

ВІДГУК

**офіційного опонента на дисертацію Бурлаченка Олексія Миколайовича
«Структурно-фазові перетворення в металокерамічних та
інтерметалідних порошках і металопорошкових дротах в процесі
плазмово-дугового розпилення та формування покриттів»,
що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство,**

Актуальність обраної теми дисертації

Сучасна промисловість потребує нових високоефективних матеріалів, які підвищують надійність обладнання та оптимізують використання ресурсів і енергії. Одним із ключових рішень цієї проблеми є розробка багатофункціональних захисних покриттів, що мають високу твердість, термостійкість, зносостійкість та корозійну стійкість. Формування таких покриттів методом газотермічного напилення дає можливість створення нових структур, здатних витримувати складні експлуатаційні умови. Але, як зазначено в роботі, на даний час приділено недостатньо уваги дослідженню процесів структуроутворення та технологіям виробництва порошкових матеріалів для газотермічного напилення. Водночас розвиток адитивних технологій (АТ) вимагає виробництва гранульних матеріалів із високою сферичністю частинок для їх ефективного застосування в інженерних та виробничих процесах. Незважаючи на значну кількість досліджень і практичних розробок у цих напрямках, залишаються невирішеними важливі питання, пов'язані зі створенням високоефективних технологій отримання порошків як для газотермічного напилення захисних покриттів, так і для технологій адитивного виробництва.

Завдяки унікальному комплексу фізико-хімічних властивостей перспективними матеріалами для адитивних технологій та нанесення функціональних покриттів є інтерметаліди та металокераміка. Однак широке використання цих матеріалів в промисловості обмежується відсутністю ефективних технологій сфероїдизації порошків з цих матеріалів.

Тому, представлена до захисту дисертаційна робота Бурлаченка Олексія Миколайовича, яка присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми отримання інтерметалідних та металокерамічних сферичних гранульних матеріалів для адитивних технологій та покриттів з підвищеними експлуатаційними властивостями, є надзвичайно актуальною. Дана робота, спрямована на дослідження механізмів сфероїдизації порошкових частинок та формування багатофункціональних покриттів шляхом вивчення структурно-фазових перетворень в процесі плавлення в порошків і металопорошкових дротів високотемпературним плазмовим струменем з подальшим надшвидким охолодженням, дозволить значно розширити сфери практичного застосування інтерметалідних та металокерамічних матеріалів у передових галузях промисловості для підвищення надійності і ресурсу машин та обладнання і сприятиме подальшого розвитку технологій захисних покриттів в Україні.

Про актуальність теми дисертаційної роботи Бурлаченка Олексія також свідчить її зв'язок з науковими програмами Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України: «Дослідити процеси формування газотермічних і магнетронних мікронанокомпозитних покриттів з підвищеними функціональними властивостями» (№ДР №0110U002754, 2009-2012); «Дослідження фізико-хімічних процесів формування та властивостей композиційних жаростійких покриттів на основі інтерметалідів Fe-Al» (№ДР №0113U002031, 2013-2015); «Розробка принципів створення нових зносо- та жаростійких керметних покриттів з механічно легованих порошків для захисту поверхні легких сплавів» (№ДР №0112U000623, 2013-2016); «Дослідження фізико-хімічних процесів формування та розробка наукових принципів отримання композиційних покриттів на базі сплавів і сполук з аморфною та нанокристалічною структурою» (№ДР 0115U006705, 2016-2018); «Дослідження фізико-хімічних процесів формування газотермічних і магнетронних Ti-Al-покриттів з нанокомпозитною структурою для захисту поверхні Al- і Ti-сплавів від зношування і високотемпературної корозії» (№ДР 0118U100492, 2019-2021).

Оцінка змісту дисертаційної роботи

Дисертація Буллаченко О.М. складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 21 авторських аркушів, у тому числі, 13 додатків. Обсяг основного тексту дисертації становить 17,5 авторських аркушів, 199 рисунків, 70 таблиць. Список використаних джерел нараховує 371 найменування.

Вступ дисертації достатньо повно розкриває сутність та сучасний стан науково-технічної проблеми; обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету роботи, задачі, об'єкт, предмет і методи досліджень, наукову новизну, визначено практичну значимість одержаних результатів, наведено особистий внесок здобувача, апробацію результатів досліджень, публікації за темою дисертації та структуру роботи.

