



Бурлаченко
Олексій Миколайович

УДК 621.762.669.1:УДК 621.793.74

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В МЕТАЛОКЕРАМІЧНИХ ТА
ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ ПОРОШКАХ І МЕТАЛОПОРОШКОВИХ ДРОТАХ В
ПРОЦЕСІ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО РОЗПИЛЕННЯ ТА ФОРМУВАННЯ
ПОКРИТТІВ**

Спеціальність – 05.02.01
«Матеріалознавство»

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2025

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Науковий консультант: член-кореспондент НАН України,
доктор технічних наук, професор,
Коржик Володимир Миколайович
завідувач відділу Електротермічних процесів обробки
матеріалів Інституту електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, **Студент Михайло Михайлович**, провідний науковий співробітник відділу
Матеріалознавчих основ інженерії поверхні Фізико-
механічного Інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

доктор технічних наук, професор, **Смирнов Ігор Володимирович**, професор кафедри Зварювального
виробництва Національного Технічного Університету
України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря
Сікорського».

доктор технічних наук, доцент, **Стороженко Марина Сергіївна**, завідувач відділу Міжнародних зв'язків та
трансферу технологій Інституту проблем
матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

Захист відбудеться « 11 » червня 2025 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01 при Інституті електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ, вул. Казимира
Малевича, 11.

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Інституту
електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України за адресою: 03150, м. Київ,
вул. Казимира Малевича, 11. Електронні версії матеріалів дисертації розміщено на
офіційному вебсайті Інституту: <https://paton.org.ua/zaxist-disertacii/>

Автореферат розісланий « 7 » травня 2025 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради Д 26.182.01
доктор технічних наук



Олег МАХНЕНКО

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розвиток сучасної промисловості в передових країнах світу пов'язаний з розробкою нових типів матеріалів, що дозволяє підвищити надійність устаткування та зменшити витрати ресурсів та енергії. Рішення цієї задачі можливе завдяки формуванню на поверхнях деталей захисних багатофункціональних покриттів, які характеризуються підвищеними значеннями твердості, жаро-, зносо-, корозійної стійкості методами газотермічного напилення. Іншою важливою тенденцією розвитку промисловості є застосування адитивних технологій (АТ), що вимагає створення гранульних матеріалів з підвищеним коефіцієнтом сферичності частинок. До матеріалів з комплексом унікальних фізико-хімічних і механічних властивостей відносяться інтерметалідні та металокерамічні сплави.

Кермети – металокерамічні гетерогенні композиційні матеріали з відносно малою взаємною розчинністю фаз. Основною вимогою до керметів є хімічна стабільність і можливість утворення зв'язку на межі фаз. В керметах найчастіше використовуються оксиди, карбіди, бориди та нітриди тугоплавких металів як керамічні фази, а в якості металевої фази – метали групи заліза або тугоплавкі метали – ванадій, молібден, вольфрам, ніобій і тантал. Кермети характеризуються високими значеннями жароміцності, зносостійкості, корозійної стійкості зі спеціальними електрофізичними властивостями.

Інтерес до інтерметалідних сплавів обумовлений їхньою можливістю використовуватися при підвищених температурах, зокрема в агресивних середовищах, таких як сірковмісні. Основні експлуатаційні характеристики таких сплавів вищі, ніж у жароміцних нікелевих сплавів, що робить їх одними з основних кандидатів для використання в таких галузях промисловості як авіакосмічна, нафтогазова, енергетична, машинобудування та ін. Основним недоліком цих сплавів є низька пластичність та опір до удару при кімнатній температурі, а також недостатній опір повзучості в умовах помірних температур. Це ускладнює отримання виробів з них традиційними металургійними способами (лиття, кування, прокатка) та обмежує області їх практичного застосування.

Розширення областей практичного використання інтерметалідних та металокерамічних матеріалів можливе завдяки їхньому використанню в таких галузях промисловості, як адитивні технології та багатофункціональні захисні покриття на поверхнях деталей, отриманих методом газотермічного напилення. Ефективність їх використання значною мірою залежить від структури, фазового, гранулометричного та хімічного складу гранульних матеріалів та покриттів.

Серед сучасних методів газотермічного напилення захисних покриттів особливу увагу заслуговує технологія плазово-дугового напилення (ПДН). Ця технологія, окрім формування на поверхні деталей захисного шару покриття із розплавлених частинок порошку заданого хімічного складу, також дозволяє отримувати гранули з підвищеним ступенем сферичності. Суттєвий внесок в дослідження процесу ПДН покриттів зробили як вітчизняні вчені (Борисов Ю. С., Коржик В.М., Петров С. В., Уманський О.П. та інші), так і низка закордонних дослідників.

Ефективність плазово-дугової технології значною мірою залежить від структури, фазового та хімічного складу вихідних матеріалів. Для прогнозування процесів сфероїдизації частинок порошку та формування інтерметалідних та

металокерамічних покриттів при ПДН необхідне розуміння фізико-хімічних процесів, що протікають у напилюваних частинках при її знаходженні у високотемпературному газовому струмені та в контактній зоні, вплив на неї газодинамічних та теплових процесів, адгезійно-когезійні зв'язки між затверділими частинками.

Таким чином, з метою створення технології отримання інтерметалідних та металокерамічних гранульних матеріалів з високим ступенем сферичності, а також для нанесення на поверхню деталей захисного шару покриття, які б відповідали сучасним вимогам експлуатації, необхідне вивчення окремих аспектів плазмово-дугового розпилення (ПДР) інтерметалідних та металокерамічних матеріалів. 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.

Зв'язок дисертації з науковими програмами.

Робота виконана в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, відповідно до планів науково-дослідних робіт, у яких автор приймав участь як виконавець, за такими держбюджетними тематиками: «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 нанокompозитною структурою для захисту поверхні Al- і Ti-сплавів від зношування і високотемпературної корозії» (№ДР 0118U100492, 2019-2021).

Мета роботи та задачі досліджень.

Мета роботи – встановлення закономірностей протікання структурно-фазових перетворень в складових композиційних порошків та металопорошкових дротів систем «метал-метал» та «метал - безкиснева тугоплавка сполука» в процесі їх отримання або обробки в плазмових струменях і на їх основі створення наукових і технологічних засад отримання функціональних інтерметалідних та металокерамічних гранульних матеріалів і захисних покриттів з заданими характеристиками твердості, жаро-, зносо- та корозійної стійкості.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні наукові та практичні завдання дослідження:

- визначити механізми, термодинамічні, кінетичні аспекти взаємодії компонентів при механохімічному синтезі металокерамічних та інтерметалідних порошків, а також при їх обробці в високотемпературних струменях в умовах ПДН;

- на основі математичного моделювання виконати прогнозування та експериментально дослідити процеси сфероїдизації дисперсних-крапель частинок при ПДР металокерамічних та інтерметалідних порошків та порошкових дротів, розробити технологічні основи управління гранулометричним складом отриманих сферичних гранульних матеріалів та мікроструктурою нанесених покриттів;

- визначити основні технологічні фактори ПДН, що впливають на структуру, фазовий склад і властивості покриттів із порошків та металопорошкових дротів із металокерамічними складовими;

- провести матеріалознавчий аналіз багатокомпонентних систем з участю заліза і алюмінію, розробити вміст порошків та металопорошкових дротів для отримання гранульних жаростійких матеріалів та покриттів інтерметалідного типу в умовах ПДН;

- дослідити процеси формування покриттів з порошків і металопорошкових дротів на основі інтерметалідних систем, в залежності від характеристик вихідних матеріалів та методів і режимів ПДН, розробити підходи до управління структурою та властивостями отриманих гранул та покриттів;

- розробити практичні технології та обладнання для отримання методами ПДР гранульних матеріалів і нанесення захисних покриттів з підвищеними значеннями твердості, жаро-, зносо-, корозійної стійкості, здійснити їх апробацію для виготовлення методами 3D друку об'ємних тривимірних виробів та для підвищення довговічності відповідальних вузлів і конструкцій, що працюють в умовах підвищених температурних навантажень, високотемпературної корозії та зношування.

Об'єкт дослідження – металокерамічні та інтерметалідні гранульні дисперсні матеріали і функціональні покриття, отримані за допомогою плазмово-дугової технології, процеси отримання методом плазмово-дугового розпилення металокерамічних та інтерметалідних гранул і покриттів.

Предмет дослідження - закономірності впливу ПДР, технологічних режимів на структуру та фазові перетворення в металокерамічних та інтерметалідних порошках, металопорошкових дротах та формування покриттів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань використовували теоретичні та експериментальні методи дослідження. Порошкові матеріали отримували механохімічним синтезом. Плазмово-дугова сфероїдизація дисперсних і дровових матеріалів та напилення покриттів проводились за допомогою універсальної установки. Дослідження властивостей порошків та покриттів здійснювали з застосуванням стандартних методик металографічних, рентгенофазних, дюрOMETричних і диференціально-термічних (ДТА) досліджень. Отримані експериментальні дані обробляли з використанням статистичних методів.

Наукова новизна отриманих результатів

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 плазмовому 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: $K_{кр}=30...70$ 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 плазмово-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 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 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 $< 1...4\%$, 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 Fe₃Al до FeAl).

Практичне значення одержаних результатів. На підставі проведених досліджень розроблено технологічні процеси отримання порошків інтерметалідних та металокерамічних порошків систем Fe–Al та TiAl–HTC методом механохімічного синтезу, що включають операції термодинамічні розрахунки з метою вибору складу вихідних порошкових сумішей, підготовка шихти, її обробка у високоенергетичному планетарному шаровому млині та конгломерування отриманих порошків, що забезпечує формування наноструктурних порошків із розмірами кристалітів 4–11,7 нм та технологічними властивостями, які дозволяють їх використання в якості вихідних матеріалів для ПДР з метою отримання багатофункціональних покриттів та сферичних гранул для 3D друку.

Розроблено оптимальний хімічний склад композиційних металопорошкових дротів систем Fe–Al з порошковими наповнювачами на основі алюмінію та дротів із сталеву оболонкою з сердечником із керамічних B_4C , Cr_3C_2 , WC з нанорозмірними модифікаторами із тугоплавких сполук.

Створено новий плазмотрон із мідним пустотілим електродом для ПДН покриттів із композиційних інтерметалідних та металокерамічних порошків та отримання із них сферичних гранул для 3D друку. Такий плазмотрон забезпечує більш широкі можливості регулювання швидкості високотемпературного плазмового струменя при надзвукових режимах його витікання, універсальність у використанні різних типів плазмоутворюючих газів в широких межах регулювання ентальпії плазми для забезпечення розплавлення тугоплавких компонентів порошків з їх подальшим надшвидким охолодженням розплавлених часток для формуванням аморфної або нанокристалічної структури.

Розроблено установку нового покоління для плазово-дугового нанесення покриттів і розпилення струмопровідних дрових матеріалів, особливістю якої є застосування плазмотрону із підвищеним струмовим навантаженням, із оптимізованими геометричними параметрами газорозрядної камери, сопла та систем обдуву плазмового струменю супутнім потоком газу, що дозволило підвищити ефективність нагріву металопорошкового дроту діаметром до 2,4 мм з наповнювачами із порошків тугоплавких сполук безкисневої кераміки, збільшити продуктивність процесу розпилення від 12 до 18 кг/год та отримувати високоякісні покриття з пористістю менше 1 %.

Розроблено дослідно-промислове обладнання для плазово-дугової сфероїдизації інтерметалідних і металокерамічних порошків неправильної форми та розпилення металопорошкових дротів із керамічними порошковими наповнювачами з камерою з захисною атмосферою із газовою протитечею, яка дозволяє отримувати гранули в інтервалі 10–160 мкм з коефіцієнтом сферичності $>0,86$.

На прикладі сферичних гранул, отриманих за допомогою такого обладнання із металопорошкового дроту з інтегральним хімічним складом, який відповідає інтерметаліду Fe_3Al , підтверджено перспективність їх використання в якості матеріалів для 3D друку об'ємних зразків методами адитивного лазерного наплавлення (Direct Energy Deposition – DED) і селективного лазерного плавлення SLM (Selective Laser Melting).

Розроблені рекомендації для промислового використання двох технологій ПДН покриттів із металопорошкових дротів Fe–Al для захисту труб пароперегрівачів

сміттєспалювального обладнання від високотемпературної корозії та газоабразивного (зольного) зношування.

