

Відгук

офіційного опонента академіка НАН України,
доктора технічних наук, професора
на дисертаційну роботу **ГВОЗДЕЦЬКОГО Володимира Миколайовича**
«Наукові засади підвищення зносостійкості покриттів на алюмінієвих
та сталевих виробах шляхом керованого формування їх структурно-
фазового стану», представлену на здобуття наукового ступеня доктора
технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство

1. Актуальність теми дисертації

Методи поверхневого зміцнення широко використовують для підвищення конструкційної міцності нових та відновлення зношених деталей із алюмінієвих сплавів та сталей в різних галузях виробництва. Ефективність методів твердого анодування, плазмо-електролітного оксидування та електродугового напилювання покриттів визначається структурою, фазовим та хімічним складом сформованих покриттів. Зміцнення поверхні передбачає проведення глибокого аналізу процесів синтезу анодованих шарів та шарів отриманих плазмо-електролітним оксидуванням, а також розуміння фізико-хімічних процесів, що супроводжують плавлення електродних матеріалів під час електродугового напилювання.

На основі детального аналізу процесів, що відбуваються під час синтезу зміцнених шарів на поверхні нових деталей та напилювання покриттів на поверхню зношених елементів для відновлення їх геометричних розмірів і функціональних властивостей, сформульовано проблему, на вирішення якої спрямована дисертаційна робота, а саме - модифікація відомих та створення нових підходів оптимізації структурно-фазового стану покриттів, вдосконалення технологічних прийомів для забезпечення максимального їх поверхневого зміцнення та розроблення ефективніших витратних матеріалів, спрямовані на підвищення ресурсу нових та відновлення працездатності зношених деталей відповідального устаткування ключових для України галузей народного господарства і оборони, що експлуатуються за умов граничного навантаження та абразивного зношування. Актуальність, своєчасність і практична цінність її вирішення є беззаперечною.

2. Загальні характеристики дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Гвоздецького В. М. складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку літератури з 347 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 434 сторінки, включно з 262 рисунками, 27 таблицями та 4 додатками на 47 сторінках (зокрема, технологічний регламент та акти про використання отриманих під час виконання роботи результатів для відновлення конкретних елементів устаткування, патенти на корисні моделі).

Метою роботи було сформулювати наукові засади формування на поверхні виробів з алюмінієвих сплавів та сталей шарів з наперед заданими функціональними властивостями для потреб ключових галузей

промислового та сільськогосподарського виробництва в харчопереробній, гірничодобувній та оборонній галузях, розвинувши для цього методи твердого анодування, плазмо-електролітного оксидування та електродугового напилювання покриттів. Для досягнення поставленої мети, на основі встановлених закономірностей впливу складу електролітів і режимів синтезу поверхнево зміцнених шарів, були розроблені компонентні склади шихти порошкових дротів з екзотермічною шихтою. Також було обґрунтовано технологічні параметри їх нанесення для формування структури, фазового складу та підвищення зносостійкості (за граничного тертя і абразивного зношування) сформованих шарів і покриттів.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета й основні завдання роботи, визначені об'єкт та предмет дослідження, сформульовані наукова новизна й практичне значення отриманих результатів, відзначено їх успішну апробацію та наведено перелік праць за темою роботи із зазначенням внеску автора.

У першому розділі проаналізовано відомі методи синтезу та напилювання покриттів, визначено їх недоліки та виокремлено нові методичні та технологічні підходи їх можливого покращення. Встановлено, що тверде анодування дає змогу зміцнити поверхневі шари алюмінієвих сплавів, дещо підвищивши їх твердість. Плазмо-електролітне оксидування забезпечує значно суттєвіше підвищення мікротвердості поверхонь тертя. Але обидва методи придатні лише для нових деталей. Відновити поверхні зношених деталей такими методами неможливо. Метод електродугового напилювання дає змогу наносити покриття на циліндричні деталі зі складним профілем, які для експлуатації зі спряженими деталями потребують фінішної механічної обробки. За результатами проведеного аналізу та використання інформації про можливості нових технологічних підходів сформульовані мета та задачі досліджень.

