

Відгук

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **БУРЛАЧЕНКА ОЛЕКСІЯ МИКОЛАЙОВИЧА** на тему: «**Структурно-фазові перетворення в металокерамічних та інтерметалідних порошках і металопорошкових дротах в процесі плазово-дугового розпилення та формування покриттів**», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство

Актуальність теми дисертації

Розвиток таких галузей промисловості як аерокосмічна, автомобілебудівна, енергетична, нафто- та газовидобувна, ядерна вимагає підвищення надійності обладнання. Проте вплив агресивних середовищ та механічних навантажень (абразивне зношування, фретинг-корозія, адгезійне схоплювання) в тому числі при підвищених температурах, якому піддаються деталі призводить до зменшення їх робочого ресурсу та виходу зі строю обладнання. Використання плазово-дугових технологій дозволяє як наносити на поверхню деталі багатофункціональних покриттів так і отримувати сферичні гранульні матеріали для адитивних технологій, що дозволяє виготовляти деталі та вироби з високими експлуатаційними властивостями. Комплекс фізико-хімічних і механічних властивостей інтерметалідних та металокерамічних матеріалів робить їх перспективними для захисту деталей від руйнівних дій зовнішніх факторів.

Використання плазово-дугової технології дає змогу отримувати металокерамічні та інтерметалідні покриття, а також сферичні гранули. При дослідженні процесів сфероїдизації частинок і формування покриттів необхідно враховувати фізико-хімічні явища, що відбуваються під час проходження частинок через високотемпературний плазовий струмінь із подальшим надшвидким охолодженням.

Таким чином вивчення процесів формування в процесі плазово-дугового розпилення порошкових матеріалів та металопорошкових дротів з метою отримання інтерметалідних та металокерамічних покриттів та гранульних матеріалів з високим ступенем сферичності і на основі отриманих результатів розробка обладнання з метою отримання покриттів і гранул, які б відповідали сучасним вимогам є актуальною науковою та практичною проблемою.

Загальна характеристика роботи

Дисертаційна робота Бурлаченка О.М. складається з анотації двома мовами, вступу, семи розділів, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел з 371 найменувань на 40 сторінках та 13 додатків. Загальний обсяг роботи становить 484 сторінок, дисертаційна робота викладена на 338 сторінках друкованого тексту, у тому числі 189 рисунків, 70 таблиці та 331 сторінка основного тексту.

У вступі обгрунтована актуальність теми дисертації, вказано її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета й основні завдання досліджень, визначені об'єкт та предмет дослідження, показано наукова новизна отриманих результатів і їх практичне значення. Наведено інформацію про апробацію результатів, кількість публікацій по темі дисертаційної роботи із зазначенням особистого внеску автора та описано структуру дисертації.

У першому розділі автором проаналізовано сучасний стан розробки та одержання інтерметалідних і металокерамічних порошків, призначених для газотермічного напилення. Зазначено, що методами порошкової металургії створено значну групу композиційних матеріалів, придатних для експлуатації в умовах підвищеного зносу, агресивних середовищ і високих температур. Показано, що застосування методу механо-хімічного синтезу дає змогу суттєво розширити номенклатуру розроблюваних композицій та одержувати наноструктурні порошки. Проведено аналіз технологій нанесення покриттів із використанням методів газотермічного напилення, які відрізняються типом джерела тепла (електрична дуга, плазма, високочастотні розряди, газове полум'я). Проаналізовано вимоги до порошкових матеріалів, що застосовуються в адитивних технологіях. Відзначено, що використання методу плазово-дугового розпилення забезпечує отримання покриттів із найширшим спектром матеріалів незалежно від температури їх плавлення, дозволяє мінімізувати термічний вплив на основу деталі, формувати шарувату структуру з наперед заданими властивостями, а також дає змогу застосовувати різні плазмоутворювальні гази (аргон, гелій, водень, азот, аміак, природний газ, водяна пара). Крім того, метод забезпечує отримання сферичних гранул.

На підставі проведеного аналізу літературних джерел автором сформульовані мета та задачі дослідження.