У **першому розділі** дисертант Бурлаченко О.М. докладно висвітлив сучасний стан питання щодо розробок і тенденцій розвитку технологій отримання металокерамічних та інтерметалідних порошкових матеріалів та перспективи їх застосування для отримання покриттів та об'ємних виробів. Зроблено огляд науково-технічної інформації стосовно розробки нових порошкових матеріалів з метою підвищення експлуатаційних властивостей захисних покриттів та отримання об'ємних виробів методами адитивного виробництва.

Аналіз літературних джерел показав, що перспективними матеріалами для отримання покриттів з високими експлуатаційними характеристиками є композиційні порошкові матеріали на основі інтерметалідів NiAl, Ni₃Al, Fe₃Al та FeAl з керамічними наповнювачами (B₄C, BN, SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, Ti₅Si₃). Особливу увагу дисертант приділив питанням застосування механо-хімічного синтезу для отримання металокерамічних порошкових матеріалів на основі

інтерметалідів, зокрема алюмінідів титану. Зроблено висновки щодо доцільності нанесення захисних покриттів з металокерамічних та інтерметалідних матеріалів методами газотермічного напилення. В роботі показано переваги наноструктурованих покриттів, отриманих методами газотермічного напилення.

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що для забезпечення технологічності процесу нанесення захисних покриттів методами газотермічного напилення та отримання об'ємних виробів методами аддитивного виробництва доцільно використовувати сферичні металокерамічні та інтерметалідні порошки. Перспективним методом сфероїдизації порошків є плазово-дугове розпилення, яке характеризується високими показникам продуктивності до 12–16 кг/год, дозволяє використовувати широкий асортимент стандартних витратних матеріалів із суцільних та порошкових дротів, прутків, порошкових матеріалів. Втім шляхом критичного аналізу дисертантом було зроблено висновок, що на сьогодні відсутні узагальнюючі дані щодо впливу процесів процесів сфероїдизації дисперсних крапель-частинок, що перешкоджає подальшому розвитку та широкому впровадженню даного методу у виробництво.

На мою думку, огляд літературних вітчизняних і закордонних джерел та наступні узагальнення аналітичних даних, що виконані шляхом критичного аналізу, дозволили здобувачеві Бурлаченко О.М. визначити мету та завдання дисертаційної роботи, а також окреслити шляхи їх реалізації.

Другий розділ дисертації містить опис методик досліджень, обладнання та обробки їх результатів. Насамперед детально охарактеризовано вихідні матеріали, що слугують для отримання інтерметалідних порошків системи Fe-Al та металокерамічних порошків для плазово-дугового розпилення. Наведено морфологію частинок вихідних порошків, характеристики вихідних матеріалів та результати рентгенофазового аналізу. Докладно описано вихідні матеріали та технологію отримання метало-порошкових дротів. Наведено морфологію частинок та рентгенограми вихідних порошків, а також характеристики та поперечний переріз отриманих дротів.

Детально опрацьовано технологічний метод одержання нових порошків методом механо-хімічного синтезу: надано достатню інформацію про установки для механо-хімічного синтезу інтерметалідних систем Fe-Al та металокерамічних систем TiAl-НТС; наведено технологічні режими процесів механо-хімічного синтезу включно з характеристиками розмельних тіл. Наведено опис лабораторного устаткування плазово-дугового напилення з метою сфероїдизації порошків та нанесення покриттів та технічні характеристики установок. Детально описано технологічний процес сфероїдизації порошків на установках УПУ-8М та PLAZER 30-PL-W.

Описано методику математичного планування експерименту - для вибору режимів плазового напилення покриттів із порошків, отриманих методом МХС, використовували матрицю дробового факторного плану експерименту.

Загалом другий розділ дисертації Бурлаченка О.М. демонструє чітку і

логічну реалізацію поставленої мети дослідження. Він підтверджує здатність автора формулювати та послідовно розв'язувати складні наукові завдання, використовуючи сучасні методики та обладнання, а також про вміння співставляти та аналізувати результати, отримані різними методами, і формулювати на їхній основі коректні висновки, що підтверджує системний підхід до вирішення наукових проблем.

Третій розділ присвячено матеріалознавчому аналізу діаграм фазової рівноваги багатокомпонентних металокерамічних систем «TiAl-НТС» та інтерметалідних сплавів «Fe-Al». Було проведено термодинамічну оцінку міжфазної взаємодії компонентів у цих системах, визначено їх термодинамічні параметри для інтерметалідних сплавів, а також для твердих розчинів і аморфного стану в бінарних системах Fe-Al та Ti-Al. На основі отриманих результатів обрано оптимальні склади порошкової шихти для процесів механохімічного синтезу (МХС) та порошкового детонаційного напилення (ПДН).