Результати роботи впроваджені на підприємстві ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) при організації промислового виробництва плазмово-дугової установки «PLAZER 50–PL–W», яка використовується в технологічних процесах отримання із дротових композиційних матеріалів (КМ) сферичних дрібнодисперсних гранул та нанесення захисних та спеціальних покриттів.

Особистий внесок автора. В дисертаційній роботі постановка і обґрунтування завдання досліджень, обрання наукових підходів і методів, аналіз і узагальнення отриманих експериментальних даних, формулювання наукової новизни, висновків і рекомендацій здійснено безпосередньо автором. Наукові і практичні положення, що винесені на захист дисертаційної роботи, отримані автором самостійно або в співавторстві у відповідності до наведеного списку опублікованих наукових праць. Основні результати роботи одержано здобувачем самостійно. При проведенні досліджень, результати яких опубліковано у співавторстві, автору належить постановка завдання досліджень, аналіз і узагальнення літературних джерел та отриманих результатів, формулювання висновків. У роботах, які було опубліковано у співавторстві, здобувачем виконано наступне: у [2, 4, 9, 12, 25, 29, 33–35, 40] - ідея та обґрунтування концепції експериментів, аналіз експериментальних даних, аналіз і узагальнення літературних даних, підготовка рукописів публікацій; у [7, 8, 17, 26–28, 32, 36] – аналіз літературних даних, формулювання висновків, підготовка рукописів статей; у [15, 16, 24, 39] – матеріалознавчий аналіз, обґрунтування вибору складу порошкової шихти, проведення і узагальнення експериментальних даних, підготовка рукописів публікацій; у [1, 6, 10, 11, 14, 21–23, 30, 31, 43, 44] - аналіз і узагальнення впливу режимів напilenня на властивості отриманих матеріалів, підготовка рукописів статей; у [3, 5, 13, 18, 19, 20, 37, 38, 41, 42] - підготовка та проведення експериментальних робіт з отримання порошків для ПДН та сферичних гранул, аналіз одержаних результатів, підготовка рукописів публікацій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи представлені та обговорені на всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях, зокрема на: Міжнародних конференціях «Зварювання та Споріднені Технології - Сьогодення і Майбутнє» (2018 pp., Київ, Україна); 6th International Conference «HighMathTech». (October 28–30, 2019, Kyiv, Ukraine); Міжнародній науковій конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 9» (18–19 грудня 2019, Київ, Україна); XI міжнародній науково-практичній конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (26–27 травня 2021, Чернігів, Україна); 21-й міжнародній науково-практичній конференції «Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика» (06–10 вересня 2021, Одеса, Україна); Міжнародній науково-практичній конференції «European Academy of Science and Research» (January 16, 2022, Hamburg, Germany); VII International scientific and practical conference «Science, innovations and education: problems and prospects» (February 9–11, 2022, Tokyo, Japan); Наукові конференції «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України» (17 листопада 2022, Київ, Україна); Науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку адитивних технологій» (27 листопада 2023, Київ, Україна); 8th International Materials Science Conference

HighMatTech-2023 (October 2-6, 2023 Kyiv, Ukraine); International Samsonov Conference «Materials Science of Refractory Compounds» (May, 2014, 2018, Kyiv, Ukraine); 5th International Conference on Materials Design and Applications (July 4-5, 2024, Porto, Portugal); Міжнародній конференції «Зварювання та споріднені технології» (WRT 2024) (7-10 жовтня 2024, Яремче, Україна).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 44 наукових праць, 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” Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus видання, що входять до наукометричних баз даних Scopus або Web of Science; 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.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел з 371 найменувань на 40 сторінках. 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, 13 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета роботи та завдання досліджень, описані об'єкт, предмет і методи досліджень, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про апробацію результатів роботи, публікації по темі дисертації із зазначенням власного внеску автора, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянуто сучасний стан і тенденції розвитку отримання матеріалів для нанесення металокерамічних та інтерметалідних покриттів методом газотермічного напилення та перспективи отримання із них сферичних дисперсних гранул в якості матеріалів для 3D-друку об'ємних виробів із комплексом спеціальних фізико-механічних і хімічних властивостей.

Для оцінки сучасного стану проблеми створення конструкції шару захисного покриття, що забезпечує його високу ефективність у поєднанні з довговічністю, було проведено аналіз літературних джерел, що містять виклад теоретичних підходів та досвіду експериментальних робіт у цій галузі.

На сьогодні основним завданням інженерії поверхні є розробка покриттів, які забезпечують захист деталей і вузлів техніки в умовах підвищених робочих температур і механічних навантажень, впливу агресивних середовищ. До одного з класів матеріалів, що характеризуються комплексом фізичних, механічних та корозійних властивостей, наприклад, висока температура плавлення, висока теплопровідність, мала питома вага, високе відношення міцності до щільності, опір окисненню при високих температурах, відносяться інтерметалідні сплави алюмінідів перехідних металів (Ni, Fe, Ti). Серед інтерметалідів особлива увага приділяється алюмінідам системи Fe-Al, які розглядаються як заміна жароміцних нікелевих сплавів, конкурентоспроможність щодо яких їм забезпечує доступність та відносна

дешевизна базового компонента заліза. До іншого класу матеріалів, які характеризуються високими значеннями жаростійкості, зносостійкості, корозійної стійкості, а також комплексом унікальних електрофізичних властивостей, з відносно невеликою взаємною розчинністю фаз, належать металокерамічні композитні матеріали (кермети). Основною вимогою до отримання керметних порошків є хімічна стійкість і можливість формування зв'язків на границі фаз. В якості керамічної фази в керметах найчастіше використовуються оксиди, карбіди, бориди, нітриди металів. Такі матеріали знайшли широке практичне застосування як захисні покриття, отримані методами плазово-дугового (ПДН) напилення при до- і надзвукових режимах витікання плазового струменя, а також іншими методами, які відносяться до групи технологій газотермічного напилення (надзвукового газополуменевого напилення або HVOF-High-Velocity Oxygen Fuel та детонаційно-газового напилення). Під час руху в частинках напилюваного матеріалу відбуваються такі явища як дисперсія, коагуляція, зміна мікроструктури та фазового складу. Проаналізовано залежність структури та властивості покриттів від температурного стану і розплавлення частинок порошку в умовах плазового напилення, що, в свою чергу, залежить від характеристик плазового струменя (швидкість і температура, в'язкість і теплопровідність газового середовища, ступінь дисоціації та іонізації молекул газу) і властивостей матеріалу розпилюваних частинок (щільність, теплоємність, теплопровідність, теплота плавлення). Виявлення вказаних закономірностей особливо важливо в процесах плазово-дугової обробки дисперсних інтерметалідних та металокерамічних матеріалів.

Підвищені фізико-хімічні та механічні властивості, характерні для інтерметалідних та металокерамічних матеріалів, відкривають значні перспективи та потребу для їх використання в якості матеріалів для 3D-друку об'ємних виробів із спеціальними експлуатаційними характеристиками. При цьому використання адитивних технологій (металевих виробів) для створення сучасних виробів з підвищеними експлуатаційними та технологічними властивостями вимагає створення матеріалів у вигляді гранул з інтерметалідних та металокерамічних матеріалів із підвищеними вимогами до коефіцієнту сферичності форми.

Одним зі способів отримання композиційних інтерметалідних та металокерамічних порошків, який реалізується в умовах високоенергетичної обробки сумішей порошків у кульових планетарних або вібраційних млинах та характеризується широкими технологічними можливостями з погляду на управління структурою, хімічним і фазовим складом, технологічними властивостями порошків, є метод механохімічного синтезу (МХС). Активні роботи у напрямку дослідження механічних характеристик інтерметалідних покриттів проводяться в University of Neuchatel (Швейцарія), CENIM (Іспанія) та CIRIMAT (Франція), металокерамічних в University of Pittsburgh, Lockheed Missiles and Space Co. і General Electric Aircraft Engines, NASA Lewis Research Center (США).

Проте на сьогодні спостерігається недостатня кількість або відсутність результатів досліджень: процесів формування металокерамічних та інтерметалідних покриттів в процесі ПДР порошків, які отримано методом механохімічного синтезу; формування інтерметалідних покриттів при ПДН металопорошкових дротів; процес отримання сфероїдизованих порошків методом ПДР та їх використання для 3D-друку

майже не досліджено. Із врахуванням необхідності в виконанні таких досліджень сформульовані мета і задачі роботи.

У другому розділі наведено характеристики вихідних матеріалів для отримання інтерметалідних та металокерамічних порошків, устаткування для виготовлення порошків методом механохімічного синтезу та лабораторне обладнання для газотермічного напилення для сфероїдизації порошків та нанесення покриттів. Наведено методика досліджень властивостей сфероїдизованих порошків отриманих розпиленням порошків та порошкових дрітів.



Рис. 1. Планетарний млин «Активатор-2SL»

Досліджували такі вихідні матеріали: для отримання інтерметалідних порошків системи Fe-Al були вибрані порошки простих елементів (заліза, алюмінію); для отримання легованих інтерметалідних порошків на основі Fe_3Al – алюмінієві сплави (TiAl, Al-5Mg); для отримання керметних порошків в якості металевої матриці використовувалися порошки сплавів TiAl, а тугоплавких включень – B_4C , h-BN, SiC, Si_3N_4 .

Порошкові матеріали виготовляли методом механохімічного синтезу на лабораторному високоенергетичному планетарному шаровому млині «Активатор-2SL» (рис. 1).

Експериментальні дослідження процесів сфероїдизації та нанесення покриттів проводились на дослідницькому обладнанні Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Розмір і температура частинок визначались згідно схеми представленій на рис. 2.

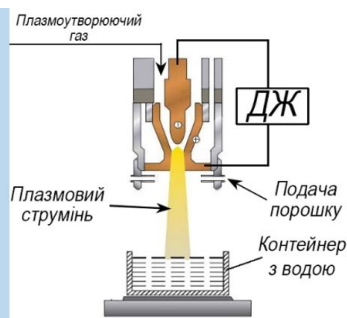
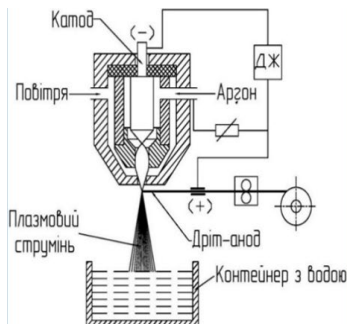


Рис. 2. Схема дослідів по розпиленню порошкових матеріалів і дроту в калориметр для визначення температури і гранулометричного складу гранул.

Теплоємність частинок, що потрапили разом з плазмовим потоком в калориметр визначали за наступним рівнянням:

$$H - H_0 = (m_{\text{с}} \cdot c_{\text{с}} + m_{\text{г}} \cdot c_{\text{г}}) \cdot \Delta t,$$

де H – ентальпія металу при розглянутій температурі, кДж;

H_0 – ентальпія металу при кімнатній температурі, кДж;

$Q_k = (m_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} + m_{\text{с}} \cdot c_{\text{с}}) \Delta t$, – кількість теплоти, яка надійшла в калориметр, кДж.

Коефіцієнт сферичності отриманих гранул $S_{\text{с}}$ визначали за формулою:

$$S_{\text{с}} = \frac{D_{\text{е}}}{D_0},$$

де $D_{\text{е}}$ – еквівалентний діаметр гранули; D_0 – діаметр, що описується.

Розмір кристалітів в досліджуваних матеріалах оцінювали з використанням формули Дебая-Шеррера:

$$d = \frac{k \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos \theta},$$

де d – середній розмір областей когерентного розсіювання (доменів, кристалітів), який може бути меншим або рівним розміру зерна; K – безрозмірний коефіцієнт форми частинок (постійна Шеррера); λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання; β – ширина рефлексу на піввисоті (у радіанах та в одиницях 2θ); θ – кут дифракції (брегівський кут).

Використовували стандартні методики дослідження мікроструктури та фазового складу, визначення мікротвердості, міцності зчеплення покриттів з основою, корозійних досліджень та випробувань на зносостійкість в умовах газоабразивного і абразивного зношування.

Третій розділ присвячено розробці технологій отримання металокерамічних та інтерметалідних порошків методом механохімічного синтезу.

Виконано матеріалознавчий аналіз діаграм фазової рівноваги багатокомпонентних інтерметалідних систем на основі алюмініду заліза та алюмініду титану TiAl з неметалевими тугоплавкими сполуками (B_4C , BN, SiC, Si_3N_4) та металокерамічної системи за участю феросплаву та включень тугоплавких сполук.

