

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Задорожної Христини Романівни

“ПІДВИЩЕННЯ АБРАЗИВНОЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ФОРМУВАННЯМ ПОКРИТТІВ, ЗМІЩЕНИХ КАРБИДАМИ SiC ТА VC”

представленої на здобуття наукового ступеня кандидат технічних наук
за спеціальністю **05.02.01 – матеріалознавство**

Актуальність теми дисертації.

У процесі експлуатації машин та механізмів їх деталі, як правило, працюють в жорстких умовах фрикційної взаємодії, за наявності абразивних часточок в різних агресивних середовищах та, викликаючи інтенсивний знос поверхні та її корозію. Внаслідок підвищення швидкодії машин і механізмів, збільшення їх габаритів і продуктивності, умови роботи поверхні деталей стають жорсткішими. Серед деталей, що експлуатуються за умов взаємодії з абразивними частинками, є алюмінієві бурильні труби, циліндри поліграфічних машин, гальмівні диски, шківни, кульові опори тощо. Серед багатьох методів підвищення абразивної зносостійкості алюмінієвих сплавів найефективнішими є гальванічне хромування, тверде анодування, плазмоелектролітне оксидування, газотермічне напилення покриттів та лазерне модифікування поверхневих шарів неметалевими включеннями. Проте лише два останніх методи не потребують значних енергозатрат, є екологічно безпечними та уможливають забезпечення поверхневим шаром високу зносостійкість. Останнє десятиріччя характеризується інтенсивним впровадженням у виробничу практику передових промислових країн нових газотермічних процесів нанесення покриттів – високошвидкісне (надзвукове) газополуменеве напилення (HVOF) і вакуумне напилення в динамічному вакуумі. Серед методів покращення фізико-механічних характеристик алюмінію та його сплавів особливе місце займають лазерні технології, зокрема армування поверхневих шарів твердими часточками карбиду кремнію, впровадженими в розплавлену лазерним променем поверхню та одержання композитних покриттів (шарів).

На основі викладеного, є всі підстави вважати, що тема, мета та задачі дисертаційної роботи *Задорожної Христини Романівни*, які спрямовані на вирішення питання підвищення ресурсу деталей, виготовлених з алюмінієвих сплавів, шляхом їх лазерного модифікування твердими часточками SiC та нанесенням покриттів високотемпературним газополуменевим напиленням, а також встановленню закономірностей формування структури поверхневих

шарів, їх зносостійкості за різних умов тертя, а також корозійної поведінки в агресивних середовищах, є актуальними та мають наукове та практичне значення.

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

Дослідження за темою дисертаційної роботи виконані у межах держбюджетних науково-дослідних тем Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України за відомчим замовленням НАН України, в яких авторка була виконавцем, 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 рр.); “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 дисертаційної роботи *Задорожної Х.Р.* забезпечується великим обсягом експериментального матеріалу та глибоким і багатостороннім аналізом літературних джерел, які охоплюють сучасні уявлення про методи підвищення поверхневої твердості та зносостійкості алюмінієвих сплавів і про їх вплив на опір зношуванню та корозії. Це.

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

Робота у повному обсязі також доповідалася і обговорювалася на наукових семінарах Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України.

Структура та зміст дисертації.

Дисертація складається з анотації на українській та англійській мовах, списку публікацій здобувача, переліку умовних позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків.

У **вступі** стисло висвітлені проблеми, які пов'язані з експлуатацією алюмінієвих сплавів, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та визначено основні напрямки її досягнення, виокремлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, подано дані про їх апробацію, а також зазначено особистий внесок здобувача в наукових працях.

У **першому розділі** описано властивості та галузі застосування алюмінію та сплавів на його основі. Проаналізовано та систематизовано існуючі літературні дані про методи підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів, вказано на їх переваги та недоліки. Виконано критичний аналіз найсучасніших методів формування зміцнених шарів. Сформульовано мету, основні задачі роботи та визначено напрямки досліджень.

У **другому розділі** приведено хімічний склад та механічні характеристики досліджуваних алюмінієвих сплавів. Викладено методики та режими поверхневого модифікування алюмінієвих сплавів шляхом введення в оплавлений лазером їх поверхневий шар часточок у вигляді порошку SiC, створюючи тим самим композитне покриття (шар), а також напилення покриттів з VC високошвидкісним газополуменевим методом. Дисертанткою також наведено методики дослідження будови та властивостей модифікованих поверхонь.

У **третьому розділі**, який присвячений дослідженню структури, зносостійкості та механічних властивостей лазерно модифікованих часточками SiC шарів алюмінієвих сплавів, 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.%. Попередній підігрів підкладки до 100°C підвищує міцність за умов згину лазерно модифікованого часточками SiC шару, порівняно з випадками без попереднього підігріву чи з підігрівом до 250°C. Причиною зниження міцності одержаного шару, на підігрітій до 250°C підкладці, є великої кількості ламких голкоподібних включень карбіду Al_4C_3 в ньому.