Досліджено послідовність структурно-фазових перетворень у процесі МХС для металокерамічних систем TiAl-НТС та інтерметалідних сплавів Fe-Al. Встановлено, що синтез нових фаз відбувається у кілька стадій: подрібнення вихідних частинок порошку, «холодне» зварювання їх між собою з утворенням конгломератів, формування конгломератів із шаруватою структурою, набуття гомогенної структури та синтез нових фаз. Вивчено процес синтезу шляхом аналізу змін розмірів кристалітів залежно від часу обробки суміші в планетарному млині.

Проведено оцінку отриманих характеристик порошкових систем «TiAl-НТС» та «Fe-Al», включаючи середній розмір частинок, насипну щільність і текучість. Встановлено, що отримані порошки не мають необхідної текучості, тому для їх подальшого використання в технології ПДН була розроблена методика отримання конгломератів, які відповідають технологічним вимогам.

У четвертому розділі досліджено теплові процеси, що відбуваються під час нагрівання та розплавлення багатокомпонентних металокерамічних та інтерметалідних порошків у плазмовому потоці. Проведено розрахунки параметрів плавлення порошкових матеріалів, на основі яких проаналізовано їх нагрів і рух у плазмовому струмені (ПС). Визначено оптимальні параметри порошкового детонаційного напилення (ПДН), зокрема використання аргон-азотної суміші як плазмоутворюючого газу, дистанція напилення залежно від типу матеріалу (80–120 мм) та сила струму: 600 А для металокерамічних порошків і 400–500 А для інтерметалідних.

Вивчено процес сфероїдизації частинок металокерамічних та інтерметалідних порошків. Встановлено, що при розпиленні інтерметалідних порошків близько 95 % отриманих гранул мають сферичну форму, а внаслідок їхньої взаємодії з кисневмісними зонами на поверхні гранул утворюються оксидні плівки Al_2O_3 . У металокерамічних порошках частка сферичних гранул становить 60–70 %. Крім того, під час стадій плавлення частинок відбувається синтез нових фаз — карбідів, боридів, силіцидів та оксидів титану й алюмінію. Внаслідок коагуляції частинок у плазмовому струмені їхній розмір порівняно

з вихідним порошком збільшується вдвічі для інтерметалідних матеріалів і у 6–18 разів для металокерамічних.

У п'ятому розділі представлено результати експериментальних досліджень процесу диспергування порошкових матеріалів (ПД) та порівняння отриманих даних із математичною моделлю сфероїдизації частинок. Проведені дослідження дозволили встановити, що похибка між теоретичними та експериментальними результатами залежить від фракційного складу. Для основної фракції ця похибка не перевищує 30%, що забезпечує високу точність прогнозування фракційного розподілу частинок.

Досліджено структурно-фазові перетворення під час нагрівання порошкових матеріалів. Виявлено, що в інтерметалідній системі Fe-Al при підвищенні температури спостерігається ендотермічний ефект, спричинений плавленням компонентів порошку, а також екзотермічна реакція, що свідчить про синтез нових фаз внаслідок взаємодії складових. Нагрівання металокерамічних порошків із наповнювачами WC-Co та WC має подібний характер — ендотермічні зміни пов'язані з магнітними перетвореннями та плавленням евтектики.

Проаналізовано вплив параметрів порошкового детонаційного розпилення (ПДР) та типу наповнювача на властивості сфероїдизованих гранул. Встановлено, що збільшення сили струму при розпиленні порошкової системи Fe-Al змінює її хімічний склад у зоні розплаву на торці дроту: при 180 А формується Fe_3Al , а при 270 А — FeAl . Також спостерігається зменшення середнього розміру гранул із 144 мкм до 115 мкм. У випадку диспергування металокерамічних порошків розмір гранул та їх сферичність залежать від керамічного наповнювача. Доведено, що додавання тугоплавких наномодифікаторів у склад наповнювача сприяє зменшенню середнього розміру гранул у 1,1–1,4 рази.

Шостий розділ присвячений аналізу процесів формування покриттів та експериментальним дослідженням їхньої структури й фазового складу для інтерметалідних та металокерамічних матеріалів. Досліджено поведінку розплавлених частинок порошку системи Fe-Al після їхнього зіткнення з основою. Встановлено, що присутність інтерметалідних фаз знижує здатність розплавлених частинок до розтікання на поверхні на 21–28%. Проведено оцінку температури у зоні контакту «частинка-основа» та аналіз залишкових напружень, з урахуванням впливу матеріалу напилення і складу основи.