Під час розробки складу композиційних порошків особлива увага приділяється оцінці ймовірного перебігу передбачуваних реакцій у процесі МХС. Визначити це можна за допомогою термодинамічної оцінки міжфазної взаємодії компонентів в металокерамічних та інтерметалідних сумішах. Температурну залежність зміни енергії Гіббса для систем «Fe-Al» наведено на рис. 3а.

Розрахунок термодинамічних параметрів у багатокомпонентних системах «TiAl-неметалеві тугоплавкі сполуки» зводиться до розгляду в системі окремих реакцій та вибору тих, перебіг яких є найімовірнішим.

У системах за участю TiAl та неметалічних тугоплавких сполук (B_4C , BN, SiC та Si_3N_4) розглядали такі типи реакцій:

- утворення суміші, що складається з карбідних та боридних фаз титану або алюмінію;
- утворення суміші, що складається з боридних та нітридних фаз титану або алюмінію;
- утворення суміші, що складається з карбідних фаз титану або алюмінію та силіцидних фаз титану;
- утворення суміші, що складається з нітридних фаз титану або алюмінію та силіцидних фаз титану;
- утворення суміші, що складається з тугоплавких сполук на основі карбідів, боридів, силіцидів та нітридів титану або алюмінію та виділенням вільного елемента (бору, вуглецю, кремнію, азоту).

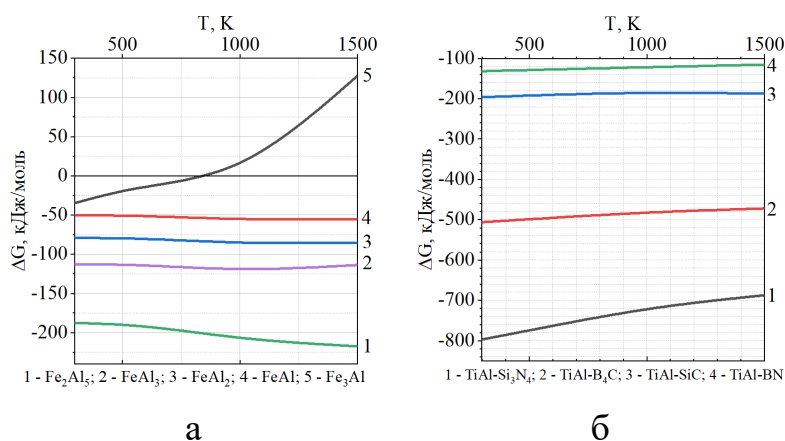


Рис. 3. Температурна залежність зміни енергії Гіббса в системах: а – Fe-Al; б – Ti-Al (1 – TiAl; 2 – TiAl₃)

Процес утворення інтерметалідних і керамічних (карбідних, боридних, нітридних, силіцидних та ін.) сполук в основному є екзотермічним і проходить в режимі самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС). Вірогідність проходження в процесі МХС реакцій у режимі СВС можлива у випадку, коли значення $T_{ад} \geq 1800 \text{ K}$ чи $\geq 2000 \text{ K}$.

Термодинамічний аналіз найпростіших реакцій взаємодії в інтервалі температур 298–1500 К показав, що:

- взаємодія Ti з неметалевими тугоплавкими сполуками з утворенням сумішей, що складаються з карбіду, бориду, нітриду та силіцидів титану, можливі у всьому температурному інтервалі;
- взаємодія Al з неметалевими тугоплавкими сполуками з утворенням сумішей, що складаються з карбіду, бориду та нітриду алюмінію, також можливі у всьому температурному інтервалі;
- реакції в яких відбувається виділенням вільних елементів (B, Si, C, N₂) для титану можливі або за стандартних умов або у разі їх нагрівання вище певної температури. У випадку з алюмінієм термодинамічно за стандартних умов неможливі реакції в результаті яких відбувається виділення вільного азоту і вуглецю. Реакції з виділенням вільного бору та кремнію можливі лише у разі утворення нітриду алюмінію.

З урахуванням отриманих результатів було обрано можливі продукти реакції в результаті взаємодії TiAl з B₄C, BN, SiC і Si₃N₄ та проаналізовано температурну залежність енергії Гіббса в таких реакціях (табл. 1, рис. 3б).

Таблиця 1 Реакції взаємодії TiAl з неметалічних тугоплавких сполук.

№	Реакція	Температура, К
1.	$9\text{TiAl} + \text{Si}_3\text{N}_4 = \text{TiN} + \text{Ti}_5\text{Si}_3 + 3\text{AlN} + 3\text{TiAl}_2$	3878
2.	$5/2\text{TiAl} + \text{B}_4\text{C} = 3/2\text{TiB}_2 + 1/4\text{TiC} + 1/2\text{AlB}_2 + 1/4\text{Al}_4\text{C}_3 + 1/4\text{TiAl}_2$	2795
3.	$4\text{TiAl} + \text{SiC} = \text{TiC} + 1/3\text{Ti}_5\text{Si}_3 + 4/3\text{TiAl}_3$	1473
4.	$3/4\text{TiAl} + \text{BN} = 1/4\text{TiB}_2 + 1/2\text{TiN} + 1/4\text{AlB}_2 + 1/2\text{AlN}$	1979

Така методика дозволяє визначити термодинамічні параметри стандартних кристалічних структур. Для розрахунків термодинамічних параметрів для твердих розчинів та аморфного стану в бінарних системах Fe-Al та Ti-Al запропоновано теоретичну оцінку на основі методу, заснованого на напівемпіричній моделі Мієдему.

Для аморфного стану при певному складі енергія Гіббса має додатні значення. Це вказує на відсутність рушійної сили для переходу до аморфного стану. З іншого

боку, наявні області, в яких $\Delta G_{\text{аморф.}} < \Delta G_{\text{тв.р-н}}$ може свідчити про можливість переходу сплавів в аморфний стан. Зміна енергії Гіббса для твердого розчину та аморфного стану у системах Fe-Al та Ti-Al представлені на рис. 4.

На рис. 5 приведені рентгенограми вихідної механічної суміші та аморфізованих продуктів у результатів реалізації процесу механохімічного синтезу після обробки в високоенергетичному планетарному шаровому млині протягом 3-х годин.

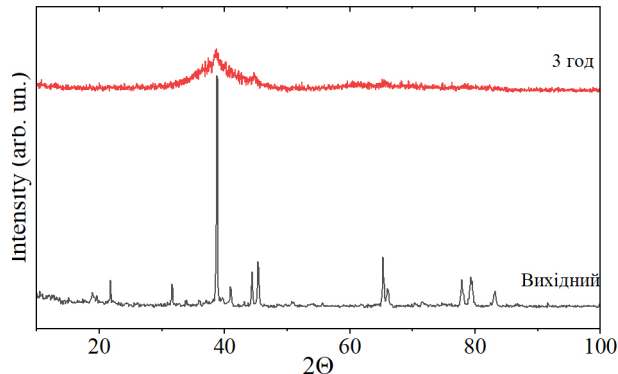
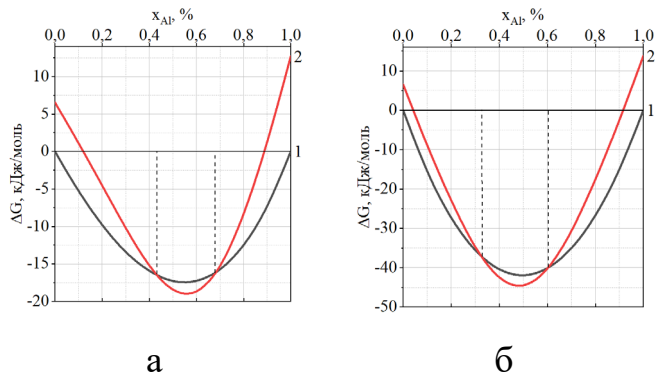


Рис. 4. Зміна енергії Гіббса в системах: а – Fe-Al; б – Ti-Al (1 – твердий розчин; 2 – аморфний стан)

Рис. 5. Рентгенограма вихідного порошку Ti-Al і даного порошку через 3 год. механічної активації

На підставі термодинамічних розрахунків було обрано склад вихідних сумішей порошків для отримання КП для ПДН (табл. 2).

Таблиця 2 – Склади порошкових сумішей для отримання КП (мас.%)

Інтерметалідні суміші системи «Fe-Al»	Металокерамічні суміші системи «TiAl-HTC»
86Fe+14Al; 86Fe+14Al5Mg; 60,8Fe+39,2TiAl	73TiAl+27B ₄ C; 69TiAl+31BN; 88TiAl+12SiC; 83TiAl+17Si ₃ N ₄

Типова схема структурно-фазових перетворень в процесі механохімічного синтезу наведено на прикладі системи Fe-Al (рис. 6).

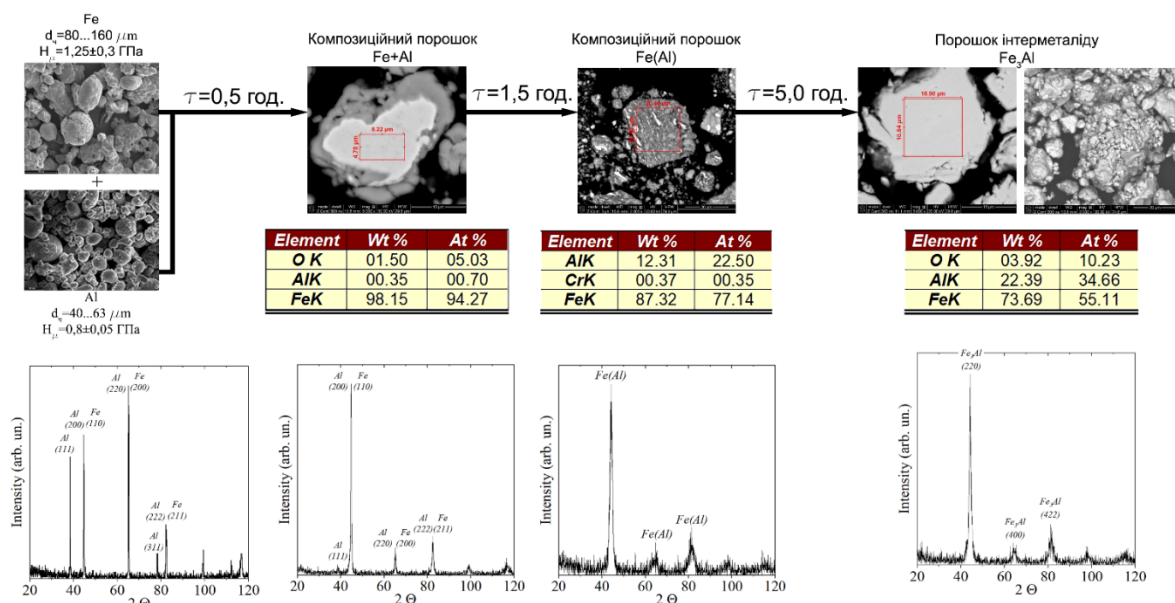


Рис. 6. Схема структурних перетворення в процесі МХС.

В результаті досліджень структурних та фазових перетворень в інтерметалідних та металокерамічних системах у процесі МХС було встановлено оптимальний режим отримання КП, який, з одного боку, забезпечував формування частинок КП з механічних сумішей, з іншого – дозволяв знизити рівень неминучого забруднення продукту залізом (внаслідок намелювання матеріалу стінок барабанів і розмельних тіл) і киснем (в результаті взаємодії із зовнішнім середовищем). Технологічні властивості отриманих порошків наведено в табл. 3.

Таблиця 3 Технологічні властивості металокерамічних та інтерметалідних порошків, отриманих методом МХС

Технологічні властивості		Композиційний порошок						
		Fe ₃ Al	Fe ₃ AlMg	(Fe,Ti) ₃ Al	TiAl-B ₄ C	TiAl-BN	TiAl-SiC	TiAl-Si ₃ N ₄
Розмір кристалітів, нм		7,4	7,3	4	7,3	11,7	7,9	9,2
d ₉₀ , μm		11,2	14,5	8,7	5,1	5,2	4,8	2,6
Насипна щільність, г/см ³	Продукт МХС	2,05	2,12	2,35	1,1	0,67	1,31	1,26
	Конгломерат	1,96	2,0	1,16	1,1	0,75	1,0	0,9
Текучість, г/с	Продукт МХС	Не тече						
	Конгломерат	0,64	0,74	0,55	0,55	0,37	0,52	0,45

Для розроблення технології отримання сферичних гранул і нанесення покриттів із розроблених металокерамічних та інтерметалідних порошків методом ПДН, були отримані конгломератні порошки з розміром частинок 40-80 мкм (рис. 7).