У другому розділі представлено зовнішній вигляд, середній розмір, мікротвердість і фазовий склад порошків, що використовувалися для одержання інтерметалідних і металокерамічних матеріалів, а також як порошкові наповнювачі для металопорошкового дроту. Наведено режими роботи планетарного млина під час отримання інтерметалідних та металокерамічних порошків, подано характеристики розмельних тіл та барабана, що використовувалися у планетарному млині. Відмічено, що для забезпечення багаторазового повторення процесів холодного зварювання з утворенням агломератів і їх подальшого подрібнення до порошкової суміші додають поверхнево-активні речовини. Надано технічні характеристики обладнання, що використовувалося для експериментальних досліджень процесів сфероїдизації та нанесення покриттів. Зазначено, що для розпилення порошків використовували генератори плазми з режимами дозвукового витікання плазового струменя – «F4-MB» (Sulzer Metco, Швейцарія) та надзвукового витікання плазового струменя – «PLAZER 180-PL-S» (ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР», Україна). Для розпилення металопорошкових дротів застосовувався плазмотрон PLAZER 30 (ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР», Україна), який реалізує процеси плавлення та розпилення струмопровідного дроту-аноду, що подається в зону високошвидкісного

плазмового струменя. Зазначено, що в якості плазмоутворюючих газів використовували аргон або стиснене повітря, тоді як для обтискання плазмового струменя застосовували стиснене повітря. Наведено методики дослідження технологічних властивостей порошків та гранул після проходження високотемпературного плазмового струменя з подальшим надшвидким охолодженням, а також методики дослідження фізико-механічних та структурних властивостей одержаних покриттів.

У третьому розділі наведено діаграми стану систем Fe-Al та Ti-Al та вивчено, як легуючі елементи впливають на їх властивості. Відмічено, що використання титану як легуючого елементу в системі Fe-Al сприяє реалізації механізмів зміцнення за рахунок упорядкування структури, утворення дисперсних включень та формування когерентної мікроструктур. Підвищення міцності, жорсткості, опору повзучості та в'язкості руйнування в системі Ti-Al досягається шляхом створення композиційних матеріалів на основі інтерметалідних матриць, армованих керамічними частинками, такими як B_4C , TiB_2 , TiC , SiC .

Представлено результати термодинамічної оцінки міжфазної взаємодії компонентів у системах Fe-Al, Ti-Al, а також Ti і Al з B_4C , BN, SiC , Si_3N_4 . На основі отриманих даних визначено ймовірні продукти реакцій взаємодії TiAl з B_4C , BN, SiC , Si_3N_4 , а також оцінено можливе підвищення температури внаслідок перебігу цих реакцій. З використанням напівемпіричної моделі Мієдема автором виконано термодинамічні розрахунки для твердих розчинів і аморфного стану. На підставі даних розрахунків було обрано склади вихідних порошкових сумішей.

В розділі автор провів дослідження структурно-фазових перетворень в процесі механохімічного синтезу в порошкових сумішах Fe+Al та TiAl+ B_4C , TiAl+BN, TiAl+ SiC та TiAl+ Si_3N_4 в залежності від часу їх обробки. На основі отриманих даних встановлено, що на час отримання однофазного інтерметаліду в системі Fe-Al впливає вміст алюмінію: зі збільшенням його концентрації тривалість обробки зростає від 5 годин для Fe_3Al до 10 годин для FeAl. У порошковій суміші, розрахованій на одержання інтерметаліду Fe_2Al_5 , після 10 годин обробки формується двофазна структура, в якій, крім основної фази Fe_2Al_5 , присутня також незначна кількість фази FeAl. Встановлено, що формування твердого розчину відбувається за розміру кристалітів менше ніж 70 нм, а при зменшенні цього розміру до менш ніж 30 нм – утворюється інтерметалідна фаза. Формування однорідного композиційного металокерамічного порошку, що складається з металевої матриці TiAl, неметалевих тугоплавких включень і продуктів взаємодії вихідних компонентів між собою, завершується через 1,5 години.

Дана оцінка можливість використання отриманих порошків у процесі плазмо-дугового розпилення та зазначено, що для їх подальшого застосування необхідне попереднє конгломерування.

Четвертий розділ присвячено дослідженню сферичних гранул, утворених у процесі проходження порошків систем TiAl-НТС та Fe-Al,

отриманих методом механо-хімічного синтезу, крізь високотемпературний плазовий струмінь з подальшим надшвидким охолодженням. За допомогою комп'ютерного моделювання вивчено процес нагріву і рух частинок металокерамічного та інтерметалідного порошку у турбулентному високотемпературному плазовому струмені та визначено оптимальні режими нанесення відповідних покриттів. У розділі встановлено, що під час проходження порошків через плазовий струмінь кількість сферичних гранул становить близько 95 % для інтерметалідного порошку та 60–70 % – для металокерамічного. Показано, що збільшення сили струму від 400 до 500 А веде до зростання середнього розміру інтерметалідних гранул на 14–47 %.