Вивчено структурно-фазові перетворення, що відбуваються під час порошкового детонаційного напилення (ПДН) для сумішей системи Fe-Al, порошків Fe-Al та TiAl-НТС, отриманих методом механохімічного синтезу (МХС), а також для порошкових систем Fe-Al, Fe-WC, Fe-B₄C. Встановлено, що на формування інтерметалідних покриттів впливає як склад матеріалу для напилення, так і режим процесу. Використання механічних сумішей не сприяє утворенню інтерметалідних покриттів. Водночас при застосуванні порошків системи Fe-Al, отриманих методом МХС, дозвукове напилення забезпечує збереження інтерметалідної структури покриттів, тоді як при надзвуківому плазово-дуговому напиленні формуються тверді розчини на основі $\alpha\text{-Fe}$.

Таким чином, для створення металокерамічних покриттів з високою щільністю та однорідною структурою доцільно застосовувати надзвуковий метод плазмового напилення.

У сьомому розділі розглянуто характеристики отриманих покриттів та розробку дослідно-промислових технологій їх практичного застосування на основі проведених досліджень. Встановлено, що інтерметалідні покриття системи Fe-Al належать до групи крупнокристалічних матеріалів, тоді як металокерамічні покриття системи TiAl-НТС, залежно від типу основи, можуть мати гетерофазну мікроструктурну структуру (для основ AISI 1008 і AA5154) або мікронанокристалічну структуру (для основи Grade 5).

Виявлено, що отримані покриття демонструють високу стійкість до газоабразивного зношування як за кімнатної температури, так і при підвищених температурах до 550 °С. Досліджено вплив пористості та мікротвердості металокерамічних покриттів системи TiAl-НТС на інтенсивність їх зношування в умовах газоабразивного впливу.

Загалом, дисертація має чітку структуру, логічно побудована і являє собою завершену комплексну роботу, яка містить результати досліджень від аналізу факторів, що впливають на процеси формування фазового складу, структури та властивостей інтерметалідних та металокерамічних порошків та покриттів з них, до розробки і обґрунтування технологічних схем та режимів механо-хімічного синтезу порошків та плазмово-дугового напилення, при яких досягається високий рівень експлуатаційних характеристик покриттів, а також випробування розроблених технологій виробництва порошків та нанесення покриттів у реальних умовах виробництва.

Основний зміст дисертаційної роботи Бурлаченко О.М. ретельно і вірно відображено в авторефераті.

Оцінка обґрунтованості наукових положень дисертації, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Обґрунтованість та переконливість наукових положень дисертаційної роботи Бурлаченко О.М. обумовлено використанням комплексного підходу до планування та проведення досліджень, за якого теоретичні та експериментальні методи досліджень логічно взаємодоповнюють один одного. При цьому роботу

Для виконання роботи автор застосовував сучасне дослідницьке обладнання та стандартні експериментальні методики: методи оптичної та електронної мікроскопії, рентгенофазовий аналіз, дюрOMETричні випробування, диференціально-термічний аналіз (ДТА), триботехнічні випробування

Експериментальні дослідження проводили у достатньому обсязі; а отримані експериментальні дані обробляли з використанням статистичних методів для забезпечення достовірності та обґрунтованості результатів.

Достовірність положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі, підтверджено відтворюваністю результатів, отриманих за різними теоретичними та експериментальними методами, використанням

сучасного дослідницького обладнання та перевіркою отриманих даних у виробничих умовах, що засвідчено відповідною довідкою з підприємства, наведеною в дисертації.

Обґрунтовані положення і висновки рецензованої дисертаційної роботи не вступають у протиріччя з фундаментальними основами матеріалознавства.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Науковим доробком дисертації Бурлаченко О.М. є вирішення науково-технічної задачі, яка полягає у розробці наукових підходів до отримання інтерметалідних та металокерамічних гранульних матеріалів з високим ступенем сферичності для адитивних технологій та плазово-дугового нанесення захисних покриттів з високим рівнем експлуатаційних властивостей.