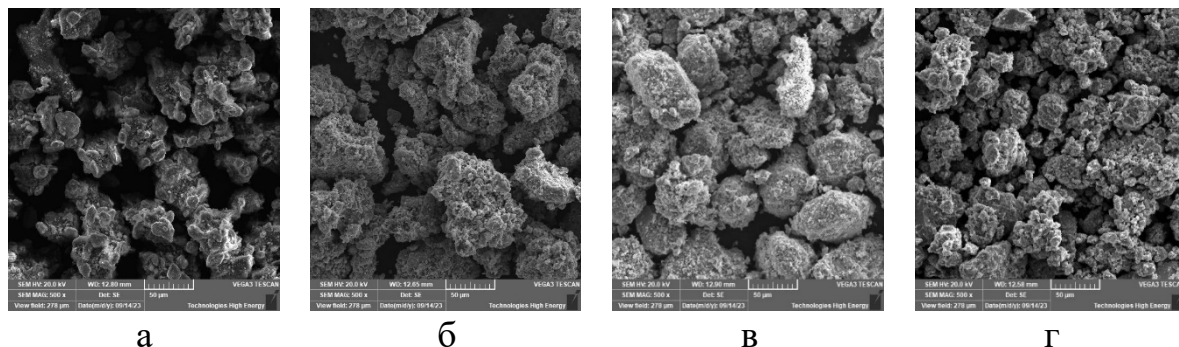


Рис. 7. Зовнішній вигляд конгломератів із металокерамічних порошків, отриманих методом МХС: а) TiAl-B₄C; б) TiAl-BN; в) TiAl-SiC; г) TiAl-Si₃N₄

Четвертий розділ присвячено дослідженню структурних перетворень та сфероїдизації багатокомпонентних металокерамічних та інтерметалідних порошків при їх нагріві та розпиленні плазовими струменями.

Процес формування покриттів при плазовому напиленні залежить від стану частинок у процесі напилення. Енергетичний стан частинок в плазовому потоці залежить від багатьох параметрів. З одного боку, це характеристики самого плазового потоку – його швидкість і температура, в'язкість і теплопровідність газового середовища, ступінь дисоціації та йонізації молекул газу. З іншого боку, це стан, виходячи із загальних закономірностей газодинаміки та теплообміну, визначається такими теплофізичними властивостями матеріалу частинок, як щільність, теплоємність, теплопровідність, теплота плавлення, а також

геометричними факторами – розміром частинок, їх формою.

При напилюванні багатокомпонентних порошкових сумішей, що містять тугоплавкі керамічні та відносно легкоплавкі металеві частинки слід враховувати можливість охолодження при випаровуванні, обумовленого різними температурами.

Мінімальну електричну потужність (у разі аргонового плазмового струменя), необхідну для розплавлення частинок дисперсного матеріалу при русі їх в об'ємі плазмового струменя, можна оцінити виходячи з наступного виразу¹:

$$P_e = I \cdot U \geq 24,4 \cdot \frac{V_z^{1,5} \cdot d_q \cdot D^{0,5}}{\eta_T \cdot R_0 \cdot [l_{вн} + 6 \cdot R_0 \cdot (1 - \varepsilon)^{0,5}]},$$

де, I – струм; U – напруга; V_z – витрата плазмоутворюючого газу; d_q – діаметр частки; D – параметр важкості плавлення; R_0 – радіус сопла аноду; $l_{вн}$ – положення точки введення порошку; ε – відносна відстань траєкторії руху частки від осі струменя ($\varepsilon = R/R_0$).

Параметр важкості плавлення виражає відношення кількості тепла, необхідного для розплавлення одиниці об'єму частинки, до часу перебування частинки в зоні нагріву.

$$D = c_e^2 \cdot \rho \cdot T_{пл}^2,$$

де; ρ – щільність матеріалу; c_e – еквівалентна теплоємність розплаву при $T_{пл}$.

Основні перетворення в частинках порошку при плазмовому напиленні в результаті теплового, динамічного впливу та взаємодії з навколишнім середовищем відбуваються під час руху в струмені плазми протягом часу подолання дистанції напилення. Для з'ясування характеру та механізму цих фазових перетворень, в частинках металокерамічних та інтерметалідних порошків проводилося їх вловлювання з плазмового струменя у воду в умовах, що відповідають параметрам процесу нанесення покриттів.

За результатами аналізу зовнішнього вигляду гранул отриманих ПДР інтерметалідних частинок системи Fe-Al виявлено, що для більшості, вони мають сферичну форму, що вказує на повне розплавлення частинок при проходженні через високотемпературний плазмовий струмінь. В результаті потрапляння частинок під час розпилення у кисневмісні зони плазмового струменя на їх поверхнях розвивається процес окиснення і, під час їх руху у турбулентному плазмовому потоці, оксиди на поверхні частинок набувають куполоподібної форми (рис. 8).

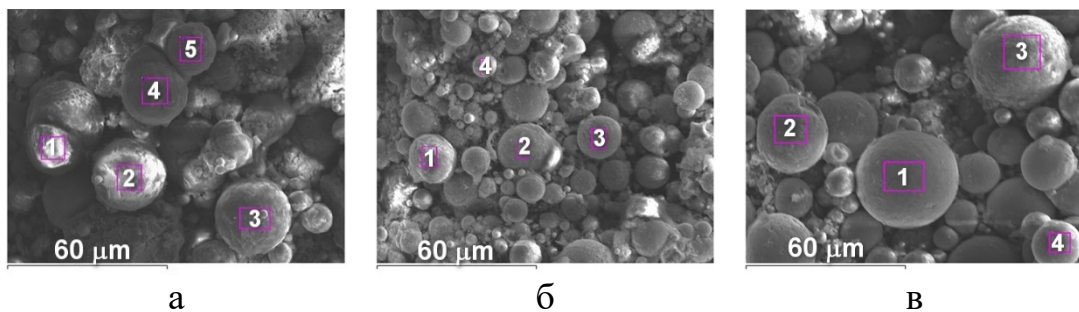
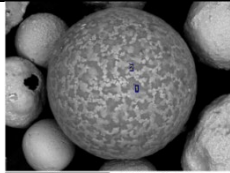
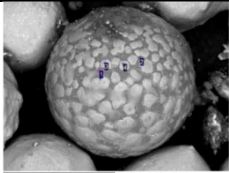
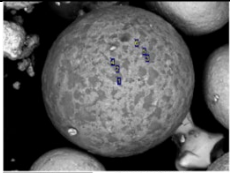
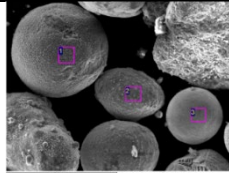


Рис. 8. Зовнішній вигляд інтерметалідних гранул, отриманих в процесі ПДР

Частка сферичних гранул при ПДР металокерамічних порошків залежно від

складу становить 60-70%. При цьому в результаті нагріву і плавлення конгломератів відбувається збільшення розміру кристалітів у 2-3 рази порівняно з вихідними порошками (табл. 3, 4).

Таблиця 4 Характеристики металокерамічних гранул, отриманих ПДР

Склад	73TiAl+27B ₄ C	69TiAl+31BN	88TiAl+12SiC	83TiAl+17Si ₃ N ₄
Зовнішній вигляд				
Фазовий склад	TiB ₂ , TiC, TiAl, AlB ₂ , Ti ₃ AlC, TiO, сліди TiO ₂ , Al ₂ O ₃	TiN, AlB ₂ , TiB ₂ , AlN, TiAl, TiO ₂ , сліди Ti ₃ Al, Al ₂ O ₃	TiAl, TiO, SiC, Ti ₃ Al, Ti ₃ AlC, сліди TiC, Ti ₅ Si ₃	TiN, TiAl, Ti ₅ Si ₃ , Ti ₃ Al, TiO ₂ , сліди TiAl ₂
Розмір кристалітів, нм	27	26,5	25,8	27,8

Серед численних перетворень, що відбуваються з частинками при нагріванні в плазмовому струмені, можливі як зменшення розмірів внаслідок руйнування конгломератів, так і збільшення – внаслідок зіткнення та коагуляції. Дослідження гранулометричного складу порошків, розпилених у воду, проводилося металографічним методом шляхом вимірювання діаметрів частинок на металографічних шліфах за допомогою оптичного мікроскопа (рис. 9). Дослідження гранулометричного складу порошків системи TiAl, вилучених з плазмового струменя, показує, що середній розмір частинок та діапазон їх граничних розмірів зміщується в область вищих значень. Так, наприклад, для систем TiAl-B₄C та TiAl-BN середній розмір частинок збільшується у 8 разів, для систем TiAl-SiC та TiAl-Si₃N₄ – у 13 та 16 разів відповідно. Встановлено, що при перенесенні частинок порошків системи Fe-Al через плазмовий струмінь відбулося збільшення середнього розміру продуктів розпилення у 2-3 рази порівняно з початковими продуктами механохімічного синтезу за рахунок коагуляції окремих частинок. В цьому випадку, збільшення струму від 400 до 500 А призводить до зростання середнього розміру

частинок на 14–47 % за рахунок випаровування дрібних частинок зі збільшенням ступеня їх нагріву.

На основі проведених досліджень визначено параметри плазмового напilenня механічно синтезованих порошків на основі інтерметалідних та металокерамічних матеріалів, на яких утворювалися щільні покриття з тонкопластинчастою структурою.

У п'ятому розділі представлено результати

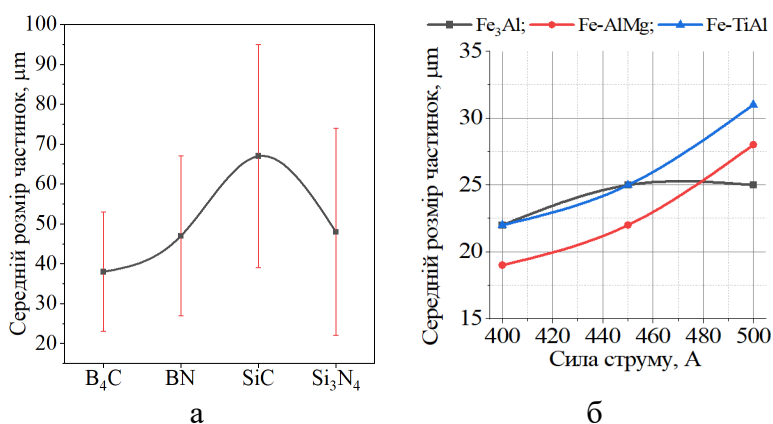


Рис. 9. Зміна середнього розміру отриманих гранул після проходження порошків, отриманих методом МХС через плазмовий струмінь: а - система TiAl-HTC; б – система Fe-Al

дослідження сфероїдизації дисперсних-крапель частинок при ПДР металопорошкових дротів на основі металокерамічних та інтерметалідних систем.

Математичне моделювання значень діаметрів і швидкостей руху рідкої частинки, що формується при диспергуванні металопорошкового дроту, проводили із використанням математичної моделі струминної течії розплавленого металу дроту та формування крапель рідкого металу в супутньому високошвидкісному газовому потоці:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(vF)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + 3v_w \frac{1}{h^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(h^2 \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{2 \cdot \tau_p(v)}{h \cdot \rho_w}, \quad -L_d < z < 0,$$

Аналіз температурних полів в металопорошковому дроті проводився за допомогою системи з двох квазістаціонарних рівнянь в циліндричній системі координат окремо для серцевини і оболонки дроту. На границі «оболонка-серцевина», тепло надходить від оболонки і передається в порошкову серцевину:

$$\chi_p \left. \frac{\partial T_p}{\partial r} \right|_{r=R_p} = \chi_w \left. \frac{\partial T_w}{\partial r} \right|_{r=R_p}.$$

На основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень на прикладі металопорошкового дроту системи Fe-Al діаметром 1,8 мм показано, що при плазово-дуговій сфероїдизації здійснюється множинне дроблення частинок та їх фрагментів, що рухаються у плазовому струмені (рис.10-11). Зокрема, при різних режимах роботи плазмотрона на його торці формуються вихідні краплі, середній діаметр яких знаходиться в діапазоні 730...895 мкм з подальшим диспергуванням до середнього діаметра фрагментів 115...145 мкм.

