюмінію з підвищеною зносо- та корозійною тривкістю” (№ держреєстрації 0117U000527, 2017–2019 рр.).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих в дисертації, їх достовірність і новизна.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та висновків дисертаційної роботи Задорожної Х.Р. підтверджуються використанням широкого спектру сучасних методів досліджень, чітким формулюванням задач і комплексним підходом при їх розв’язанні, значним обсягом експериментальних результатів.

Основні матеріали дисертаційної роботи доповідались на: Відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАН України (Львів, 2005); XI Міжнародній конференції-виставці «Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів» (Львів, 2006); Third International Conference Laser Technologies in Welding and Materials Processing. (Крим, 2007); XI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Підвищення надійності машин і обладнання» (Кропивницький, 2017); Міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2017» (Київ, 2017); Міжнародній конференції «Зварювання та споріднені технології – сьогодення та майбутнє» (Київ, 2018).

Крім того робота у повному обсязі доповідалася і обговорювалася на наукових семінарах: “Проблеми матеріалознавства та інженерії поверхні металів” та “Корозія. Захист металів від корозії” Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка.

Структура та зміст дисертації

Дисертація складається з анотації на українській, російській та англійській мовах, списку публікацій здобувача, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п’яти розділів, висновків, переліку використаних джерел та трьох додатків. Загальний обсяг роботи складає 182 сторінки, у тому числі 147 сторінок основного тексту, 87 рисунків, 9 таблиць, список використаних джерел із 214 найменувань на 22 сторінках та додатки, що займають 13 сторінок.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету і задачі роботи, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувача, а також наведено дані щодо апробації матеріалів дисертаційної роботи та публікацій за темою досліджень.

В **першому розділі** наведено огляд літературних даних, які характеризують сучасний стан досліджень в напрямку поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів. Ґрунтовно проаналізовано переваги та недоліки різних методів зміцнення не лише за експлуатаційними характеристиками одержуваних покриттів, але й їх екологічністю та вартістю. Окрему увагу приділено технологічним аспектам поверхневого зміцнення часточками карбідів поверхні алюмінієвих сплавів, одержаних внаслідок лазерного армування та газотермічного напилення. Зроблено висновок про доцільність подальших досліджень закономірності формування структури поверхневих шарів алюмінієвих сплавів, одержаних після застосування таких методів оброблення. Їх відсутність перешкоджає оптимізації складу покриттів, технології їх отримання, прогно-

зуванню роботоздатності та ранжуванню за характеристиками зношування під впливом експлуатаційних чинників.

У **другому розділі** наведено характеристики досліджуваних матеріалів, викладена методика та режими високошвидкісного газополуменевого напилення покриттів з часточками карбідів ванадію та плазмового напилення у динамічному вакуумі. Поверхню алюмінієвих сплавів модифікували також шляхом введення струменем аргону модифікувальних часточок у вигляді порошку SiC в оплавлений лазером поверхневий шар сплавів. В ході роботи проведено дослідження властивостей поверхневих шарів використовуючи наступні методики: електронна та оптична мікроскопія, рентгенофазовий і локальний спектральний аналізи, мікромеханічні та механічні випробування на згин та трибологічні дослідження на зносостійкість за різних умов тертя, електрохімічні дослідження.

У **третьому розділі** наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень структурних особливостей формування, механічних характеристик та зносостійкості лазерно модифікованих шарів на алюмінієвих сплавах. Проаналізовано вплив таких чинників, як продуктивність напилення часточок SiC, об'ємні витрати газу (аргону), який транспортує часточки SiC до розплавленої поверхні сплаву, температура розплаву на його поверхні, розмір часточок SiC та погонна енергія лазерного променя на структуру лазерно модифікованого часточками SiC шару на алюмінієвих сплавах.

Показано, що зі збільшенням розміру часточок SiC від 50 до 150 мкм збільшується товщина модифікованого шару від 0,75 до 1,5 мм та зростає об'ємна частка часточок SiC у ньому від 16 об.% до 20,5 об.%.