У результаті вирішення цієї науково-технічної задачі, дисертантом було одержано ряд наукових положень, які у своїй сукупності складають **наукову новизну дисертації**:

1. Запропоновано новий підхід термодинамічних розрахунків у поєднанні з напівемпіричною моделлю Мієдема, що включає одночасну оцінку хімічного, пружного та структурного внеску в ентальпію утворення безперервного ряду твердих розчинів та переходу до аморфного стану для бінарних систем. З використанням даного підходу вперше здійснено прогнозування фазового складу і умов міжфазної взаємодії компонентів в порошкових сумішах Fe-Al, Ti-Al та TiAl-B₄C, TiAl-BN, TiAl-SiC, TiAl-Si₃N₄, як в процесі механохімічного синтезу при отриманні інтерметалідних або композиційних порошків, так і при їх нагріванні в високотемпературному плазовому струмені.

2. Вперше запропоновано критерій визначення критичного розміру кристалітів $K_{кр}$, що утворюються при обробці мікрометричних компонентів порошкових сумішей Fe+Ti+Al чи Fe+TiAl в процесі механохімічного синтезу. Досягнення певних значень даного критерію забезпечує формування заданого фазового складу синтезованих продуктів, а саме при: $K_{кр}=30\ldots 70$ нм - твердих розчинів Fe(Al) та Fe(Ti); $K_{кр}<30$ нм - інтерметалідної фази (Fe,Ti)₃Al.

3. Вперше показано можливість управління та підвищення параметра ступеню деформації розплавлених частинок інтерметалідних порошків системи Fe-Al при їх взаємодії з поверхнею основи в процесі плазово-дугового напилення, шляхом легування порошків Mg і Ti при їх отриманні в процесі механохімічного синтезу.

4. Вперше встановлено факт утворення вторинної нанокристалічної структури в процесі надшвидкого охолодження наноструктурованих металокерамічних (TiAl-B₄C, TiAl-BN, TiAl-SiC, TiAl-Si₃N₄) та інтерметалідних (Fe-Al) порошків, отриманих механохімічним синтезом, при їх сфероїдизації в плазових струменях та при плазово-дуговому напиленні покриттів. При цьому в процесі такої обробки середній розмір кристалітів у сфероїдизованих наноструктурованих гранулах і напилених покриттях в середньому збільшується у 2-3 рази, в порівнянні із вихідними порошками.

5. Вперше визначено технологічні фактори (тепловміст, швидкість плазмового струменя, відносна тривалість процесу перебування в ньому частинок) процесу плазмово-дугового напилення покриттів із металокерамічних порошків системи «TiAl - безкисневі тугоплавкі сполуки», що були отримані методом механохімічного синтезу. На їх основі здійснено вибір оптимальних інтервалів технологічних режимів, які забезпечують формування покриттів з комплексом заданих характеристик (нанокристалічна структура, пористість $<1\ldots4\%$, мікротвердість $>5,5$ ГПа, підвищена зносостійкість тощо).

6. Отримало подальший розвиток уявлення про закономірності металургійної взаємодії між сталеву оболонкою і порошковими керамічними наповнювачами із безкисневих тугоплавких сполук (WC , B_4C , Cr_3C_2) та протікання структурно-фазових перетворень в металопорошкових дротах систем $Fe-WC$, $Fe-B_4C$, $Fe-Cr_3C_2$ $Fe-Al-Cr_3C_2$ в процесі їх нагріву і розпилення плазовими струменями по схемі «дріт-анод». Підтверджена можливість отримання сферичних гранул і функціональних покриттів із складнолегованих сплавів систем $Fe-W-C$, $Fe-Cr-C$, $Fe-B-C$, $Fe-Cr-B-C$, $Fe-Al-B-C$.

7. Отримало подальший розвиток уявлення про закономірності утворення інтерметалідних фаз при плазмово-дуговому розпиленні струмопровідних металопорошкових дротів. Встановлено залежності зміни основних технологічних параметрів плазмово-дугового розпилення струмопровідного металопорошкового дроту системи $Fe-Al$ (сили струму, швидкості подачі дроту, витрати плазмоутворюючого та супутнього газу), які дозволяють управляти фазовим складом отриманих інтерметалідних сферичних гранул та напилених покриттів (від Fe_3Al до $FeAl$).

З моєї точки зору, наведені дані позитивно характеризують наукові напрацювання дисертанта Бурлаченко О.М. і свідчать про вагомість одержаних результатів та узагальнень, що дозволило автору встановити технологічні режими отримання інтерметалідних та металокерамічних порошків систем $Fe-Al$ та $TiAl-NTC$ методом механохімічного синтезу, їх сфероїдизації методом плазмово-дугового розпилення та нанесення покриттів з отриманих порошків методом плазмово-дугового напилення.