У другому розділі описано методичні особливості використаних методів синтезу поверхнево зміцнених шарів та напилювання покриттів, а також методи тестування їхніх властивостей. Зокрема, викладено процес синтезу анодованих шарів у базовому сульфатному електроліті та методичні нюанси, пов'язані зі стабілізацією його температури. Також розглянуто методику напилювання покриттів для подальшого синтезу на їхній поверхні зміцненого шару методом плазмо-електролітного оксидування. Наведено методичні прийоми оптимізації параметрів повітряного струменя та описано електродні порошкові дроти, використані для напилювання покриттів. Розглянуто методи визначення фізико-механічних властивостей покриттів та мікроструктури.

У третьому розділі запропоновано нові технологічні підходи для підвищення швидкості синтезу, твердості та зносостійкості анодованих шарів. Для цього базовий склад сульфатного електроліту модифікували, збільшивши вміст активних окиснювачів та стабілізувавши його температуру в діапазоні від -5 до $+5^{\circ}\text{C}$. Встановлено, що збільшення вмісту кисню в електроліті

покращує властивості анодованого шару. З підвищенням вмісту H_2O_2 в електроліті до 50 мл/л, товщина анодованого шару зросла найбільше від 60 до 100 мкм (на 33%). Також збільшилась і його мікротвердість від 400 до 500 одиниць за Вікерсом. Розкрито також роль молекул води у структурі анодованого шару і показано, що саме їх кількість визначає опір зношування зміцнених шарів під час трибологічних випробувань.

Четвертий розділ присвячено синтезу анодованих шарів з використанням імпульсного режиму. Запропонований підхід дозволив отримати шари з більшою товщиною та мікротвердістю порівняно зі стаціонарним режимом. Подальша термічна обробка синтезованого шару за температури 300 °C додатково підвищила його функціонально важливі властивості, зокрема його твердість і зносостійкість. За допомогою рентгенофазового аналізу показано, що структура отриманих шарів містить молекули води у кількості від 1 до 3 вмісту, і саме їхня кількість визначає властивості синтезованого шару.

За результатами фрикційних досліджень встановлено, що наявність трьох молекул води в шарі сприяють утворенню твердого мастила в зоні тертя, яке хоч і зменшує знос, однак підвищує його коефіцієнт тертя.

Встановлено, що необхідну кількість молекул води в шарі можна отримати, стабілізуючи температуру електроліту, регулюючи режим синтезу або застосовуючи додаткову термічну обробку з подальшою гідратацією шляхом кип'ятіння.

У п'ятому розділі розглянуто можливості відновлення геометричних розмірів і функціональних властивостей поверхонь зношених елементів із алюмінієвих сплавів поєднанням електродугового напилювання покриттів з наступним плазмо-електролітним окисдуванням відновленої поверхні для її зміцнення. Дослідження показали, що утворення евтектик у напилених покриттях значно покращує їхні характеристики після окисдування. В роботі визначено оптимальний вміст легувальних елементів у шихті порошкових дротів для формування корунду в електродуговому покритті у кількості до 70%, а відповідно твердості на рівні 1800 HV. Показано, що утворення легкоплавких та рідкотекучих евтектик сприяє зменшенню пористості напиленого шару. Визначено, що абразивна зносостійкість шарів, синтезованих на газотермічних покриттях, в основному залежить від вмісту у них корунду $\text{b-Al}_2\text{O}_3$, а додаткове їх легування Cu, Ni чи Ti сприяє зменшенню їхньої пористості.