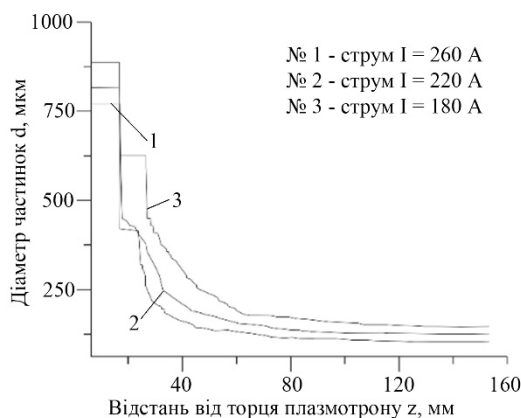


Рис. 10. Зміна середнього діаметру часток (d), що формуються на торці металопорошкового дроту системи Fe-Al в процесі плазово-дугової сфероїдизації в залежності від відстані від торця плазмотрону (z)

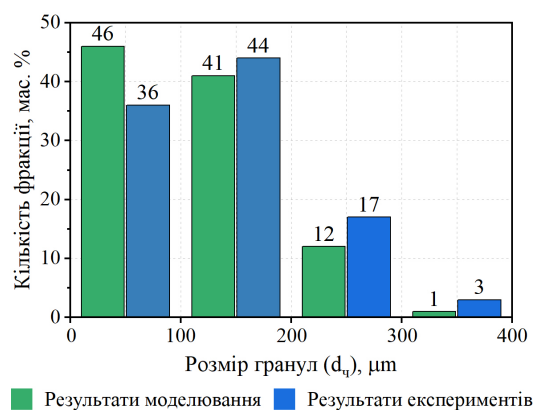


Рис. 11. Гістограма розподілу гранулометричного складу порошку, отриманого при плазово-дуговій сфероїдизації металопорошкового дроту системи Fe-Al при струмі 260 А.

Досліджено порошки алюмінідів заліза, отриманих методом ПДР металопорошкового струмопровідного дроту зі сталеву оболонкою і алюмінієвим наповнювачем. Було проведено експерименти по вивченню впливу технологічних параметрів ПДР, а саме зміни сили струму плазмотрона (180, 220 та 260 А), на фазову взаємодію компонентів при плавленні дроту. Аналіз зовнішнього вигляду й гранулометричного складу гранул, отриманих при ПДР досліджуваного порошкового

дроту-аноду на повітрі та з використанням захисної насадки з аргонною атмосферою дозволяє говорити про те, що основна маса розпиленних гранул має сферичну форму, що свідчить про їхнє розплавлення та наступну сфероїдизацію на шляху від зони нагріву до місця їх збору (рис. 12). Іноді реєструються округлі частки, гантелеподібної та подовженої форми (~5% мас.). Кількість їх змінюється залежно від фракції порошку та сили струму плазмотрона. Так, зі зменшенням фракції порошку сферичність частинок зростає. Найбільша кількість несферичних частинок спостерігається на всіх режимах розпилення у фракції порошку -315+200 мкм і становить 7...12%. У фракціях -200+100 і -100+75 мкм їх кількість зменшується і становить 5 і 4% відповідно.

В процесі ПДР відбуваються металургійні взаємодії між компонентами оболонки та порошкового наповнювача металопорошкового дроту. Основними фазами отриманих матеріалів є алюмініди заліза Fe_3Al і FeAl в різних їх співвідношеннях. У всіх фракціях порошків кількість металевої складової переважає кількість оксидної. Кількість оксидів зростає при зменшенні фракції порошку і зниженні сили струму плазмотрона. Встановлено, що при силі струму 220 і 260 А у фракції порошку -200+100 мкм, зафіксовано більшу кількість алюмінідів і найменший вміст оксидів.

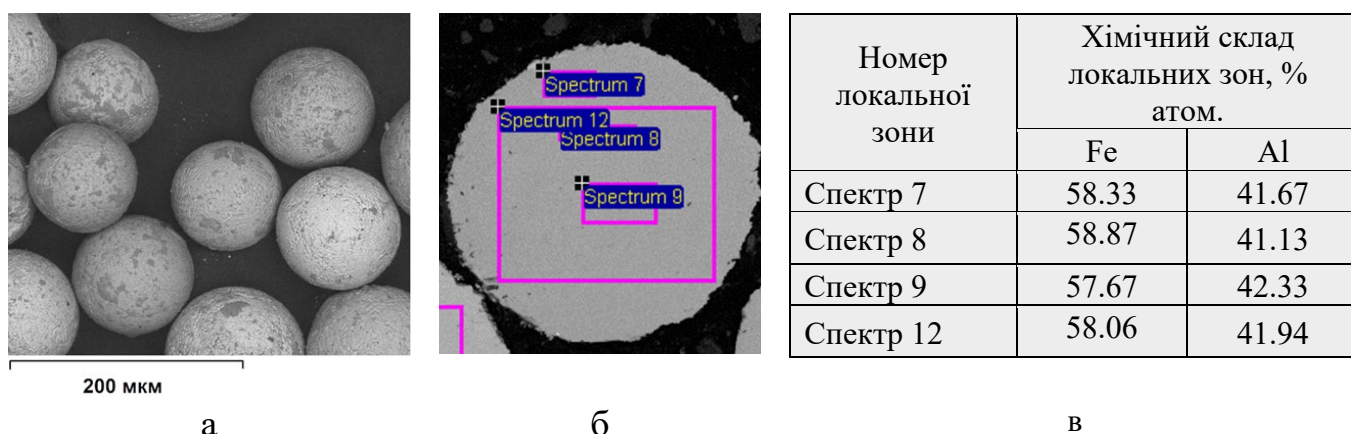


Рис. 12. Зовнішній вигляд (а), мікроструктура (б) гранул та результати локального хімічного аналізу (в) гранул фракції 80-160 мкм, отриманих плазово-дуговим розпилення металопорошкового дроту Fe-Al в атмосфері аргону при струмі 260 А.

Дослідження мікроструктури отриманих сферичних гранул вказує на те, що переважною складовою в них є світлі дендрити алюмінідів заліза з незначними прошарками α -заліза темного кольору між ними. За вмістом основних елементів, по перетину шліфа, частинки мають стабільний хімічний склад.

Досліджено вплив системи легування металопорошкових дротів з металокерамічними та інтерметалідними наповнювачами на процеси сфероїдизації в умовах ПДР, структуру і гранулометричний склад отриманих гранул.

Вивчено вплив наномодифікаторів тугоплавких сполук в металопорошкових дротах металокерамічного типу на їх сфероїдизацію і гранулометричний склад гранул, отриманих в процесі ПДР. Для досліджень використано металопорошкові дроти системи Fe-WC з додаванням до керамічного наповнювача нанорозмірних порошків тугоплавких сполук: ZrO_2 , NbC, B_4C . Металографічний аналіз порошків показав, що не залежно від типу наповнювача порошкового дроту та режиму

розпилення, частинки мають переважно сферичну форму. В меншій кількості спостерігаються продукти округлої та кутастої форм. На всіх зразках частинки порошку заліза мають правильну сферичну форму з найвищим коефіцієнтом сферичності до 0,9. Крім того, карбідні частинки мають порожнини в металевому ядрі внутрішньої структури частинок, у яких виявлено дрібні та більші сферичні вclusions.

Введення до складу наповнювача порошкового дроту системи Fe-WC нанорозмірних порошоків NbC та ZrO₂ призводить до зменшення середнього розміру частинок у 1,2...1,4 рази (рис. 13а). При цьому значно зменшується частка крупної фракції 250...400 мкм, а в випадку додавання ZrO₂ частка дрібнодисперсної фракції 0...45 мкм збільшується більше ніж у 3,4 рази.

У випадку системи легування Fe-B₄C додавання до складу наповнювача дроту нанопорошків ZrO₂ призводить до зменшення середнього розміру частинок у 1,1...1,2 рази (рис. 13б). При цьому частка середньодисперсної фракції 100...140 мкм зростає майже у 1,5 рази, а дрібнодисперсної фракції 0...45 мкм у 1,8 рази.

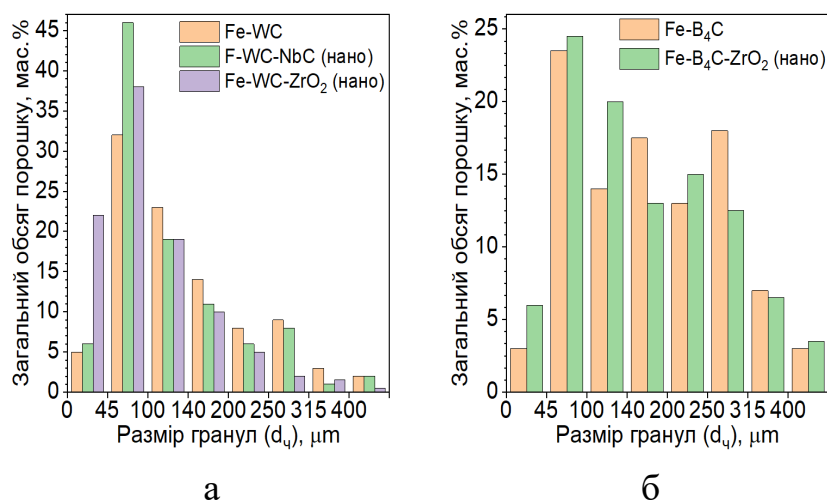


Рис. 13. Вплив нанодобавок у складі наповнювача порошкового дроту на розподіл фракційного складу порошку: *а* – WC+NbC, WC+ZrO₂; *б* – B₄C+ ZrO₂

Шостий розділ присвячений виявленню закономірності формування структури металокерамічних та інтерметалідних покриттів в залежності від характеристик матеріалів та умов технології ПДН.

Виконані дослідження особливостей взаємодії розплавлених інтерметалідних та металокерамічних частинок напилюваного матеріалу з поверхнею основи з формуванням шару покриття з їх сукупності.

Стан напиленої частинки матеріалу після удару об підкладку досліджували за допомогою splat-тесту. Напилення здійснювали переміщенням полірованих пластин з нержавіючої сталі розміром 50×30×0,5 мм у площині, перпендикулярній осі струменя. У результаті на зразках закріплювалися поодинокі частинки напиленого матеріалу, деформовані при контакті з поверхнею підкладки (бризки). Встановлено, що, при взаємодії частинок порошоків Fe₃Al, Fe-AlMg, Fe-TiAl з твердою основою, частинки в момент удару об цю основу знаходяться в повністю розплавленому стані та мають форму диска (рис. 14). Після удару частинок об підкладку та розподілу по поверхні, центральна частина плям виявляється незаповненою матеріалом. Це

пояснюється тим, що всередині краплі при її попаданні на поверхню твердого тіла відбуваються процеси кавітації; тобто бульбашки утворюються і ростуть, коли тиск падає до тиску насиченої пари. Бульбашки прориваються крізь рідке покриття краплі й утворюють кратероподібні отвори в деформованій частинці порошку. Визначено залежність середнього діаметра бризок і ступеня деформації частинок від ентальпії плазмового струменя. Встановлено, що зі збільшенням ентальпії плазмового струменя середній діаметр бризок і ступінь деформації частинок також збільшуються. Це пов'язано зі збільшенням температури та швидкості плазмового струменя, що призводить до зменшення поверхневого натягу та в'язкості розплавленої частинки, а також збільшення імпульсу та тиску, які діють на частинку, коли вона стикається з підкладкою. В результаті плазмового напилення цих порошків шари покриття формуються з повністю розплавлених і деформованих частинок.