Практична цінність результатів дисертації.

Результати дисертаційного дослідження Бурлаченка Олексія Миколайовича є важливими і у прикладному плані.

На основі проведених досліджень розроблено технологічні процеси отримання інтерметалідних та металокерамічних порошків систем $Fe-Al$ і $TiAl-NTC$ шляхом механохімічного синтезу. Процес включає термодинамічні розрахунки для оптимального вибору складу вихідних порошкових сумішей, підготовку шихти, її обробку у високоенергетичному планетарному шаровому млині та конгломерування отриманих порошків. Це дозволило сформуванню наноструктурних порошків з розмірами кристалітів у діапазоні $4\text{--}11,7$ нм, які мають необхідні технологічні властивості для використання у ПДР, а також для створення багатофункціональних покриттів та сферичних гранул для 3D-друку.

Оптимізовано хімічний склад композиційних металопорошкових дротів системи Fe–Al з порошковими наповнювачами на основі алюмінію та дротів зі сталевою оболонкою, що містить сердечник із керамічних сполук W_4C , Cr_3C_2 , WC з нанорозмірними модифікаторами тугоплавких матеріалів.

Розроблено новий плазмотрон із мідним пустотілим електродом для нанесення покриттів із композиційних інтерметалідних і металокерамічних порошків, а також отримання сферичних гранул для 3D-друку. Його конструкція забезпечує розширені можливості регулювання швидкості високотемпературного плазмового струменя в надзвукових режимах витікання, а також гнучкість у виборі плазмоутворюючих газів із широким діапазоном регулювання ентальпії плазми. Це дає змогу ефективно розплавляти тугоплавкі компоненти порошків та забезпечувати їх надшвидке охолодження для формування аморфної або нанокристалічної структури.

Розроблено установку нового покоління для плазмово-дугового нанесення покриттів та розпилення струмопровідних дрових матеріалів. Її особливістю є застосування плазмотрону з підвищеним струмовим навантаженням та оптимізованими параметрами газорозрядної камери, сопла та системи обдуву плазмового струменя супутнім потоком газу. Це сприяє ефективному нагріванню металопорошкового дроту діаметром до 2,4 мм з порошковими наповнювачами безкисневої кераміки, підвищенню продуктивності розпилення (від 12 до 18 кг/год) та отриманню високоякісних покриттів із пористістю менше 1%.

Розроблено дослідно-промислове обладнання для плазмово-дугової сфероїзації інтерметалідних і металокерамічних порошків неправильної форми та розпилення металопорошкових дротів із керамічними порошковими наповнювачами. Використання камери з захисною атмосферою та газовою протитечією дозволяє отримувати гранули в розмірному діапазоні 10–160 мкм з коефіцієнтом сферичності $>0,86$.

На прикладі сферичних гранул, отриманих із металопорошкового дроту з інтегральним хімічним складом, що відповідає інтерметаліду Fe_3Al , підтверджено їх перспективність як матеріалу для 3D-друку об'ємних зразків методами адитивного лазерного наплавлення (Direct Energy Deposition – DED) та селективного лазерного плавлення (Selective Laser Melting – SLM).

Розроблено рекомендації щодо промислового застосування двох технологій порошкового детонаційного напилення (ПДН) покриттів із металопорошкових дротів Fe–Al для захисту труб пароперегрівачів сміттєспалювального обладнання від високотемпературної корозії та газоабразивного (зольного) зношування.

Вважаю за необхідне зазначити, що важливим практичним напрацюванням дисертанта є впровадження результатів дисертаційного дослідження на підприємстві ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) при організації промислового виробництва плазмово-дугової установки «PLAZER 50–PL–W».

Вищевказане переконливо свідчить про високу наукову та практичну значимість виконаного Бурлаченко О.М. дисертаційного дослідження.

Повнота викладу основних результатів дисертації у наукових фахових виданнях

Основні результати рецензованої дисертаційної роботи Бурлаченко О.М. опубліковані у 44 наукових працях: 22 статті у наукових фахових виданнях, з яких 5 статей – в журналах, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних (Scopus, Web of Science) та 15 статей – в виданнях України, що входять до Переліку наукових фахових видань МОН України; 20 публікацій за матеріалами доповідей на міжнародних конференціях; отримано 2 патенти на винахід на спосіб плазмово-дугового напилення покриттів.

Загалом вимоги стосовно повноти публікацій та апробації результатів дисертації Бурлаченко О.М. виконано у повному обсязі.