У п'ятому розділі за допомогою методів математичного моделювання та диференціально-термічного аналізу досліджено процес диспергування струмопровідного металопорошкового дроту плазовим струменем, а також структурно-фазові перетворення, що відбуваються під час його нагрівання з алюмінієвих або карбідних наповнювачами. Показано, що в момент плавлення металопорошкового дроту системи Fe–Al на його торці формується розплав, інтегральний хімічний склад якого, залежно від сили струму, відповідає інтерметаліду Fe_3Al або FeAl . У момент відриву краплі з торця дроту її діаметр становить 770–890 мкм, а під час руху у високотемпературному плазовому струмені відбувається її диспергування до розміру 115–145 мкм. Вивчено мікроструктуру та властивості інтерметалідних і металокерамічних гранул, отриманих з металопорошкових дрітів. Встановлено, що отримані гранули мають сферичну форму з коефіцієнтом сферичності не менше 0,85. Показано, що на вміст алюмінідів заліза впливає середовище розпилення.

Вивчено вплив тугоплавких наномодифікаторів на розмір металокерамічних гранул.

У шостому розділі вивчено закономірності формування металокерамічних та інтерметалідних покриттів за умов дозвукового та надзвукового режимів плазмо-дугового напилення. Показано, що формування інтерметалідних покриттів відбувається із повністю розплавлених частинок порошку. Встановлено, що металокерамічні покриття системи TiAl–НТС, отримані за дозвукового режиму витікання плазового струменя, характеризуються пористістю 12–40 %, тоді як при надзвуковому режимі пористість не перевищує 4 %.

Вивчено вплив сили струму, витрати плазмоутворювального газу та дистанції напилення на фазовий склад і структуру покриттів, отриманих при високошвидкісному плазмо-дуговому розпиленні металопорошкових дрітів, а також оптимізовано режим напилення.

У сьомому розділі наведено результати дослідження властивостей металокерамічних і інтерметалідних покриттів. Представлено технологічну схему отримання інтерметалідних та металокерамічних порошків для плазмо-дугового розпилення, а також результати розрахунків порошкового наповнювача для виготовлення порошкового дроту системи Fe–Al. Наведено модернізацію обладнання для плазмово-дугового розпилення інтерметалідних і металокерамічних матеріалів. Надано результати апробації та впровадження

отриманих наукових результатів при виготовленні металокерамічних та інтерметалідних покриттів і сферичних гранул.

У висновках відображені основні результати дисертаційної роботи.

У додатках представлено: результати комп'ютерного моделювання параметрів плазмового струменя та процесу плазмо-дугового розпилення частинок порошку; характеристики інтерметалідних покриттів системи Fe-Al, отриманих із МХС порошків; властивості розроблених металокерамічних і інтерметалідних покриттів; технічні умови на розробленні порошки та металопорошкові дроти для плазмо-дугового розпилення; акти впровадження розроблених матеріалів; список публікацій за темою дисертації ованих наукових праць.

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

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечено такими чинниками:

- використанням у роботі праць визнаних учених і фахівців у галузі прикладного матеріалознавства;

- застосуванням апробованих методів і методик дослідження, зокрема: оптичної та електронної мікроскопії, рентгеноструктурного й мікрорентгеноспектрального аналізу, комп'ютерно-вимірювального аналізу, а також методів статистичної обробки й аналізу експериментальних результатів;

- значним обсягом експериментальних даних, отриманих у результаті проведення прямих досліджень;

- наявністю публікацій у фахових наукових виданнях і апробацією основних результатів роботи на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях.

Наукові положення, висновки і рекомендації узгоджуються з існуючими концепціями.

Таким чином, основні результати представленого наукового дослідження є достовірними та обґрунтованими, що підтверджується великим обсягом проведених досліджень. Наукові положення, висновки і рекомендації, що сформульовані у дисертації, відповідають всім вимогам МОН України щодо дисертаційних робіт.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Запропоновано новий підхід термодинамічних розрахунків у поєднанні з напівемпіричною моделлю Міедема, 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 механо-хімічного синтезу при отриманні

інтерметалідних або композиційних порошків, так і при їх нагріванні в високотемпературному плазмовому струмені.