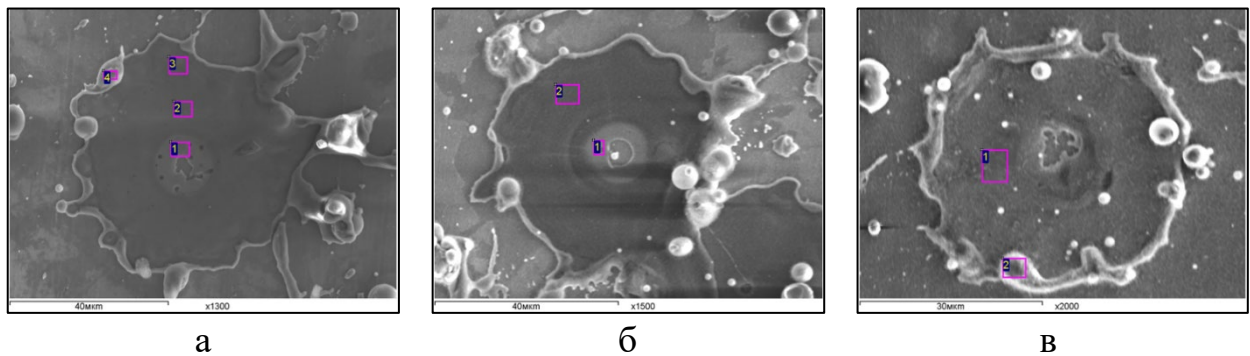


Рис. 14. Сплети порошків, отримані під час зіткнення з основою (при $I_{пл.}=500$ А): а – Fe_3Al ; б – Fe_3AlMg ; в – $(Fe,Ti)_3Al$

Ступінь деформації розплавлених частинок, які напилені на тверду основу, є важливим фактором, який впливає на мікроструктуру напиленого покриття, і, особливо, визначає швидкість її охолодження, від величини якої залежить фазовий склад, в тому числі формування аморфної або нанокристалічної структури покриття. З використанням підходів Мадейські і Бертаньоллі для різних типів напилюваних матеріалів та основи виконана оцінка товщини деформованих частинок $\delta_p = \frac{0,223 \cdot d_p}{\left(\frac{\rho_p \cdot W_p}{\eta_p} \right)^{0,4}}$

та їх ступеню деформації $\xi' = \frac{\delta_p}{d_p}$ при ударі об тверду поверхню. Запропоновано використання показника ефективної площі тепловідведення напиленої частинки

$f(K_a) = \frac{\delta_p/d_p}{4 \cdot S_{1p}/\pi \cdot d_p^2}$ з урахуванням ступеня її деформації, що являє собою відношення

ступеня деформації напиленої частинки до ефективної площі тепловідведення $S_{ef} = \frac{4 \cdot S_{1p}}{\pi \cdot d_p^2}$, де W_p - швидкість, ρ_p - густина, d_p - початковий діаметр, δ_p - товщина та S_{1p} - площа поверхні деформованої частки на твердій основі.

В результаті розрахунків критерію $f(K_a)$ для умов напилення частинок металів Fe, Ti, Al, з яких складаються досліджувані інтерметалідні та металокерамічні системи, показано, що для формування в них нанокристалічної структури при швидкостях охолодження більше 10^6 К/с, швидкість напилюваних частинок повинна

бути більша 200-400 м/сек, що реалізується в основному при надзвукових швидкостях витікання плазмових струменів. Рентгеноструктурні дослідження підтверджують такі результати розрахунків. Так, наприклад, порівняння рентгенограм покриттів із порошку системи «TiAl-SiC», отриманих при дозвукових режимах витікання плазмового струменю ($W_p \sim 150$ м/с), з покриттями, отриманими при надзвукових режимах ($W_p \sim 650-700$ м/с,) показує більшу площу «гало», що свідчить про більший вміст рентгеноаморфної (нанокристалічної) структури (рис. 15).

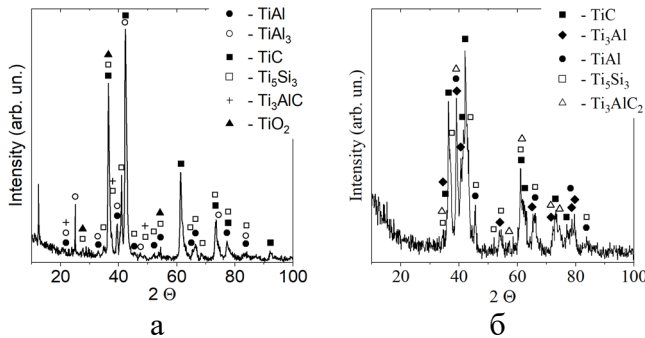


Рис.15. Рентгенограма металокерамічних покриттів із порошку TiAl-SiC, отриманих при до- (а) і надзвуковому (б) режимах плазмово-дугового напилення.

З використання параметра важкості плавлення (D) встановлені технологічні фактори процесу плазмово-дугового напилення, що впливають на структуру і властивості отриманих гранул та металокерамічних покриттів системи «TiAl-неметалеві тугоплавкі сполуки» (мікроструктура, фазовий склад, мікротвердість, пористість, стійкість до викришування) є показники:

- тепловміст плазмового струменя:

$$K_T = \frac{W}{G \cdot \rho},$$

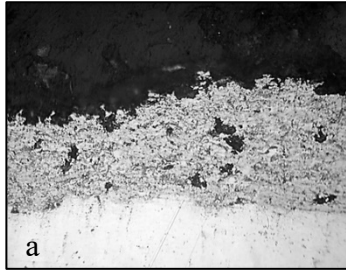
- відносна тривалість процесу перебування частинок в струмені:

$$K_\tau = 2,82 \cdot \frac{L \cdot d_A^2}{G}.$$

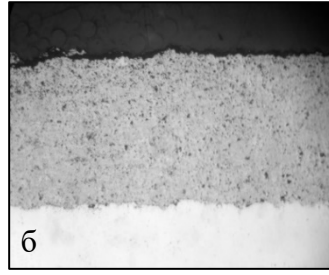
(W – потужність плазмотрону, кВт; L – дистанція напилення мм; d_A – діаметр сопла анода, мм; G – витрати плазмоутворюючого газу «повітря» або «повітря + пропан-бутан (метан)», м³/с; ρ – щільність газу, кг/м³).

На прикладі напилення металокерамічних порошків TiAl-SiC, TiAl-Si₃N₄ при до- і надзвукових режимах витікання плазмового струменя, показано, що вказані технологічні фактори є ефективним інструментом оптимізації параметрів процесу плазмово-дугового напилення (рис. 16). Виявлено значну відмінність в значеннях показників цих факторів для умови до- і надзвукового напилення. З їх використанням для випадку надзвукового плазмово-дугового напилення отримані покриття із оптимальним поєднанням максимальної щільності, мікротвердості і фазового складу.

У число факторів ПДН, які впливають на характер взаємодії напилюваних частинок з поверхнею основи, що визначає розвиток сил зчеплення покриття з основою входять: склад матеріалу основи з його теплофізичними, фізико-хімічними і механічними характеристиками, а також стан поверхні основи (ступінь шорсткості, наявність плівок та ін.). На основі цього, для досліджуваних в роботі інтерметалідних і металокерамічних систем, було проведено чисельний експеримент з визначенням величини температури в контакті «частинка-основа» (T_K) і розрахунок інтегральних напружень ($\sigma_{зал}$), які формуються залежно від складів матеріалу основи і покриття, і відносної товщини покриття. В якості металевої основи, на яку напилювали покриття, розглядали Al, Mg, Ti і Сталь 3.



$K_f=23,5$ МДж/кг; $K_r=1,46 \cdot 10^{-2}$ сек
 $H_u=4,3 \pm 0,8$ ГПа,
 Пористість $\sim 21-23$ %,
 Фазовий склад:
 TiC, Ti₃Al, TiAl, Ti₅Si₃, Ti₃AlC₂,
 TiO₂



$K_f=12$ МДж/кг; $K_r=4,95 \cdot 10^{-3}$ сек
 $H_u=5,98 \pm 0,8$ ГПа,
 Пористість $\sim 1-3$ %,
 Фазовий склад:
 TiC, Ti₃Al, TiAl, Ti₅Si₃, Ti₃AlC₂

Рис. 16. Мікроструктура покриттів із металокерамічного порошку TiAl-SiC, отриманих в результаті оптимізації технологічних параметрів з використанням запропонованих технологічних факторів (K_T і K_r), отриманих при дозвукових (а) і надзвукових (б) режимах витікання плазмового струменю (x400).

Аналіз результатів показав наявність значних відмінностей в умовах формування плазово-дугових покриттів на поверхні легких сплавів і Сталі 3, які пов'язані з різницею характеристик цих матеріалів. Так, величини температури контакту на поверхні Al становлять в середньому 0,75, Mg - 0,9 і Ti - 1,4 від T_k на поверхні Сталі 3 для всього переліку складів покриттів. Причина таких змін полягає в різниці значень коефіцієнтів акумуляції тепла основи (Al - 23,5; Mg - 17,2; Ti - 7,2; Сталь 3 - 10,7).

Формування залишкових напружень при нанесенні інтерметалідних та металокерамічних плазових покриттів на поверхню легких сплавів відрізняється від умов цього процесу на поверхню Fe-сплавів в зв'язку з різницею в величинах КТР, K^{-1} (Al - 23; Mg - 26; Ti - 9; Fe - 11) і комплексу, ГПа⁻¹ (Al - 0,010; Mg - 0,017; Ti - 0,006; Fe - 0,003). З цієї причини на Al- і Mg-основи в усіх випадках формуються стискаючі напруження, тоді як на Ti - в 12, а на Сталі 3 в 7 складах покриття утворюються розтягуючі, які більш небезпечні в області руйнування і відшарування покриття.

На основі узагальнення результатів чисельного експерименту було розроблено методику вибору параметрів технологічного процесу нанесення інтерметалідних та металокерамічних плазових покриттів на поверхню легких сплавів, засновану на принципі адаптації до існуючих технологічних параметрів плазово-дугового напилення. Друга частина чисельного експерименту полягала у вивченні впливу складу покриття з керметною структурою на температуру контакту «покриття-основа» і формування залишкових напружень в умовах плазового напилення на поверхню легких сплавів. Встановлено, що характер впливу на T_k керметних покриттів залежить від вмісту матричного металу та співвідношення значень коефіцієнта акумуляції тепла компонентів кермету. Ступінь зниження залишкових напружень залежить від різниці в величинах КТР кераміки і металу. Отримані результати дозволяють розробити рекомендації як по складам керметів, так і в умовах їх плазово-дугового напилення на легкі сплави.

Проведено дослідження особливостей формування покриттів в умовах ПДР з використанням порошків металокерамічних «TiAl-НТС» та інтерметалідних системи Fe-Al та металопорошкових дротів на основі системи залізо-алюміній. Встановлено, що при нанесенні покриття плазмо-дуговим способом у випадку напилення порошкового дроту, що складається зі сталеві оболонки та наповнювача (порошку алюмінію), формуються інтерметалідні покриття, основною фазою яких є Fe₃Al, яка є продуктом міжфазної взаємодії розплавів оболонки (Fe) і порошкового

наповнювача (Al). Покриття, отримані напиленням інтерметалідних порошків системи Fe-Al формуються з шарів, щільно прилеглих до основи без ознак втрати зчеплення.

Сьомий розділ присвячено вивченню властивостей інтерметалідних та металокерамічних покриттів, а також розробці технологічних процесів отримання нових матеріалів для ПДР, дослідно-промислового обладнання для реалізації даних технологічних процесів та прикладів їх апробації та впровадження.

Результати дослідження зносостійкості і корозійної стійкості отриманих покриттів свідчать, що покриття системи Fe-Al можуть бути рекомендовані для практичного застосування в галузях промисловості та на підприємствах, де довговічність та надійність роботи обладнання обмежуються впливом факторів стійкості до зносу та корозії при роботі в умовах високих температур (до 1000 °C) та агресивного газового середовища (сірко- і хлоровмісних середовищах). Металокерамічні покриття системи «TiAl-НТС» можуть бути використанні для захисту поверхень деталей з Al- та Ti-сплавів в умовах підвищених робочих температур і механічних навантажень, впливу агресивних середовищ.

На основі аналізу отриманих результатів розроблені рекомендації щодо застосування функціональних інтерметалідних та металокерамічних покриттів на поверхні сплавів, що наносяться методом плазово-дугового напилення.

На основі результатів досліджень створені наступні нові марки інтерметалідних та металокерамічних композиційних матеріалів для плазово-дугового розпилення сферичних гранул і нанесення покриттів широкого функціонального призначення (табл. 5).

1) Композиційні порошки інтерметалідних та металокерамічних систем «Fe-Al» та «TiAl-НТС», отриманих методом механохімічного синтезу і конгломерування, що забезпечує формування нанокристалічної структури порошків із розмірами кристалітів 4-11,7 нм та заданий рівень технологічних властивостей для використання в якості вихідних матеріалів для ПДР з метою отримання сферичних гранул для 3D друку та функціональних покриттів. Для організації дослідно-промислового виробництва вказаних порошків розроблені Технічні умови ТУ 005-73-2024 «Композиційні порошки для газотермічного напилення інтерметалідних покриттів системи Fe-Al» та ТУ 006-73-2024 «Композиційні порошки TiAl-неметалеві тугоплавкі сполуки для отримання сферичних гранул та нанесення покриттів методом плазово-дугового розпилення», які регламентують їх хімічний, фазовий, гранулометричний склад та розмір кристалітів.

