

Відгук

офіційного опонента

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.

Завдяки низькій питомій вазі, температурі плавлення і, як наслідок, хорошим ливарним властивостям та попри це ще й високій конструктивній міцності алюмінієві сплави широко вживані в найрізноманітніших галузях машино-, літако- та кораблебудування, енергетиці, сільському господарстві та харчопереробній промисловості. Разом з тим їх низька зносостійкість в технологічних середовищах, до складу яких часто потрапляють дрібні часточки абразиву, звужує спектр їх застосовності. Дієвим методом подолання цього недоліку алюмінієвих сплавів є нанесення на їх поверхню покриттів. Для цього часто використовують методи синтезу поверхнево зміцнених шарів, зокрема такі як метод твердого анодування (ТА) чи плазмо-електролітного оксидування (ПЕО), або методи газотермічного напилювання покриттів з покращеними характеристиками зносостійкості. Однак недостатньо висока твердість шарів, синтезованих з використанням ТА, обмежена інформація про вплив елементів легування в алюмінієвих сплавах на фізико-механічні характеристики ПЕО шарів та вузький асортимент витратних матеріалів, таких як порошкові драти (ПД) для електродугового напилювання (ЕДН) покриттів, стримують широке використання цих методів.

Мета і задачі досліджень.

Мета роботи - сформулювати наукові принципи синтезу шарів методами ТА та ПЕО та формування покриттів ЕДН, які відповідали би вимогам до виробів із алюмінієвих та інших конструкційних матеріалів за функціональними властивостями для експлуатації в ключових галузях промисловості, сільського господарства, харчопереробної, гірничодобувної та оборонної галузей виробництва. При цьому при формуванні покриттів із заданими властивостями автором за основу покладені встановлені закономірності впливу складу електролітів, режимів синтезу ТА та ПЕО, компонентного складу шихти ПД із екзотермічними властивостями і параметри напилювання електродугових покриттів (ЕДП) на формування їх мікроструктури за умов граничного тертя та абразивного зношування.

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 265 рисунками, 27 таблицями та 4 додатками на 47 сторінках.

У першому розділі розглянуто та проведено аналіз вживані на практиці методи поверхневого зміцнення нових та відновлення зношених деталей із алюмінієвих конструкційних сплавів. Показано, що методами ТА, ПЕО та ЕДН можна суттєво підвищити зносостійкість алюмінієвих сплавів та подовжити термін їх експлуатації. Показано їх переваги (екологічно чисті електроліти, економічна доцільність) та недоліки (недостатня твердість ТА, мала товщина покриття ТА та ПЕО, і вузький асортимент витратних матеріалів для ЕДН). За результатами проведеного аналізу та використання проаналізованої інформації про можливості нових технологічних підходів сформульовано мету та завдання досліджень.

У другому розділі обґрунтовано методичні підходи використаних методів поверхневого зміцнення та описано методики визначення фізико-механічних характеристик отриманих покриттів. Зокрема, ТА проводили у сульфатному електроліті в режимі із застосуванням стаціонарного та імпульсного струму. Тоді як ПЕО шари синтезували на поверхні алюмінієвих плазмових та ЕДП легованих Mg, Cu та Ti, використавши для цього слабо лужний електроліт. Фізико-механічні характеристики визначали з використанням стандартних методик визначення абразивної зносостійкості та трибологічних характеристик за втратою маси зразків або їх об'єму. Фазовий склад покриттів визначали на дифрактометрі ДРОН 3, а їх структуру – на електронному мікроскопі EVO-40XVP з системою спектрального мікроаналізу INCA Energy 350.