Оскільки зміцнення поверхні алюмінієвих сплавів відбувається не лише карбідами SiC, але й ще іншими часточками, утворення яких є термодинамічно можливе за умов впливу лазерного променя, тому дисертанткою розкрито механізм їх формування, та встановлено, що у верхній зоні модифікованого шару, де температура розплаву найвища, внаслідок дифузії алюмінію у

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.

Встановлено, що лазерне модифікування алюмінієвих сплавів часточками SiC ефективніше, ніж гальванічне хромування, підвищує їх абразивну зносостійкість за випробовувань жорстко закріпленим абразивом, проте такий ефект за умов незакріпленого абразиву був відсутній. За тертя без мащення в парі зі сталлю ШХ15 лазерне модифікування поверхні сплаву В95 знизило його знос в 5 разів.

У четвертому розділі розглянуто вплив інших методів поверхневого зміцнення алюмінієвих сплавів – високошвидкісного газополуменевого напилення (HVOF) та плазмового напилення у динамічному вакуумі (PSCDV), на структуру та зносостійкість одержаних з порошків систем FeCr-VC та FeCr-VC-Co покриттів. Виявлено, що їх структура не залежить від виду палива (пропан – кисень, гас – кисень або плазма) – їм характерна типова ламелярна структура, де на фоні матричної фази FeCr неупорядковано розсіяні карбіди VC кулястої форми, проте воно впливає на розмір карбідів та поруватість покриттів.

На відміну від HVOF покриттів, де розмір карбідів становив 2...5 мкм, в структурі покриття, одержаного методом PSCDV виявлено карбіди VC діаметром < 500 нм, а поруватість покриття не перевищувала 0,5%. Така відмінність у їх структурі зумовлена суттєво вищою температурою плазмового струменя (15000°C), ніж газополуменевого (2600...2800°C).

Встановлено, що Co у складі покриття знижує його мікротвердість, модуль пружності та напруження розтягу II роду, а мікропластичність підвищує.

Виявлено, що зі збільшенням розміру включень карбіду VC, за тертя жорстко закріпленим абразивом, зносостійкість покриттів зростає. За наявності в них кобальту тенденція незмінна, проте знос такого покриття більший, оскільки в його структурі формуються пластичні включення на основі кобальту. За випробувань незакріпленим абразивом зносостійкість покриттів зростала зі зменшенням розмірів карбіду VC і додатково підвищувалась з додаванням до напилюваної порошкової композиції кобальту.

У п'ятому розділі досліджено корозійно-електрохімічну поведінку лазерно модифікованого часточками SiC алюмінієвого сплаву В95 та напилених високошвидкісним газополуменим методом покриттів із включеннями

VC в нейтральних водних розчинах, таких як технічна вода та 3%-й розчин NaCl (рН 6,4). Показано, що корозійне руйнування модифікованого часточками SiC сплаву, як правило, починається з включень Al_4SiC_4 і з часом в цих місцях виникають пітинги. Виявлено, що для підвищення корозійної тривкості поверхнево модифікованого часточками SiC алюмінієвих сплаву доцільно заздалегідь підігрівати його до температури $100^{\circ}C$, що дає можливість збільшити глибину модифікованого шару з рівномірно розподіленими карбідами Si та Al, зменшити його електрохімічну гетерогенність та підвищити корозійну тривкість у зазначених середовищах.

Встановлено, що найвищу корозійну тривкість газотермічних покриттів однакового хімічного складу визначає метод напилення, який забезпечує найменшу поруватість покриття. Виявлено, що введення Co в покриття FeCr-VC несуттєво підвищує його корозійну тривкість. Довготривала експозиція в 3%-му розчині NaCl покриттів із поруватістю понад 0,5% призводить до проникнення корозивного середовища до меж розділу покрив-підкладка, що може спричинити підплівкову корозію і як наслідок відшарування покриття.

Як узагальнення одержаних у попередніх розділах результатів здійснено ранжування методів поверхневого зміцнення 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.

У сформульованих у дисертаційній роботі **висновках** відображено основні результати проведеної роботи і зазначено її науково-практичну значимість.

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

Дисертантка вперше розкрила механізм формування лазерно модифікованих часточками карбіду SiC поверхневих шарів на алюмінієвих сплавах та встановила, що коли вміст Al в поверхневому шарі часточок SiC досягає 8...10 мас.%, то внаслідок напружень, що виникають, часточки карбідів Al_4SiC_4 відокремлюються від поверхні часточок SiC та конвективними потоками розподіляються в усьому об'ємі модифікованого шару. У верхній зоні модифікованого шару, де температура розплаву найвища, формуються глобулярні часточки Al_4SiC_4 , а в нижній зоні – голкоподібні часточки Al_4C_3 .

Задорожна Х.Р. з'ясувала, що основними чинниками, які впливають на властивості газотермічних покриттів, є їх поруватість та розмір карбідних включень, який залежить від температури напилюваних порошків.

Автор дисертаційної роботи виявила нові закономірності зміни абразивної зносостійкості лазерно модифікованих шарів за різних умов випробувань та розкрила особливості механізмів їх зношування. Встановила, що за випробувань жорстко закріпленим абразивом зношування цього шару відбувається внаслідок пошарового стирання часточок SiC абразивом, а за випробувань незакріпленим абразивом – шляхом виривання гумовим диском часточок SiC після попереднього руйнування вільним абразивом м'якої матриці в проміжках між ними.