2) Композиційні металопорошкові дроти на основі системи Fe-Al з сталеву оболонкою з сердечником із порошків алюмінію та з безкисневої кераміки Cr_3C_2 , B_4C , SiC , а також з добавкою нанорозмірних модифікаторів тугоплавких сполук. Для організації їх дослідно-промислового виробництва розроблені ТУ 001-21-2024 «Металопорошковий дріт FA10- Cr_3C_2 - B_4C - SiC (FCW) для плазово-дугового напилення металокерамічних покриттів» та ТУ 002-21-2024 «Металопорошковий дріт для газотермічного напилення інтерметалідних покриттів системи Fe-Al», які регламентують їх хімічний склад, конструкцію, а також кількість і тип наномодифікаторів.

Таблиця 5 Марки інтерметалідних та металокерамічних композиційних матеріалів для плазмо-дугового розпилення сферичних гранул і нанесення покриттів широкого функціонального призначення

Тип, марка матеріалу	Система легування	Функціональне призначення покриттів	Приклади застосування
<u>Композиційні порошки</u>			
FA14 (P-MCA) FAM14 (P-MCA) FAT14 (P-MCA)	Fe-Al; Fe-Al-Mg; Fe-Al-Ti	Для захисту від газоабразивного зносу (ерозії) в корозійних середовищах і при підвищених температурах	Труби поверхонь нагріву котельних агрегатів, лопатки димососів
TA-B ₄ C (P-MCA) TA-BN (P-MCA) TA-SC (P-MCA) TA-Si ₃ N ₄ (P-MCA)	Ti-Al-B ₄ C; Ti-Al-BN; Ti-Al-SiC; Ti-Al-Si ₃ N ₄	Для захисту від зносу при терті ковзання в умовах корозійного впливу. Для отримання сферичних гранул для 3D друку виробів із функціонально-градієнтних матеріалів	Деталі газотурбінних установок, насосів, верстатів, гідроапаратури, вузли тертя
<u>Металопорошкові дріоти</u>			
FA14 (FCW)	Fe-Al-наномодифікатори	Для захисту від газоабразивного зносу в корозійних середовищах Для отримання сферичних гранул для 3D друку методами SLM, SLS, DMMS, DED	Труби поверхонь нагріву котельних агрегатів та устаткування хімічної промисловості Деталі парових турбін, газотурбінних установок, агрегатів перетворення енергії
FA5Al-Cr ₃ C ₂ (FCW) FA5I-Cr ₃ C ₂ -B ₄ C (FCW) FA5Al-Cr ₃ C ₂ -B ₄ C-SiC (FCW)	Fe-Al-Cr ₃ C ₂ - (Cr ₃ C ₂ -B ₄ C-SiC)-наномодифікатори	Для захисту деталей, від абразивного зношування при підвищених температурах. Для отримання сферичних гранул для 3D друку виробів із функціонально-градієнтних матеріалів методом DED	Плунжери, штоки, поршні насосів, вузли запірної апаратури, деталі ДВС, обладнання металургійної промисловості, інструменти, вузли тертя

Для ПДН покриттів із композиційних інтерметалідних та металокерамічних порошків та отримання сферичних гранул, що відповідають вимогам матеріалів для 3D-друку, створено новий плазмотрон із мідним пустотілим електродом. Цей плазмотрон забезпечує ширші можливості регулювання швидкості високотемпературного плазмового струменя при надзвукових режимах його витікання, універсальність для використання різних типів плазмоутворюючих газів в широких інтервалах регулювання ентальпії плазми, що забезпечує розплавлення тугоплавких компонентів порошків з подальшим надшвидким охолодження розплавлених частинок та формуванням аморфної або нанокристалічної структури отриманих гранул та покриттів.

Розроблено установку нового покоління для плазово-дугового нанесення покриттів і розпилення струмопровідних дровових матеріалів, особливістю якої є застосування плазмотрона із підвищеним струмовим навантаженням, із оптимізованими геометричними параметрами газорозрядної камери, сопла та систем обдуву плазмового струменя супутнім потоком газу, що дозволило підвищити ефективність нагріву металопорошкового дроту діаметром до 2,4 мм з наповнювачами із порошків тугоплавких сполук безкисневої кераміки, збільшити продуктивність процесу розпилення з 12 до 18 кг/год та отримувати високоякісні покриття з пористістю менше 1 %. Розроблено дослідно-промислове обладнання для плазово-дугової сфероїдизації інтерметалідних і металокерамічних порошків неправильної форми та розпилення металопорошкових дротів із керамічними порошковими наповнювачами, яка дозволяє отримувати гранули в інтервалі 10-160 мкм з коефіцієнтом сферичності $>0,86$.

Проведено апробацію сферичних гранульних матеріалів фракції 45-100 мкм, отриманих ПДР металопорошкового дроту з інтегральним хімічним складом, який відповідає інтерметаліду Fe_3Al , в якості матеріалів для 3D друку об'ємних зразків методами адитивного лазерного наплавлення і селективного лазерного плавлення. Отримані зразки за значеннями твердості і міцності на стиск не поступаються даним сплавам, отриманих металургійними методами. Враховуючи те, що інтерметалідні сплави на основі Fe_3Al при їх відносно невисокій густині ($\sim 6,7 \text{ г/см}^3$) при температурі 650°C характеризується більш високими механічними характеристиками і корозійною стійкістю, порівняно із легованими мартенситно-феритними сталями і деякими жаростійкими нікелевими сплавами, розроблені матеріали є перспективними для 3D друку деталей парових турбін, газотурбінних двигунів, енергетичного обладнання.

Розроблені металопорошкові дроти пройшли промислове випробування при нанесенні інтерметалідних покриттів для захисту труб пароперегрівачів сміттєспалювального обладнання від високотемпературної корозії та газоабразивного (зольного) зношування та металокерамічних покриттів на фрагменти штанг нафтовидобувних колон. Результати тестів в промислових умовах дозволяють прогнозувати підвищення довговічності зазначеного обладнання, щонайменше, до 5 разів. Результати роботи впроваджені на підприємстві ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) при організації промислового виробництва плазово-дугової установки «PLAZER-50-PL-W», яка використовується в технологічних процесах отримання із дровових композиційних матеріалів сферичних дрібнодисперсних гранул та нанесення захисних покриттів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено наукові основи управління структурою і фазовим складом композиційних металокерамічних та інтерметалідних порошків у процесі механохімічного синтезу та їх обробки в плазмовому струмені з отриманням сферичних гранул і покриттів, що включають: а) результати і закономірності комплексної термодинамічної оцінки протікання реакцій для вибору складу порошкових сумішей і прогнозування фазового складу продуктів механохімічного синтезу; б) методики та результати прогнозування найбільш ймовірних реакцій при нагріванні порошків у широкому діапазоні температур 298–1500 К.

2. Встановлено закономірності, що відбуваються при формуванні металокерамічних та інтерметалідних порошків на основі систем Ti-Al і Fe-Al в умовах механохімічного синтезу. Виявлено послідовність стадій протікання процесу синтезу нових фаз з утворенням композиційних частинок, формування твердого розчину та утворенням КП заданого складу. Встановлено, що отримані в процесі МХС продукти характеризуються нанодисперсною структурою (розмір кристаліту 4–11,7 нм).

3. Встановлено, що застосування попередньо механоактивованого порошку TiAl для отримання методом МХС нанокompозитного інтерметаліду $(\text{Fe,Ti})_3\text{Al}$ дозволяє інтенсифікувати процес подрібнення структури, що підтверджується зменшенням розміру кристаліту через 1,5 години обробки в 1,3 рази (від 68 до 54 нм), а через 5 год обробки у 3 рази (від 30 до 10 нм).

4. На основі використання критерію важкості плавлення – D та результатів математичного моделювання турбулентних плазмових струменів, процесів нагрівання і руху в них частинок напилюваних порошків, встановлено технологічні фактори плазмового напилення металокерамічних та інтерметалідних покриттів, які дозволять вибрати оптимальні режими напилення і забезпечити їх заданий структурний стан: комплекс фізико-хімічних і механічних властивостей.

5. Встановлено закономірності структурно-фазових перетворень в металокерамічних та інтерметалідних порошкових частинках порошків неправильної форми при проходженні через високотемпературну ділянку плазмового струменя, в тому числі протікання і розвиток процесів хімічної взаємодії компонентів, плавлення, агломерації і сфероїзації із утворенням сфероїдизованих частинок зі ступенем сферичності $>0,86$ і розміром частинок у 3-16 разів вище за вихідні композиційні порошки.

6. На основі розроблених наукових підходів та критеріїв оцінки тепловмісту надзвукового плазмового струменя та тривалості перебування частинок порошку в струмені встановлено основні технологічні фактори, що впливають на структуру та властивості сфероїдизованих металокерамічних гранул та нанесених покриттів. На їх основі проведена оптимізація технологічних параметрів надзвукового плазмового напилення, що забезпечують управління та досягнення заданих показників мікроструктури, фазового складу, мікротвердості, пористості, зносостійкості.

7. Розроблено наукові підходи управління технологією плазово-дугового розпилення композиційних (металопорошкових) дротів для отримання металокерамічних та інтерметалідних сферичних гранул та покриттів. Підтверджено

можливість формування в процесі розпилення переважно однофазової структури з вмістом інтерметалідної фази типу Fe_3Al , щонайменше, 80 % від загального об'єму.

8. Виявлено закономірності впливу наномодифікаторів, як наповнювачів композиційних порошкових дротів на гранулометричний і фазовий склад сфероїдизованих порошків та структуру отриманих покриттів. Показано, що введення нанорозмірних керамічних модифікаторів в об'ємі 0,5% в наповнювачі композиційного порошкового дроту призводить до зменшення середнього розміру частинок розпилених гранул і порошків на 15–25%, зменшення пористості покриттів, підвищення їх мікротвердості та зносостійкості, міцності зчеплення покриттів з основою.

9. Розроблено нові марки інтерметалідних та металокерамічних композиційних матеріалів систем Fe-Al (Mg,Ti), Ti-Al- B_4C (BN; SiC; Si_3N_4), Fe- B_4C (SiC) з наномодифікаторами тугоплавких сполук для плазмо-дугового розпилення сфероїдизованих гранул і нанесення покриттів широкого функціонального призначення, підготовлено Технічні Умови для їх дослідно-промислового виробництва. Отримано дослідно-промислові партії сферичних гранул плазмово-дуговим розпиленням металопорошкового дроту Fe-Al в захисній атмосфері, підтверджена можливість їх використання для 3D-друку об'ємних зразків методами адитивного лазерного наплавлення DED і селективного лазерного плавлення SLM.

10. Створено новий плазмотрон підвищеної потужності для плазмово-дугового розпилення гранул і нанесення покриттів із струмопровідних металопорошкових дротів та плазмотрон із мідним пустотілим електродом для сфероїдизації металокерамічних та інтерметалідних порошків неправильної форми та нанесення покриттів. Результати роботи впроваджені на підприємстві ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) при організації промислового виробництва плазмово-дугової установки «PLAZER 50 PL W», яка використовується в технологічних процесах отримання із металопорошкових дротів сферичних дрібнодисперсних гранул та нанесення захисних покриттів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті проіндексовані в міжнародних наукометричних базах даних:

1. Peculiarities of the plasma-arc atomization of solid and flux-cored wires / I. Krivtsun, V. Korzhyk, S. Gao, D. Strohonov, **O. Burlachenko**, X. Wang, O. Demianov. *Welding and related technologies*. : Proceedings of the VIIth international conference on welding and related technologies (WRT 2024), Yaremche, 7–10 October 2024 / ed. by I. Krivtsun et al. Abingdon, 2025. P. 75–78. DOI: [10.1201/9781003518518-16](https://doi.org/10.1201/9781003518518-16). (Scopus).
2. **Burlachenko O.**, Vigilianska N., Senderowski C. (2024). Cermet Powders Based on TiAl Intermetallic for Thermal Spraying. *Materials Science Forum*, Vol. 1113, pp. 77–85. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-7ris3b>. (Scopus).
3. Korzhyk V., **Burlachenko O.**, Strohonov D., Fialko N., Kharlamov M., Grishchenko O., Peleshenko S. (2023). Effect of the technological parameters of plasma-arc spraying of flux-cored wire on the structure and properties of intermetallide coatings based on Fe_3Al . *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 1 No. 12 (121), pp.6–15. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.274062>. (Scopus).