У шостому розділі описано особливості електродугового напилювання покриттів надзвуковим повітряним струменем із використанням розроблених та виготовлених порошкових дротів на основі шихти із додаванням карбіду бору. Використання подвійних сопел Лавалю забезпечило двократне збільшення швидкості краплин, а також їхньої температури в момент осадження на підкладці. Нові розроблені та обґрунтовані в роботі технологічні підходи дозволили зменшити пористість покриттів та підвищити їхню когезійну міцність.

Додавання до складу шихти порошкових дротів бури або борного ангідриду у кількості до 1 мас. % дозволило знизити температуру плавлення оксидних плівок на поверхні шихтових матеріалів до 750...800 °С. Це покращило умови плавлення шихтових матеріалів та оболонки під час розпилення електродних матеріалів, що уможливило протікання екзотермічних реакцій та підвищення температури краплин до 2500 °С. Таке підвищення їх температури сприяло розплавленню оксидної плівки на поверхні алюмінієвої підкладки, утворенню ділянок сплавлення і підвищенню адгезії напилених покриттів.

У цьому розділі представлено результати металографічних досліджень та експериментальних випробувань на абразивне зношування покриттів, напилених електродуговим методом на сталеву та алюмінієву підкладки. Встановлено, що компонентний склад розроблених порошкових дротів впливає на формування структури та опір зношуванню в умовах закріпленого та незакріпленого абразиву. Визначено механізми зношування напилених покриттів та вплив компонентів шихти, які переходять у твердий розчин матричної фази покриття. Продемонстровано шляхи зменшення залишкових напружень розтягу за напилювання покриттів на алюмінієву підкладку порівняно зі сталеву. Показано, що зі зростанням твердості покриттів під час фрикційної взаємодії зменшується коефіцієнт тертя та температура трибонагріву досліджених пар.

У додатках наведено документи, що підтверджують: економічну доцільність впровадження розроблених електродних матеріалів і технологічних підходів у різних галузях виробництва, акти впровадження, технологічний регламент відновлення деталей типу «вал» та отримані патенти України на корисну модель.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність.

Достовірність та обґрунтованість представлених у роботі результатів підтверджується їх узгодженістю із загальновизнаними підходами сучасного матеріалознавства, застосуванням широкого комплексу сучасних методів і методик досліджень для атестації властивостей покриттів (оптична та електронна мікроскопія, рентгенофазовий та мікрорентгеноспектральний аналізи, комплекс експериментальних випробувань з визначенням твердості, абразивної зносостійкості та фрикційного зносу результатів), значним обсягом експериментальних даних для обґрунтування висновків з проведених досліджень, наявністю значної кількості публікацій у фахових вітчизняних і рецензованих міжнародних наукових виданнях і апробацією основних результатів роботи на престижних всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях та відповідністю формулювань наукових положень, висновків і рекомендацій, наведених у дисертації, вимогам МОН України щодо оформлення дисертаційних робіт.

4. Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше встановлено закономірності впливу фазового складу анодованих шарів на їх функціональні характеристики. Фаза беміт ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) забезпечує високу мікротвердість та абразивну зносостійкість, а фаза гібсит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) відповідальна за високі трибологічні характеристики анодованих шарів, завдяки перенесенню тонкої захисної плівки гібситу на контртіло. Вміст необхідних фаз (гібситу, беміту або їх суміші) у анодованому шарі регулювали додаванням до електроліту пероксиду водню (30...50 мл/л), термічною обробкою (100...400°C), або температурою електроліту, змінюючи її (від (-5) до +5°C).

2. Вперше встановлено, що за додавання до електроліту для анодування пероксиду водню (10...50 мл/л) або озону (25 мл/год/л), а також застосування імпульсного режиму синтезу покращує умови для проникнення іонів кисню крізь бар'єрний шар для взаємодії з катіонами алюмінію в основі завдяки чому досягнуто збільшення товщини анодованого шару на 40%.