Дисертанткою вперше виявлено інверсію впливу як розмірів карбідів VC, так і наявність Co в покриттях, одержаних високошвидкісним газополуменевим напиленням, на їх зносостійкість та встановлено механізм зношування за різних умов випробувань. Виявлено, що зношування жорстко закріпленим абразивом відбувається шляхом пошарового стирання поверхні абразивними часточками, а кобальт, який знижує мікротвердість та силу різання, зменшує також і зносостійкість покриття. Також встановлено, що зменшення в покритті з Co напружень розтягу II-го роду та підвищення його мікропластичності сприяє підвищенню його зносостійкості за випробувань незакріпленим абразивом, а зародження та поширення мікротріщин реалізується за втомним механізмом.

Практичне значення отриманих результатів.

Дисертанткою визначено оптимальну погонну енергію лазерного променя, яка становить 740...1100 Дж/см, яка забезпечує отримання зносостійких композитних шарів Al – SiC завтовшки до 1,5 мм.

Автором запропоновано для підвищення зносостійкості алюмінієвих сплавів, замість екологічно небезпечного гальванічного хромування, застосовувати лазерне модифікування їх поверхневих шарів часточками карбідів SiC та напилення високошвидкісних газополуменевих покриттів зміцнених часточками карбідів VC.

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

Авторкою дисертаційної роботи розроблено технологічну інструкцію відновлення клапанів форграйферів машин офсетного друку напиленням покриттів високошвидкісним газополуменевим методом з використанням порошкових сумішей FeCr-VC та FeCr-VC-Co для підприємств поліграфічної промисловості. Дослідно-промисловою перевіркою відновлених клапанів

форграфірів впродовж двох років на поліграфічних підприємствах «Ельграф», «Прем'єр-груп» та «Експрес» встановлено підвищення їх ресурсу в 1,5...2 рази.

Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях.

Матеріали дисертації викладені у 13 наукових публікаціях, серед яких 10 статей у фахових наукових виданнях, 5 з яких у виданнях, що індексуються базою даних Scopus та 3 публікації у матеріалах конференцій.. Аналіз опублікованих праць дає підстави вважати, що вони в достатній мірі відображають зміст дисертації.

Автореферат з належною повнотою відображає основні положення та висновки дисертації.

Мова та стиль дисертації.

Дисертація написана державною мовою, грамотно, легко сприймається. Виклад матеріалу в роботі має логічну послідовність, науково грамотний, розділи взаємопов'язані та цілком розкривають поставлену мету. Тема і зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.02.01 – “матеріалознавство”.

Зауваження до автореферату і дисертаційної роботи.

1. У методичній частині не приведено параметрів процесу виготовлення порошків в планетарному млині та не зазначено яке було початкове співвідношення його компонентів (FeCr : VC : Co).

2. Посилаючись на рис. 4.8 (с.116) та рис. 4.15 (.121) стверджується, що чорні включення це карбіди VC, проте аналізуючи Спектр 2 виявлено і інші елементи. Чи коректно стверджувати, що утворюється саме ця сполука?

3. Хімічний склад алюмінієвих сплавів подано на с. 53 та дублюється на с. 98.

4. У назві роботи зазначається «покриття зміцнені карбідами SiC», проте у роботі наголошується, що модифікували поверхню алюмінієвих сплавів часточками SiC та одержували зміцнений шар, а про покриття у роботі не згадується.

5. У розділі II п.2.6 (механічні випробування) не зазначено умови випробувань на згин.

6. В авторефераті дисертантка вживає невірну скорочену назву устаткування Diamond Jet Hybrid gun – DGH, проте в тексті дисертації така помилка відсутня.

7. Чому для зміцнення покриттів, одержаних різними методами (лазерне армування та високошвидкісне газополуменеве напилення) використовували різні карбіди, а не використали один? Це було б більш інформативніше.

8. На рис. 3.6 наведено структури лазерно модифікованих часточками SiC шарів одержаних за різної погонної енергії при різному збільшенні, що ускладнює сприйняття поданої інформації.

9. Дисертантка не завжди дотримувалася стандарту щодо назв елементів, використовуючи старі, тривіальні назви, наприклад кисень, а не оксиген.

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

Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам ДАК.

Дисертаційна робота *Задорожної Х.Р.* “Підвищення абразивної зносостійкості алюмінієвих сплавів формуванням покриттів, зміцнених карбідами SiC та VC” є завершеною науковою роботою, що виконана на високому професійному рівні – науковому та методичному. Отримані авторкою результати вносять вагомий внесок у розвиток сучасного матеріалознавства, зокрема технологій формування та нанесення нових покриттів. Автореферат повністю відображає основні положення дисертації.

Дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство та вимогам «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567, зокрема пунктам 9, 11 і 12, а її авторка **Задорожна Христина Романівна** заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Офіційний опонент

кандидат технічних наук,
доцент кафедри прикладної механіки
Луцький національний технічний
університет МОН України

Повстяной О.Ю.