Зауваження по дисертаційній роботі

Окрім викладених вище позитивних якостей рецензованої дисертації Бурлаченко О.М. слід зробити наступні зауваження по роботі:

1. У вступі дисертаційної роботи та автореферату, а саме у розділі «Актуальність теми», відсутнє точне й лаконічне формулювання конкретної науково-технічної проблеми, на вирішення якої спрямоване дослідження. Крім того, у вступі немає чіткого висвітлення очікуваних корисних наслідків для науки та промисловості, які можуть бути отримані в результаті вирішення зазначеної проблеми. Автор у кінці зазначеної рубрики обмежується тим, що «встановлення закономірностей сфероїдизації інтерметалідних і металокерамічних частинок порошку, а також формування багатофункціональних покриттів під час ПДН є актуальною науковою та практичною проблемою, що дозволить значно розширити практичне застосування цих матеріалів».

Разом з тим, слід зазначити, що науково-технічну проблему чітко сформульовано в анотації дисертаційної роботи та автореферату: «Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-практичної проблеми одержання інтерметалідних та металокерамічних багатофункціональних покриттів і сферичних гранульних матеріалів для адитивних технологій шляхом вивчення фазових і структурних перетворень в процесі плавлення порошків і металопорошкових дротів високотемпературним плазмовим струменем і при подальшому надшвидкому охолодженні крапель розплаву, і на цій основі удосконалення обладнання для плазмово-дугового розпилення (ПДР), що забезпечить отримання покриттів і гранул з підвищеними експлуатаційними та технологічними властивостями».

2. У розділі 2 дисертації автор детально характеризує об'єкти досліджень. Але, на жаль, висновки до розділу 2 є коротким повтором викладених у розділі методик і не містять належного узагальнення значущих аспектів такого важливого розділу, як методологічне забезпечення дисертаційної роботи.

3. У розділі 2 на сторінці 97 дисертації представлено опис методик визначення триботехнічних властивостей покриттів. Автор некоректно вживає терміни «знос» та «зношування». Наприклад, у фразі «Для вимірювання лінійного зношування зразків з покриттям використовувався індикатор...»

допущена термінологічна неточність. Важливо зазначити, що зношування — це процес, тоді як знос є його результатом, що проявляється у зміні лінійних розмірів зразка. Тому коректним є вимірювання саме зносу (лінійного, вагового, об'ємного), а не зношування. Дана помилка у вживанні термінів «знос» та «зношування» присутня і розділі 7, а саме в описі результатів триботехнічних досліджень покриттів з розроблених порошків.

4. У розділі 2 на сторінці 101 автор зазначає, що знос покриттів в умовах тертя ковзання визначали у грамах на 1 км. Важливо враховувати, що ваговий знос значною мірою залежить від густини матеріалу покриття, тому більш коректним підходом було б визначити лінійний знос для оцінки змін, що відбуваються в покритті.

Серед недоліків роботи варто відзначити також те, що автор не завжди дотримується стандартної системи одиниць вимірювання (СИ), що може ускладнювати порівняння отриманих результатів з іншими науковими дослідженнями.

5. На сторінці 157 автор описує мікроструктури гранул після проходження стадій плавлення та надшвидкого охолодження. На частинках порошків інтерметалідів FeAl , FeAl_3 , Fe_2Al_5 , Fe-AlMg було зафіксовано куполоподібні структури. На основі аналізу літературних джерел автор припускає, що ці утворення є оксидом алюмінію. Однак у роботі немає прямих доказів цього припущення, зокрема, аналізу хімічного складу таких утворень методом мікрорентгеноструктурного або рентгенофазового аналізу. Крім того, некоректно вказувати на ідентичність матеріалів порошків NiAl та FeAl , оскільки вони мають різний хімічний та фазовий склад.

6. На сторінці 164 автор зазначає, що наявність оксидної плівки на поверхні гранул ускладнює визначення їхнього внутрішнього хімічного складу. У такому випадку доцільно було б провести аналіз мікроструктури та хімічного складу гранул на шліфах поперечного перерізу частинок. Це дозволило б не лише визначити внутрішній склад і структуру гранул, а й дослідити склад та товщину оксидних плівок на їхній поверхні.

7. У розділі 7.1.2. наведено результати триботехнічних досліджень розроблених покриттів, зокрема їх знос в умовах газоабразивного та абразивного зношування, а також в умовах тертя ковзання без мастила. Дисертант пояснює отримані результати, спираючись на особливості мікроструктури покриттів. Водночас у роботі відсутні результати аналізу поверхонь тертя, що могли б підтвердити ці припущення та надати глибше розуміння механізмів зношування.