У третьому розділі для підвищення фізико-механічних характеристик ТА покриттів розроблено метод синтезу анодованих шарів на технічному алюмінії АД0. Тверде анодування здійснювалось в класичному електроліті 20% сульфатної кислоти, який модифікували додаванням до його складу 3-5% перекису водню, або його продування озоном. Завдяки цьому вдалося підвищити товщину гідрооксидованого шару на 50...60%, мікротвердість на 40...50%, абразивну зносостійкість на 15%, зносостійкість у парі тертя із сталеву кулькою на 30%. Термічна обробка анодованих шарів, яка зводилась до нагрівання зразків з анодованими шарами до температури 100...400°C з наступним їх кип'ятінням у воді, зумовила утворення в анодованому шарі високотемпературних фаз $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ та $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Завдяки цьому зносостійкість анодованих зразків відносно сплаву Д16 підвищилась у 5...10 разів. Показано, що під час тертя на поверхні контртіла формувалася захисна плівка із гібситу. Необхідного вмісту фаз в анодованому шарі добивались, підбираючи температуру електроліту, додаючи до його складу перекис водню, або заключною термічною обробкою.

Четвертий розділ присвячений анодованим шарам, синтезованим з використанням імпульсного режиму їх отримання. Вперше встановлено, що вміст кількості молекул води у гідрооксиді алюмінію визначають фазовий склад, твердість, зносостійкість та трибологічні характеристики анодованого шару. Фаза-беміт $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ забезпечує високу мікротвердість та абразивну зносостійкість. Фаза - гібсит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ відповідальна за високі трибологічні характеристики. Під час тертя гібсит формує на поверхні контртіла захисну плівку із гібситу. Вміст необхідних фаз в анодованому шарі регулювали

додатком до електроліту перекису водню, термічною обробкою або температурою електроліту. Встановлено, що знос анодованих шарів з використанням імпульсного режиму синтезу, у парі із сталеву / керамічну кульками зменшився в 2,5...8 разів відносно сплаву Д16 за фрикційних випробувань без мащення чи граничного мащення у мінеральній чи синтетичній оливах.

У п'ятому розділі обґрунтовано ефективність сумісного використання двох технологій: електродугової металізації та ПЕО. Зокрема встановлено, що ПЕО шари, леговані магнієм, міддю, нікелем та титаном, мають меншу поруватість, більшу твердість та вищий вміст корунду, легovanого міддю, нікелем або титаном ($\alpha\text{-CuAl}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-NiAl}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-TiAl}_2\text{O}_3$). Це відбувається внаслідок утворення легкоплавких евтектик в ПЕО шарі та виділення значної кількості теплової енергії за рахунок алюмотермічних реакцій під час синтезу ПЕО шарів. У випадку їх синтезу на газотермічних покриттях, легованих міддю, в їх структурі виявили матричну фазу з оксиду алюмінію ($\alpha\text{-CuAl}_2\text{O}_3$) з включеннями дисперсних виділень часточок міді. Під час трибологічної взаємодії диска з ПЕО шаром, синтезованим на сплаві Д16, а також на ЕДП на сплаві Д16, в парі з контртілом зі сталі ШХ15 (780 HV) в моторній оливі 15W30 з додаванням до неї незначної кількості гліцерину між елементами пари тертя відбувалося селективне перенесення міді між елементами пари тертя. В результаті вдалося суттєво (на порядок) зменшити коефіцієнт тертя таких шарів і це спостерігали за високих питомих навантажень (до 14 МПа).

У шостому розділі досліджено структуру та фазовий склад електродугових покриттів із ПД системи легування Fe-Cr-Si-Mn-B-C, напилених з використанням дозвукового та надзвукового режимів їх напилування. Отримали надзвуковий повітряний струмінь з числом Маха 2. При цьому тиску повітряного струменю підвищувався від 0,6 до 1,2 МПа, що зумовило підвищення його швидкості у 2 рази від 300 до 600 м/с, а розплавлених краплин ПД – від 60–90 м/с до 160–220 м/с. Внаслідок цього твердість покриттів зростає від 600 до 900 HV, а рівень залишкових напружень розтягу першого роду в них знизився в 2 рази. Матричними фазами розроблених покриттів виявилися ферит, мартенсит, та аустеніт, легovanі Cr, Mn та Si, в об'ємі яких зосереджувалось до 25 мас.% нанорозмірних виділень боридів $\text{Fe}(\text{Cr})_2\text{B}$. Повного сплавлення оболонки з шихтою досягли додаванням до неї 1 мас.% суміші легкоплавких порошків евтектичного складу ($\text{FeSi} + \text{FeMn} + \text{B}_2\text{O}_3$). Цим забезпечили отримання гомогенних покриттів з наперед передбаченим структурно-фазовим складом. Екзотермічні реакції, які відбувалися під час напилування ЕДП між компонентами шихти ПД, та підвищення кінетичної енергії розплавлених краплин за надзвукового режиму напилування, сприяли підвищенню їх температури на 300...500 °С. Завдяки цьому було забезпечено формування зон сплавлення краплин розплаву ПД з алюмінієвою основою, і як наслідок підвищення міцності зчеплення покриття з основою в два рази.