2. Вперше запропоновано критерій визначення критичного розміру кристалітів $K_{кр}$, що утворюються при обробці мікрметричних 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: $K_{кр}=30...70$ 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 плазмо-дугового напилення, шляхом легування порошків Mg і Ti при їх отриманні в процесі механо-хімічного 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 плазмових струменях та при плазмово-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 визначені технологічні фактори (тепловміст, швидкість плазмового струменя, відносна тривалість процесу перебування в ньому частинок) процесу плазмо-дугового напилення покриттів із металокерамічних порошків системи «TiAl-безкисневі тугоплавкі сполуки», що були отримані методом механо-хімічного синтезу. На їх основі здійснено вибір оптимальних інтервалів технологічних режимів, які забезпечують формування покриттів з комплексом заданих характеристик (нанокристалічна структура, пористість <1...4%, 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, B₄C, Cr₃C₂) та протікання структурно-фазових перетворень в металопорошкових дротах систем Fe-WC, Fe-B₄C, Fe-Cr₃C₂, Fe-Al-Cr₃C₂ в процесі їх нагріву і розпилення плазмовими 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 дрітків. 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).

Наукова новизна сформульована зрозуміло, з розкриттям суті.

Практичне значення роботи.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці нових марок порошків та металопорошкових дротів для нанесення захисних покриттів методом плазово-дугового розпилення. Такі покриття вирізняються високою стійкістю до газоабразивного й абразивного зношування, корозії за підвищених температур, а також забезпечують можливість виготовлення сферичних гранул для 3D-друку.

Розроблено плазмотрони нового типу, що дозволило підвищити продуктивність процесу до 18 кг/год, забезпечити формування покриття з пористістю менше 1% і ступенем сферичності гранул більше 0,86.

Повнота викладу основних результатів роботи в наукових фахових виданнях.

Основні результати досліджень дисертації опубліковані в 44 наукових працях, у тому числі 22 статті у наукових фахових виданнях (15 – у журналах, що входять до переліку наукових фахових видань МОН України; 5 статей у виданнях, включених до категорії “А” або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus; 2 – в іноземних наукових фахових виданнях); 2 патенти на винахід; 20 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, які в достатній мірі висвітлюють результати роботи, що виносяться на захист.

Результати досліджень, що були одержані при виконанні кандидатської дисертації «Розробка технології одержання порошків з квазі- або нанокристалічними фазами методом механічного легування» (2015 р.) у представленій докторській дисертації не використовуються.

Зауваження та коментарі до дисертації:

1. Незрозуміло вибір швидкості отримання порошків методом механохімічного синтезу. Для інтерметалідних порошків – 1500 об/хв, а для металокерамічних – 900 об/хв.
2. У таблиці 3.5 зазначено, що після 5 годин обробки порошку складу $45\text{Fe}+55\text{Al}$ утворюються фази FeAl та Fe_2Al_3 . Натомість у таблиці 3.16 для того ж складу й часу обробки наведено наявність фаз Fe , Al та Fe_2Al_3 .
3. У розділі 6 наведено результати розрахунків залишкових напружень на межі «основа–покриття» залежно від типу покриття. Проте не зазначено, чи ці результати підтверджено експериментально.
4. У таблиці 3.16 наведено характеристики порошкових сумішей $\text{Fe}+\text{Al}$, проте в подальших розділах відсутні результати їх дослідження або застосування. Зокрема, не зазначено, чи використовувалися ці суміші для

напилення. Доцільно уточнити роль цих сумішей у дослідженні: чи проводилися з ними експерименти з напилення, чи використовувалися лише для порівняльного аналізу, або ж їх застосування не планувалося.

Загальний висновок.

Однак відзначені недоліки та зауваження не зменшують загального високого рівня роботи та цінності отриманих результатів.

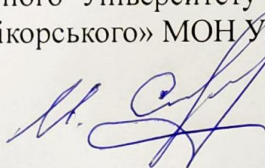
Дисертаційна робота містить наукові положення, які раніше не були захищені, і нові науково-обґрунтовані результати досліджень відповідають паспорту спеціальності 05.02.01 – Матеріалознавство, як за формулою спеціальності, так і за напрямками досліджень.

За обсягом виконаних досліджень, їх новизною, науковою та практичною значимістю одержаних результатів та їх рівнем представлена робота відповідає вимогам п.п. 7 та 9 Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук, затвердженою постановою № 1197 Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року щодо докторських дисертацій, а її автор Бурлаченко Олексій Миколайович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент

Професор кафедри зварювального виробництва, НН ІМЗ ім. ЄО. Патона, Національного технічного Університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України

Д.т.н., проф.



Ігор СМІРНОВ