Підігрів поверхні алюмінієвого сплаву до 250°C збільшує товщину та об'ємну частку SiC на 10...15 %. Встановлено, що попередній підігрів підкладки з алюмінієвого сплаву B95 до 100°C підвищує міцність лазерно модифікованого часточками SiC шару, порівняно з випадками без попереднього підігріву чи з підігрівом до 250°C. Низька міцність одержаного шару, на підігрітій до 250°C підкладці, зумовлена наявністю великої кількості голкоподібних часточок Al_4C_3 у ньому, які легко руйнуються.

Розкрито механізм формування лазерно модифікованих часточками SiC поверхневих шарів на алюмінієвих сплавах та встановлено, що у верхній зоні модифікованого шару, де температура розплаву найвища, внаслідок дифузії алюмінію в поверхневий шар SiC формуються глобулярні часточки Al_4SiC_4 . У нижній зоні шару формуються голкоподібні часточки Al_4C_3 . Коли вміст алюмінію у поверхневому шарі часточок SiC досягає 8...10 мас.%, то внаслідок напружень, що виникають, часточки карбідів алюмінію відокремлюються від поверхні часточок SiC та конвективними потоками розподіляються в усьому об'ємі модифікованого шару.

Виявлено, що лазерне модифікування алюмінієвих сплавів часточками SiC підвищує їх абразивну зносостійкість у 48...95 разів за випробовувань жорстко закріпленим абразивом. Причому зносостійкість зростає пропорційно до об'ємного вмісту часточок SiC в модифікованому шарі. Зношування цього шару відбувається внаслідок стирання часточок SiC частинками абразиву. За випробовувань незакріпленим абразивом зносостійкість модифікованого шару

зростає лише на 10...35%, порівняно з немодифікованою поверхнею. За тертя без мащення в парі зі сталлю ШХ15 (62 HRC) лазерне модифікування поверхні сплаву В95 підвищило його зносостійкість в 5 разів порівняно із немодифікованим сплавом.

Оскільки метою роботи було замінити гальванічне хромування, тому, узагальнюючи результати досліджень, що наведені у третьому розділі дисертації, було встановлено, що лазерне модифікування часточками SiC алюмінієвих сплавів за умов жорстко закріпленого абразиву підвищує їх зносостійкість у 48...95 разів, а гальванічне хромування лише в 35 разів по відношенню до немодифікованого. Проте за умов незакріпленого абразиву лазерне модифікування поверхні неефективне. Тому в подальшій роботі дисертантка досліджувала також інші покриття, зокрема одержанні високошвидкісним газополуменевим напиленням.

У **четвертому розділі** вивчено структуру та зносостійкість зміцнених часточками VC газотермічних покриттів, в яких основним компонентом був FeCr, одержаний методами високошвидкісного газополуменевого напилення (HVOF) та плазмового напилення у динамічному вакуумі (PSCDV). HVOF напилення здійснювали на устаткуванні, де за паливо слугували пропан - кисень (*Diamond Jet Hybrid gun*) або гас – кисень (*JP5000 gun*). Порошки для напилення, компонентами яких були порошки ферохрому FeCr, карбіду VC та кобальту виготовляли методом механічного легування, використовуючи планетарний млин. В результаті одержували частинки порошку діаметром 1 мкм, кожна з яких складалася з неоднорідної механічної суміші твердого розчину FeCr, Co та включень VC розміром 100...500 нм.

Виявлено, що структура покриттів, отриманих методом HVOF на устаткуванні *DJH* та *JP5000* практично не відрізнялася, проте розмір карбідів був різним. Встановлено, що за наявності кобальту мікротвердість покриття, модуль пружності та напружень розтягу II роду знижуються, а мікропластичність підвищується.

Випробуваннями на зносостійкість за різних умов тертя встановили, що за тертя жорстко закріпленим абразивом знос покриттів знижується зі збільшенням розміру включень карбіду ванадію. За випробувань незакріпленим абразивом зносостійкість покриттів зростала зі зменшенням розмірів карбіду ванадію.

В **п'ятому розділі** наведено результати досліджень корозійної поведінки модифікованого різними методами сплаву В95 у водних середовищах з $\text{pH} \approx 7$. Проаналізувавши прокородовану лазерно модифіковану часточками SiC поверхню, виявили, що корозійне руйнування протікає локалізовано з утворення пітингів в місцях з включеннями Al_4SiC_4 . Потенціодинамічними дослідженнями зміцненої часточками SiC поверхні було встановлено, що попередній підігрів підкладки до 250°C менш ефективний, аніж 100°C, що є наслідком більшого об'ємного вмісту включень Al_4SiC_4 у модифікованому шарі, які є причиною його корозійного руйнування. Виявлено, що незважаючи на те, що модифікований шар гетерогенний, його корозійна тривкість зростає в 2–6 разів залежно від стану поверхні.