У цьому розділі досліджено фізико-механічні характеристики та особливості зношування електродугових покриттів, напилених дозвуковим та надзвуковим повітряним струменем на алюмінієву та сталеву підкладки. Запропоновано і обґрунтовано показник, практично придатний для атестації покриттів за їх схильністю до тріщиноутворення, який визначили як співвідношення залишкових напружень розтягу I роду в покриттях $\sigma_{\text{зал}}$ до їх когезивної міцності $\sigma_{\text{в}}$. На основі аналізу отриманих покриттів за схильністю до тріщиноутворення обґрунтовано ключове для практичного використання значення цього параметра. Зокрема показано, що коли значення введеного показника $\sigma_{\text{зал}}/\sigma_{\text{в}} > 0,75$, то це відповідає початку утворення тріщин у покриттях, що робить покриття непридатними до експлуатації. Встановлено, що у покриттях, напилених на алюмінієву основу, рівень $\sigma_{\text{зал}}$ менший, ніж у напилених на сталь, що зумовлено більшим коефіцієнтом термічного розширення алюмінієвого сплаву Д16, аніж сталі Ст3. Встановлено, що в процесі кристалізації покриттів, що містять бор, в їх структурі виділяються нанорозмірні часточки боридів $\text{Fe}(\text{Cr})_2\text{B}$. Саме вони, сприяючи формуванню більшої кількості залишкового аустеніту, підвищують абразивну зносостійкість покриттів у два рази, однак суттєво підвищують в них величину залишкових напружень розтягу I роду. Розкрито особливості механізмів зношування за випробувань в умовах закріпленого і незакріпленого абразиву. У першому випадку на обох типах покриттів реалізовувався типовий механізм з ознаками рівномірного зношування у вигляді неглибоких паралельних слідів різання від часточок абразиву, непорушно закріплених на корундовому диску. За випробувань на знос незакріпленим абразивом реалізувався інший механізм зношування і покриття руйнувалися внаслідок інтенсивнішого викришування міжламелярних оксидів внаслідок їх контакту з часточками піску. Вони зачіплялися за будь-який найменший дефект на поверхнях тертя, інтенсивно розширюючи його межі. Як наслідок на поверхнях тертя формувалася рельєф з виступів і впадин.

У додатках наведені 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 встановлені закономірності впливу фазового складу анодованих шарів на їх функціонально важливі властивості. Підвищену мікротвердість та абразивну зносостійкість синтезованим шарам забезпечувала фаза беміт ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), а високі трибологічні характеристики – фаза гібсит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), що зумовлено перенесенням тонкої плівки гібситу на контртіло. Вміст необхідних фаз (гібситу, беміту або їх суміші) у анодованих шарах регулювали температурою електроліту (від -5 до $+5^\circ\text{C}$), додаванням до сульфатного електроліту пероксиду водню ($30 \dots 50$ мл/л), або термічною обробкою ($100 \dots 400^\circ\text{C}$).

2. Вперше встановлено, що проникнення іонів кисню крізь бар'єрний шар для взаємодії з катіонами алюмінію можна полегшити додаванням до електроліту для анодування пероксиду водню ($10 \dots 50$ мл/л), або його продуванням озоном (25 мл/год/л) та застосуванням імпульсного режиму синтезу. Це дало змогу збільшити товщину анодованого шару на 40% .