8. Під час випробувань на стійкість покриттів Fe-Al до газоабразивного зношування для порівняння використовувалися зразки сталей, що застосовуються у виробництві деталей і вузлів, які працюють в умовах впливу абразиву при температурах від 20 °C до 570 °C. Однак більш доцільним було б проводити порівняльний аналіз не зі сталлю, а з комерційними покриттями, які використовуються для підвищення зносостійкості сталевих виробів у таких умовах.

Аналогічна неточність спостерігається у випробуваннях стійкості металокерамічних покриттів TiAl-SiC та $\text{TiAl-Si}_3\text{N}_4$, де для порівняння було

обрано зразки з титанового та алюмінієвого сплавів, а також покриття з вихідного порошку TiAl. У цьому випадку також доцільніше було б співставляти розроблені металокерамічні покриття з комерційно доступними аналогами – металокерамічними покриттями, а не з металевими сплавами.

9. Практичне значення результатів наукових досліджень відіграє ключову роль у дисертаційній роботі. Зокрема, в роботі було розроблено технічні умови (ТУ) на інтерметалідні порошки системи Fe-Al для газотермічного напилення, на металокерамічні порошки системи TiAl-неметалеві тугоплавкі сполуки, а також на металопорошковий дріт системи «Fe-Al-Cr₃C₂-B₄C-SiC (наномодифікатор)» для плазмово-дугового розпилення сферичних гранул і нанесення покриттів, на металопорошковий дріт FA14 (FCW) системи «Fe-Al-SiC (наномодифікатор)» для плазмово-дугового розпилення інтерметалідних сферичних гранул і нанесення покриттів. Крім того, розроблено новий плазмотрон із мідним пустотілим електродом для плазмово-дугового напилення покриттів із композиційних інтерметалідних і металокерамічних порошків, а також отримання сферичних гранул для 3D-друку; установку нового покоління для плазмово-дугового нанесення покриттів і розпилення струмопровідних дротових матеріалів, а також дослідно-промислове обладнання для плазмово-дугової сфероїзації інтерметалідних і металокерамічних порошків неправильної форми та розпилення металопорошкових дротів із керамічними порошковими наповнювачами. Результати дисертації Бурлаченка Олексія впроваджено на підприємстві ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) у межах промислового виробництва плазмово-дугової установки «PLAZER 50-PL-W», що підтверджено довідкою з підприємства.

Досягнутий технічний ефект має важливе практичне значення, але водночас у дисертації не представлено аналіз економічного ефекту (реального чи очікуваного) від впровадження нових технологій виробництва порошків і застосування покриттів із розроблених матеріалів, що могло б підтвердити досягнуті технічні результати.

Зазначені зауваження не стосуються основних положень, висновків і рекомендацій дисертації, не знижують наукової та практичної цінності виконаної роботи.

Загальні висновки по дисертації

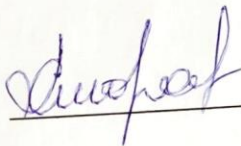
Дисертаційна робота Бурлаченка Олексія Миколайовича є завершеною науковою працею, при виконанні якої були одержані нові науково обґрунтовані результати, що у сукупності вирішують актуальну науково-технічну проблему, а саме - створення науково-технічних основ управління структурою і фазовим складом композиційних металокерамічних та інтерметалідних сферичних гранульних матеріалів для адитивних технологій та покриттів з підвищеними експлуатаційними властивостями.

Вважаю, що дисертаційна робота «Структурно-фазові перетворення в металокерамічних та інтерметалідних порошках і металопорошкових дротах в процесі плазмово-дугового розпилення та формування покриттів», повністю

відповідає паспорту спеціальності 05.02.01 – «Матеріалознавство».

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю отриманих результатів, кількістю та якістю публікацій дана дисертаційна робота повністю відповідає всім вимогам пунктів 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого Постановою КМУ №1197 від 17.11.2021 року, а її автор – **Бурлаченко Олексій Миколайович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство.

Зав. відділу міжнародних зв'язків та
трансферу технологій
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича
Національної академії наук України
д.т.н., доцент

 Марина СТОРОЖЕНКО

Підпис Марини Стороженко засвідчую:

Учений секретар
Інституту проблем матеріалознавства
ім. І.М. Францевича
Національної академії наук України
к.ф.-м.н



 Денис МИРОНЮК