Корозійну поведінку досліджуваних HVOF покриттів визначає їх поруватість. За тривалих випробувань у них виникає ризик підплівкової корозії, внаслідок чого покриття може відшаруватись.

Як завершення дисертаційної роботи було подано результати ранжування способів поверхневого зміцнення алюмінієвого сплаву В95, відносно незміцненого, за рівнем зносу за різних умов випробувань, корозійною тривкістю, а також енергозатратністю та екологічною безпекою. Було встановлено, що ефективнішим способом, аніж гальванічне хромування, підвищити зносостійкість за умов жорстко закріпленого абразиву є екологічно безпечне лазерне модифікування часточками SiC, яке підвищує зносостійкість немодифікованого сплаву в 93 рази, в той час як за випробувань незакріпленим абразивом доцільніше застосовувати високошвидкісне газополуменеве напилення покриттів VC-FeCr та VC-FeCr-Co, які підвищують зносостійкість алюмінієвого сплаву в 7–9 разів.

У **висновках**, що сформульовані в дисертації, повністю відображено всі аспекти проведеної роботи і відображено її значущість для науки та практики.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів, сформульованих положень та висновків.

Вперше розкрито механізм формування лазерно модифікованих часточками карбиду SiC поверхневих шарів на алюмінієвих сплавах.

Встановлено залежність розміру карбідів VC в структурі покриттів, одержаних газотермічними методами, від температури напилюваних порошків. виявила, що чим вища їх температура, тим менший за розміром карбід VC. З'ясовано, що основними чинниками, які впливають на властивості покриттів, є їх поруватість та розмір карбідних включень.

Виявлено нові закономірності зміни абразивної зносостійкості лазерно модифікованих шарів за різних умов випробувань та розкрито особливості механізмів їх зношування.

Вперше виявлено інверсію впливу як розмірів карбідів VC, так і наявності Co в покриттях, одержаних високошвидкісним газополуменевим напиленням, на їх зносостійкість та встановлено механізм зношування за різних умов випробувань. За випробувань жорстко закріпленим абразивом, коли зношування відбувається шляхом пошарового стирання поверхні абразивними часточками, кобальт, який знижує мікротвердість та силу різання, зменшує також і зносостійкість покриття. За випробувань незакріпленим абразивом, коли зношування відбувається внаслідок переміщення часточок абразиву поверхнею покриття, реалізується втомний механізм зародження та поширення мікротріщин. У цьому випадку зменшення в покритті з кобальтом напружень розтягу II-го роду та підвищення його мікропластичності сприяє підвищенню його зносостійкості.

Практичне значення отриманих результатів.

Визначено оптимальний режим лазерного модифікування часточками SiC ($E_{\text{пор}} = 740 \dots 1100$ Дж/см), який забезпечує отримання зносостійких композитних шарів Al – SiC завтовшки до 1,5 мм.

Запропоновано метод підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів лазерним модифікуванням поверхневих шарів часточками карбідів SiC та газотермічним напиленням високошвидкісних покриттів системи FeCr–VC та FeCr–

VC–Co замість екологічно небезпечного гальванічного хромування.

Здійснено ранжування методів поверхневого модифікування алюмінієвого сплаву за величиною зносу за різних умов випробувань, корозійною тривкістю, а також їх енергозатратністю та екологічною безпекою, яке можна використати для вибору оптимальної поверхнево зміцнювальної обробки для заміни екологічно-небезпечного хромування деталей залежно від умов їх експлуатації.

Розроблено технологічну інструкцію відновлення клапанів форграйферів машин офсетного друку напиленням покриттів високошвидкісним газополуменевим методом (HVOF) з використанням порошкових сумішей FeCr–VC та FeCr–VC–Co для підприємств поліграфічної промисловості. В технологічній інструкції вказано основні технологічні операції з відновлення або захисту нових клапанів форграйферів машин офсетного плоского друку від абразивного зношування. Дослідно-промислова перевірка друкарських машин із відновленими клапанами форграйферів на низці поліграфічних підприємств у Львові («Ельграф», «Прем'єр-груп», «Експрес») упродовж двох років засвідчила підвищення їх ресурсу в 1,5–2 рази.

Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях.

Основний зміст дисертаційної роботи Задорожної Х.Р. відображено у 13 наукових працях, із яких 10 статей – у наукових фахових виданнях, п'ять з яких включено до видань, що індексуються у базі даних Scopus, три публікації у матеріалах конференцій.

Опубліковані роботи повністю відображають зміст дисертації.

Автореферат за змістом ідентичний до тексту та основних положень і висновків дисертаційної роботи.

Мова та стиль дисертації.

Дисертаційна робота написана державною мовою, грамотно. Розподіл експериментального матеріалу логічний. Застосована у роботі наукова термінологія загальноновизнана. Стиль викладення результатів, нових наукових положень і висновків забезпечує доступність їх сприйняття та використання. Експериментальні дані проілюстровані графіками, фотографіями, діаграмами, таблицями, що сприяє розумінню викладених результатів.

Тема та зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство.

Зауваження до автореферату і дисертаційної роботи.

1. На деяких фото структур важко розгледіти або відсутній їх масштаб (рис. 3.29, в; 3.34 табл. 4.1., 4.2. – дисертація; рис. 7, в – автореферат).
2. В 2 розділі не вказано, як визначали значення основних електрохімічних характеристик модифікованих поверхонь.
3. При детальному розгляді корозійної тривкості зміцненого часточками карбідів SiC алюмінієвого сплаву B95 в середовищах з різною агресивністю в роботі не дано чіткої відповіді на питання за яким механізмом відбувається корозійне розчинення гетерогенної поверхні.
4. Немає прямих експериментів, що підтверджують високу адгезію покриттів, напилених високошвидкісним газополуменевим методом та плазмовим напиленням у динамічному вакуумі, до основи.

5. В роботі стверджується, що внаслідок плазмового напилення в динамічному вакуумі в сформованому покритті утворюється дрібно-дисперсна фаза VC, яким чином її було ідентифіковано?
6. Чи доцільно було повторно наводити хімічний склад алюмінієвих сплавів у розділі 3.3.1, таблиця 3.3 (С. 98), якщо він був у більш розширеному форматі наведений у розділі 2.1, табл. 2.1 (С. 53).
7. Що мається на увазі під терміном «металургійний зв'язок» у розділі 4.2.2 (С. 119).
8. У розділі 5.1 на рис. 5.4 (С. 138) приведено значення струмів корозії модифікованого часточками SiC сплаву за різної температури підігріву підкладки, проте не зазначено, якою була тривалість його витримки в корозивному середовищі.
9. Авторка використовує вираз для назви корозивного середовища «технічна вода» не розшифровуючи при цьому її складу, що, на мою думку, є необхідним (розділ 2, 5).
10. Дисертація містить неточні вирази, наприклад: гумовий круг (анотація, С. 2), абразивний круг (розділ 3.3.3, С. 105); має місце невідповідність рис. 2.8 тексту на С.63.

Висновок про відповідність дисертації вимогам ДАК.

Дисертація Задорожної Христини Романівни «Підвищення абразивної зносостійкості алюмінієвих сплавів формуванням покриттів, зміцнених карбідами SiC та VC» є завершеною науковою роботою, в якій представлено нові, важливі в науковому і практичному плані результати, спрямовані на вирішення актуальної науково-практичної задачі – підвищення зносостійкості і довговічності елементів із конструкційних матеріалів. Робота характеризується внутрішньою єдністю, написана грамотно з використанням сучасної наукової термінології.

Зазначені вище зауваження не знижують загальної позитивної оцінки та значення дисертаційної роботи і рівня достовірності основних її результатів.

За актуальністю, новизною отриманих результатів, їх достовірністю та практичною значимістю робота Задорожної Христини Романівни повністю відповідає вимогам Положення «Про порядок присудження наукових ступенів» ДАК України щодо кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент, заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології матеріалів і машинобудування Національного лісотехнічного університету України

ЗАВІДУЮЧИЙ
Вчений секретар
Національного лісотехнічного
університету України

10.12

2019р.

Підпис



В. Голубець
10. XII. 2019 р.

Голубець В.М.