3. Вперше показано, що плазмоелектролітне оксидування газотермічних покриттів систем $\text{Al}+\text{Mg}$, $\text{Al}+\text{Ni}$, $\text{Al}+\text{Cu}$, $\text{Al}+\text{Ti}$, формує у синтезованих шарах 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 (відносно тугоплавкого оксиду Al_2O_3) заповнюють розрядні канали, зменшують поруватість синтезованих шарів (від $8 \dots 10$ до $2 \dots 3\%$). При цьому вміст корунду у них підвищився від 30 до 70% , мікротвердість зросла на $300 \dots 500 \text{ HV}_{0,3}$, а абразивна зносостійкість – у $4 \dots 6$ разів.

4. Вперше узагальнено закономірності фрикційної взаємодії в середовищі мінеральної оливи пар тертя між плазмоелектролітним оксидним шаром на електродуговому покритті на сплаві Д16 та різними контртілами (бабіт, бронза, чавун, сталь, покриття з гальванічно нанесеним хромом). Встановлено, що із підвищенням мікротвердості синтезованих шарів і коефіцієнт тертя, і температура трибо розігріву, і втрата маси контртіл знижуються.

5. Вперше термодинамічно обґрунтовано найімовірніші реакції, що можуть відбуватися під час напильювання електродугових покриттів із порошкових дротів, та прогнозовано їх фазовий склад за використання для напильювання розроблених порошкових дротів системи легування $\text{Fe}-\text{Cr}-\text{Si}-\text{Mn}-\text{B}-\text{C}$ з екзотермічною шихтою. Із застосуванням надзвукового електродугового напильювання покриттів у структурі зносостійких покриттів утворювалися нанорозмірні ($50 \dots 150$ нм) виділення боридів титану, хрому та заліза, які забезпечили підвищення їх твердості та

зносостійкості. Для повного сплавлення компонентів шихти та оболонки порошкових дротів до їх шихти додавали 1 мас.% суміші легкоплавких порошків евтектичного складу ($\text{FeSi} + \text{FeMn} + \text{B}_2\text{O}_3$), чим забезпечили гомогенність покриттів та прогнозованість їх структурно-фазового складу.

6. Вперше встановлено, що електродугове напилювання покриттів порошковими дротами системи легування Fe-Cr-Si-Mn-B-C із екзотермічною шихтою забезпечило підвищення температури диспергованих краплин розплаву від 1800 до 2500 °C. Завдяки цьому природна поверхнева плівка Al_2O_3 на алюмінієвих сплавах легко розплавлялася і краплини легко приварювались до алюмінієвої основи. Як наслідок, міцність зчеплення між покриттям і основою зросла на 50%.

Загалом усі положення наукової новизни роботи обґрунтовані, чітко сформульовані і дають вичерпне уявлення про вагомість і новизну отриманих у дисертації результатів.

5. Практичне значення роботи.

Встановлені у дисертації закономірності структурування електродугових покриттів, пов'язані з протіканням екзотермічних реакцій між компонентами шихти порошкових дротів системи легування Fe-Cr-Si-Mn-B-C, дали змогу розробити нові і високоефективні порошкові дроти із екзотермічною шихтою, що суттєво розширило діапазон електродних матеріалів, придатних для електродугового напилювання. Зокрема, на основі результатів проведених досліджень та дослідно-промислової перевірки роботоздатності відновлених деталей різного призначення вдалось обґрунтувати і оптимізувати склад порошкових дротів, призначених для відновлення різного типу валів. Причому враховувалась їх придатність до експлуатації в надскладних умовах високих питомих навантажень у тому числі за доступу до зони контакту елементів тертя абразивних часточок, яких важко уникнути в реальних експлуатаційних умовах.

Використання подвійного сопла Лавалю в розробленому металізаторі забезпечило можливість напилювання покриттів у надзвуковому режимі та формувати однорідніших (відносно отримуваних за дозвукового напилювання) покриттів з покращеними функціональними властивостями. Створено технологічну інструкцію відновлення валів різної геометрії і призначення.

6. Впровадження результатів.

Результати і практичні рекомендації дисертаційної роботи вже впроваджені у технологічних процесах відновлення поверхонь зношених деталей різного призначення, що підтверджено актами про використання розроблених підходів в різних галузях промислового і сільськогосподарського виробництва.