3. Вперше показано, що під час плазмо-електролітного оксидування поверхні газотермічних покриттів систем Al+Mg, Al+Ni, Al+Cu, Al+Ti, у синтезованих шарах утворюються легкоплавкі та рідкотекучі евтектики із сумішей оксидів ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$), ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{NiO}$), ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CuO}$), ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$), які легше ніж тугоплавкий оксид Al_2O_3 заповнюють розрядні канали і, тим самим, зменшують поруватість шарів (від 8...10 до 2...3%), підвищують вміст корунду у них від 30 до 70% та збільшують їх мікротвердість (на 300...500 $\text{HV}_{0,3}$) і абразивну зносостійкість (у 4...6 разів).

4. Вперше виявлено закономірності фрикційної взаємодії в середовищі мінеральної оливи пар тертя між плазмо-електролітним оксидним шаром на електродуговому покритті на сплаві Д16 та різними контртілами (бабіт, бронза, чавун, сталь, покриття з гальванічно нанесеним хромом) та встановлено, що коефіцієнт тертя, температура триборозігріву та втрата маси контртіл знижуються із підвищенням їх мікротвердості.

5. Вперше на основі термодинамічного аналізу реакцій, що можуть відбуватися під час напилювання електродугових покриттів із порошкових дротів та прогнозування їх фазового складу розробили порошкові дроти системи легування Fe-Cr-Si-Mn-B-C з екзотермічною шихтою для надзвукового електродугового напилювання зносостійких покриттів. У структурі покриттів утворювалися нанорозмірні (50...150 нм) виділення боридів титану, хрому та заліза, що забезпечило підвищення твердості та зносостійкості покриттів. Для повного сплавлення компонентів шихти та оболонки ПД до його шихти додавали 1 мас.% суміші легкоплавких порошків евтектичного складу ($\text{FeSi} + \text{FeMn} + \text{B}_2\text{O}_3$), що забезпечило отримання гомогенних покриттів

з наперед передбаченим структурно-фазовим складом.

6. Вперше встановлено, що використання для електродугового напилювання покриттів із порошкових дротів системи легування Fe-Cr-Si-Mn-B-C із екзотермічною шихтою дало змогу підвищити температуру диспергованих краплин розплаву від 1800 до 2500 °C, що забезпечило розплавлення цими краплинами природної поверхневої плівки Al_2O_3 на алюмінієвих сплавах та їх зварювання із алюмінієвою основою, внаслідок чого міцність зчеплення між покриттям і основою зросла на 50%.

Загалом наукова новизна роботи сформульована послідовно, аргументовано і зрозуміло.

5. Практичне значення роботи

На основі встановлених у роботі закономірностей структуроутворення електродугових покриттів розроблено склади нових порошкових дротів системи легування Fe-Cr-Si-Mn-B-C із екзотермічною шихтою, яка забезпечила протікання екзотермічних реакцій між компонентами шихти. За результатами проведених експериментальних досліджень та дослідно-промислових перевірок відновлених деталей різного призначення обґрунтовано і оптимізовано склади розроблених порошкових дротів, придатних для відновлення деталей типу «вал», які можуть експлуатуватися без доступу абразиву та за його доступу.

Розроблено оригінальну соплову систему металізатора з використанням принципу сопла Лавалю, яка забезпечила напилювання покриттів надзвуковим повітряним струменем, та технологічний регламент для відновлення деталей типу «вал» різної геометрії.

6. Впровадження результатів

Результати і практичні рекомендації роботи впроваджені та вже широко використовуються для відновлення поверхонь зношених деталей різного призначення, що підтверджено актами про використання в різних галузях промисловості.

Отримані в роботі наукові результати та розроблений на їх основі технологічний регламент використовуються в технологічному процесі виготовлення порошкових дротів із екзотермічною шихтою, які необхідні для відновлення деталей типу «вал» в машинах різного призначення.

7. Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях

Основні результати досліджень дисертації опубліковані в 47 наукових працях, у тому числі 22 статті у наукових фахових виданнях, 18 з яких входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 9 – до переліку наукових фахових видань України, а також 16 публікацій у матеріалах конференцій, 3 патенти України на корисну модель, які достатньою мірою

висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист. Опубліковано праці у журналах квартилю 2 – Q1, 4 – Q2, та 12 – Q3. Індекс Гірша автора становить 12.

8. Зауваження та коментарі до дисертації:

1. Робота охоплює великий обсяг досліджень і нових наукових результатів, однак, вона сприймається в певній мірі дещо перезавантаженою різними технологічними напрямками та системами легування досліджуваних матеріалів. А саме – технологіями електрохімічної, плазмо-електролітної обробки матеріалів і газотермічних покриттів на основі алюмінію та технологіями електродугового напилення евтектичних покриттів залізних сплавів з хромом, бором, кремнієм, вуглецем, отриманих із порошкових дротів.

2. В роботі не було пояснено, чому в структурі покриттів із порошкових дротів, до шихти яких додавали карбід бору, утворювалися лише часточки боридів $\text{Fe}(\text{Cr})_2\text{B}$, а не карбідів?

3. Відомо, що алюмотермічні реакції здатні додатково підвищувати температуру краплин розплаву металу. Тому не зовсім зрозуміло, чому у роботі не використано такий простий спосіб підвищення температури краплин, що формують електродугові покриття і підвищують їх адгезію до підкладки, а саме – просте додавання до шихти розроблених порошкових дротів алюмінію?

4. В роботі не розкрито, яким чином визначали, наскільки повно відбулась взаємодія карбіду бору та хрому, ферохрому і сталевोї оболонки порошкового дроту. Хоча ці аспекти досліджень є важливими для забезпечення повторюваності результатів за властивостями отриманих покриттів.

5. В дисертації важливо було б детальніше зупинитися на методичних нюансах визначення швидкості повітряного струменю при дослідженнях процесу електродугового напилення покриттів. Адже саме ця швидкість визначатиме і структуру, і властивості електродугових покриттів.

6. Для дослідження геометрії краплин розплаву металу порошкових дротів в роботі використано методику вловлювання краплин у снігову мішень. Хоча простіше напилювати у воду. Чому обрано саме таку мішень в цьому циклі досліджень і які переваги мало вловлювання краплин у снігову мішень порівняно з водяною?

7. Дослідження, проведені в роботі, показали (розділ 5), що наявність у структурі газотермічного покриття 30 мас.% титану підвищує абразивну зносостійкість легованого титаном ПЕО шару у 5...6 разів. У рефераті на рис. 12(в) максимальна абразивна стійкість шару відповідає 70% вмісту титану. Крім того, крива абразивної зносостійкості у рефераті (рис. 12(в)) відрізняється від кривої абразивної зносостійкості в дисертації (рис. 5.39(в)).

Разом з тим перелічені недоліки та зауваження не применшують важливості отриманих результатів з наукової і практичної точок зору.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, в якій переконливо вирішено сформульовану в дисертаційній роботі проблему, яка містить нові наукові положення та науково-обґрунтовані результати досліджень, що раніше не захищалися, та відповідають паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство, як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

За обсягом виконаних досліджень, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх новизною і рівнем представлена дисертаційна робота «Наукові засади підвищення зносостійкості покриттів на алюмінієвих та сталевих виробах шляхом керованого формування їх структурно-фазового стану» відповідає вимогам п.п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженого постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року щодо докторських дисертацій, а її автор **Гвоздецький Володимир Миколайович** заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент,

академік НАН України,
доктор технічних наук, професор,
завідувач відділу електротермічних
процесів обробки матеріалів
Інституту електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України

 **Володимир КОРЖИК**

Підпис Володимира Коржика засвідчую:

Учений секретар

Інституту електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України
к.т.н.



 **Ілля КЛОЧКОВ**

Отримано
12.09.25 