Отримані в дисертації наукові результати та розроблений з їх урахуванням технологічний регламент використані також для обґрунтування складу шихти новостворених порошкових дротів із екзотермічною шихтою. Завдяки цьому вдалося не лише відновити роботоздатність зношених і практично непридатних

для подальшої експлуатації елементів машин різного призначення, але ще й суттєво покращити їх функціональні властивості після відновлення, зробивши їх по крайній мірі сумірними новим деталям (а подекуди і кращими за них).

7. Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях.

Основні результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, достатньо повно висвітлені в 47 опублікованих наукових працях. Серед них 22 статті опубліковані у фахових наукових виданнях, 18 з них входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 9 – до переліку фахових наукових видань України, а також 16 публікацій у матеріалах конференцій. За результатами роботи отримано 3 патенти України на корисну модель. Загалом 2 праці опубліковано у журналі, віднесеному до квартилю Q1, 4 - Q2, та 12 - Q3.

8. Зауваження та коментарі до дисертації:

1. В дисертаційній роботі акцентується на важливій ролі залишкових напружень розтягу, що виникають в електродугових покриттях. Це значною мірою визначається їх структурно-фазовим станом. Проте не зовсім зрозуміло, яким чином автор відрізняв структуру мартенситу від фериту в матричній фазі?
2. В роботі відзначено, що в плазмо-електролітно окисдованих шарах, синтезованих на електродугових покриттях, виявилось менше корунду, ніж у аналогічно синтезованих шарах на сплавах такого ж складу. Цей факт, на мій погляд, потребує детальнішого пояснення.
3. Не зовсім зрозуміло, чому технологія плазмо-електролітного оксидування менш широко впроваджена, порівняно з технологією електродугового напилювання покриттів? Адже результати порівняння, наведені у розділі 7 свідчать, що за зносостійкістю плазмо-електролітно окисдовані шари суттєво перевищують можливості електродугових покриттів.
4. В роботі запропоновано використовувати термічну обробку алюмінієвого сплаву з синтезованим на його поверхні твердоанодованим шаром шляхом його нагрівання до температури 400⁰C. Проте під час такого нагрівання стає можливим знеміцнення самого алюмінієвого сплаву і це може нівелювати позитивний вплив твердого анодування.
5. Автором продемонстровано, що тиск повітряного струменю під час електродугового напилювання покриттів значною мірою покращував їх властивості. Разом з тим аналізується лише два його значення – до- і надзвуковий повітряні струмені. Не зрозумілим залишилось, чому не використовували ще вищий тиск повітря (понад 1.2 МПа)?
6. В роботі не чітко пояснено, чому в умовах незакріпленого абразиву (абразив пісок) зносостійкість електродугових покриттів з розроблених порошкових дротів виявилась меншою, тоді як за випробувань в умовах закріпленого абразиву (абразив корунд) – навпаки стала вищою, порівняно з еталоном із сталі У12. Це потребує чіткіших пояснень.

7. Не вдало сформульовано підпис до рисунка 3.36: Схема комплексної обробки анодованих шарів. Тоді як насправді це схема анодованого шару та його комплексної обробки (стор. 152).

Разом із тим виявлені в роботі недоліки та зроблені зауваження в основному мають рекомендаційний характер і не знижують наукову та практичну вагомість отриманих результатів

Загальний висновок.

Вважаю, що дисертаційна робота є завершеною науковою роботою, що містить нові і оригінальні наукові положення і інженерні рішення, а наведені в роботі наукові результати експериментальних досліджень, їх трактування та аналіз раніше не захищалися та повною мірою відповідають паспорту спеціальності 05.02.01 – матеріалознавство і за напрямом досліджень, і за паспортом спеціальності, і за ґрунтовністю опрацювання і вирішення сформульованої в дисертаційній роботі проблеми.

За актуальністю, обсягом виконаних досліджень, науковою та практичною цінністю одержаних результатів та їх новизною і високим рівнем обґрунтування кожного з елементів новизни 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:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри матеріалознавства
та інженерії матеріалів НУ «Львівська
політехніка»

 **Зоя ДУРЯГІНА**

Підпис проф. З. Дурягіної засвідчую

Вчений секретар університету



 **Роман БРИЛИНСЬКИЙ**

Отримено
12.09.25 