4. Senderowski C., Vigilianska N., **Burlachenko O.**, Grishchenko O., Murashov A., Stepanyuk S. (2023). Effect of APS Spraying Parameters on the Microstructure Formation of Fe₃Al Intermetallics Coatings Using Mechanochemically Synthesized Nanocrystalline Fe-Al Powders. *Materials*, Vol.16(4), P.1669; DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16041669>. (Scopus).

5. Borisova, A.L., Timofeeva, I.I., Vasil'kovskaya, M.A., **Burlachenko A. N.**, Tsymbalistaya T. V. (2015). Structural and Phase Transformations in Fe–Al Intermetallic Powders During Mechanochemical Sintering. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Vol.54, pp.490–496. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-015-9740-5>. (Scopus).

Статті в наукових фахових виданнях України:

6. Коржик В.М., **Бурлаченко О.М.**, Грищенко О.П., Завдовсєв А.В., Войтенко О.М. (2024). Розробка гібридної технології отримання сферичних порошків із дровових матеріалів з використанням високошвидкісних плазмових струменів та електричної дуги. *Сучасна електromеталургія*, № 3, С. 36-44. <https://doi.org/10.37434/sem2024.03.05>.

7. Коржик В.М., Строгонов Д.В., **Бурлаченко О.М.**, Войтенко О.М., Куницький Д.В. (2023). Розвиток плазмово-дугових технологій отримання сферичних гранул для адитивного виробництва і гранульної металургії. *Автоматичне зварювання*, № 11, С. 37-52. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.11.04>.

8. Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Войтенко О.М., **Бурлаченко О.М.**, Хуан О.О. (2023). Плазмово-дугові технології адитивного наплавлення (3D друку) просторових металевих виробів: досвід застосування і нові можливості. *Автоматичне зварювання*, № 11, С. 5-22. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.11.01>.

9. Грищенко О.П., Вігілянська Н.В., **Бурлаченко О.М.**, Сендеровскі Ц., Горбань В.Ф. (2023). Дослідження впливу тривалості часу механо-хімічного синтезу наноструктурного порошку (Fe, Ti)₃Al на характеристики плазмових покриттів. *Автоматичне зварювання*, № 10, С. 60-65. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.10.08>.

10. Коржик В.М., Строгонов Д.В., **Бурлаченко О.М.**, Ганущак О.В., Войтенко О.М. (2023). Установка нового покоління для плазмодугового нанесення покриттів і розпилення струмопровідних дровових матеріалів. *Сучасна електromеталургія*, № 3, С. 19-27. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.03.04>.

11. Коржик В.М., Строгонов Д.В., **Бурлаченко О.М.**, Тунік А.Ю., Ганущак О.В., Грищенко О.П. (2023). Ефективність процесу плазмово-дугової сферодизації струмопровідного титанового дроту. *Сучасна електromеталургія*, № 1, С. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.01.05>.

12. Борисов Ю. С., **Бурлаченко О. М.**, Вігілянська Н. В., Сендеровскі Ц. (2022). Дослідження впливу попередньої активації порошку TiAl на процес механохімічного синтезу інтерметаліду (Fe,Ti)₃Al. *Автоматичне зварювання*, № 11, С. 52-56. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.11.08>.

13. Борисов Ю.С., Вігілянська Н.В., Коломицев М.В., Янцевич К.В., **Бурлаченко О.М.**, Цимбаліста Т.В. (2022). Формування композиційних покриттів методом надзвукового плазмового напилення порошків на основі інтерметаліду TiAl з неметалевими тугоплавкими сполуками SiC та Si₃N₄. *Автоматичне зварювання*, № 6, С. 17-22. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.06.03>.

14. Строгонов Д.В., Коржик В.М., Цзянлун І, Тунік А.Ю., **Бурлаченко О.М.**, Альошин А.О. (2022). Вплив параметрів процесу плазово-дугової сферодизації струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі на гранулометричний склад отриманих порошків. *Сучасна електрометалургія*, №3, С.29–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.03.05>.

15. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., **Бурлаченко О.М.**, Цимбалистая Т.В., Васильковская М.А., Биба Є.Г. (2021). Композиційні порошки на основі аморфізуючого сплаву FeMoNiCrV з добавками тугоплавких сполук для газотермічного нанесення покриттів. *Автоматичне зварювання*, № 11, С. 44-53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.11.08>.

16. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Вігілянська Н.В., Дем'янов І.А., **Бурлаченко О.М.** (2021). Електродугове напилення інтерметалідних Fe–Al покриттів з використанням різнорідних суцільних та порошкових дротів. *Автоматичне зварювання*, № 3, С. 17-22. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.03.03>

17. Ageev M., Solovuch E., Lopata V., **Burlachenko O.**, Vihilianska N. (2021). Study influence factors of the spraying process on the properties of electric arc spraying coatings. *Problems of Tribology*, 26(1/99), pp. 74–83. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-99-1-74-83>.

18. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., **Бурлаченко А.Н.**, Цымбалистая Т.В., Сендеровски Ц. (2017). Структура и свойства легированных порошков на основе интерметаллида Fe₃Al для газотермического напыления, полученных методом механохимического синтеза. *Автоматическая сварка*, № 9, С. 40-47. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.09.06>.

19. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Астахов Е.А., Цимбалистая Т.В., **Бурлаченко А.Н.**, Васильковская М.А., Кильдий А.И. (2017). Детонационные покрытия из порошков интерметаллидов системы Fe–Al, полученных методом механохимического синтеза. *Автоматическая сварка*, №4, С. 25-31. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.04.05>.

20. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Астахов Е.А., **Бурлаченко А.Н.**, Ипатова З.Г., Горбань В.Ф. (2014). Детонационные покрытия из композиционного порошка ферромолибден–карбид кремния, полученного методом механохимического синтеза. *Автоматическая сварка*, № 3, С.28-35. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2014/03/05>.

Статті у закордонних виданнях:

21. Strohonov D., Tereshchenko O., **Burlachenko O.**, Korzhyk V., Ganushchak O., Konoreva O. (2024). The technology of plasma-arc atomization of current-carrying solid wires for titanium powder production. *Sciences of Europe*, № 147, pp. 116–119. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13382721>.

22. Tereshchenko O., **Burlachenko O.**, Strohonov D., Korzhyk V., Demianov O. (2024). Analysis of the process of plasma-arc atomization of wires to produce spherical granulated powder materials. *Colloquium-journal*, №22 (215), pp.20-23. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13293958>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

23. Kryvtun I., Korzhyk V., Gao Sh., Strohonov D., **Burlachenko O.**, Wang X., Demianov O. Analysis of the peculiarities of the melting and atomization processes of current-carrying compact and flux-cored wires in plasma arc-spherodization. Матеріали

міжнародної конференції «Зварювання та споріднені технології» (WRT 2024), 7-10 жовтня 2024, Яремче, Україна, pp....

24. Senderowski C., Vigilianska N., **Burlachenko O.**, Zasada D. Effect of structure ordering on the abrasive wear of Fe-Al (B2) type intermetallic coatings after D-gun spraying and high-temperature annealing. 5th International Conference on *Materials Design and Applications*, July 4-5, 2024, Porto, Portugal, p. 124.

25. **Burlachenko O.**, Vigilianska N., Senderowski C. Cermet powders based on TiAl intermetallide for thermal spraying. 8th International Materials Science Conference *HighMatTech-2023*, October 2-6, 2023 Kyiv, Ukraine, p. 56.

26. Коржик В.М., Гринюк А.А., Хаскін В.Ю., Войтенко О.М., **Бурлаченко О.М.**, Хуан О.О. Плазмово-дугові технології адитивного наплавлення (3D друку) просторових металевих виробів: досвід застосування і нові можливості. Науково-технічна конференція *сучасні напрями розвитку адитивних технологій*, 27 листопада 2023, Київ, 47с. С.13.

27. Коржик В.М., Строгонов Д.В., **Бурлаченко О.М.**, Войтенко О.М. Тенденції розвитку плазмово-дугових технологій отримання сферичних гранул і порошків для адитивного виробництва і гранульної металургії. Науково-технічна конференція *Сучасні напрями розвитку адитивних технологій*, 27 листопада 2023, Київ, Україна, 47с. С.14.

28. Коржик В.М., Строгонов Д.В., **Бурлаченко О.М.**, Грищенко О.П., Щерецький В.О. Застосування технології плазмового-дугового розпилення прутків та дротяних матеріалів на зворотній полярності. *Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України: Тези допов. наук. конф. під ред. О.Т. Зельніченка*. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 17 листопада 2022. 66 с. С.39.

29. Коржик В.М., **Бурлаченко О.М.**, Вігілянська Н.В., Грищенко О.П., Коломицев М.В., Строгонов Д.В., Дем'янов І.А. Інтерметалідні покриття системи Fe–Al, які отримані методами газотермічного напилення. *Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України: Тези допов. наук. конф. під ред. О.Т. Зельніченка*. Київ: Міжнародна Асоціація «Зварювання», 17 листопада 2022. 66 с. С.38.

30. Vigilianska N., **Burlachenko O.**, Kolomytsev M., Grishchenko O. Investigation of the influence of supersonic plasma spraying parameters on the microstructure of CoNiCrAlY-coatings. *Science, innovations and education: problems and prospects*. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group, February 9-11, 2022, Tokyo, Japan, pp. 196-201.

31. Vigilianska N., **Burlachenko O.**, Grishchenko O. Plasma sprayed nanocomposite coating of the FeTi-SiC system. Proceedings of the scholarly abstracts «*European Academy of Science and Research*», January 16, 2022, Hamburg, Germany, p. 7.

32. Мікосянчик О.О., Шамрай В.Б., Кулижський В.М., **Бурлаченко О.М.**, Лопата В.Н. Підвищення зносостійкості деталей сільськогосподарських машин. *Якість, стандартизація, контроль: теорія та практика: Матеріали 21-ї Міжнародної науково-практичної конференції, 06–10 вересня 2021 р., м. Одеса*. Київ: АТМ України, 2021. С.53-55.

33. **Бурлаченко О.М.**, Вігілянська Н.В., Грищенко О.П. Керметні плазмові покриття з аморфною структурою. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021) : матеріали тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції, Чернігів, 26–27 травня 2021. У 2 т. Т. 2, С. 60.

34. Polishchuk D. V., **Burlachenko O. M.**, Stepanchuk A. M. Impact of wear resistance method abrasive wear covering from powder composition FeCrMoNiB-(Ti, Cr)C obtained mechanical alloying. Міжнародна наукова конференція «*Матеріали для*

роботи в екстремальних умовах – 9», 18–19 грудня 2019, Київ, Україна, С. 59-61.

35. Polishchuk D.V., **Burlachenko O.M.**, Stepanchuk A.M. Preparation of composition powders by mechanical alloys and coatings. 6th International Conference «*HighMathTech*», October 28-30, 2019, Kyiv, Ukraine, p.165.

36. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., **Бурлаченко А.Н.**, Вигилянська Н.В., Цимбалиста Т.В., Рупчев В.Л. Порошки для газотермічного напылення покриттів, отримані методом обробки в високоенергетических шарових мельницях. Міжнародна конференція «Зварювання та Споріднені Технології - Сьогодення і Майбутнє», 5-6 грудня 2018, Київ, Україна, С. 84-85.

37. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., **Бурлаченко А.Н.** Structure and properties of thermal sprayed coatings based on Fe-Al system intermetallics. 6TH International Samsonov Conference «*Material Science of Refractory Compounds*», May 22-24, 2018, Kyiv, Ukraine). p. 155.

38. Борисова А.Л., Тимофеева И.И., Васильковская М.А., **Бурлаченко А.Н.**, Цымбалиста Т.В. Фазовые и структурные превращения при формировании порошков интерметаллидов системы Fe-Al методом МХС. 4-я международная Самсоновская конференция «*Материаловедение тугоплавких соединений*», 21-23 мая 2014, Киев, Украина, С. 106.

39. Борисов Ю.С., Рупчев В.Л., **Бурлаченко А.Н.**, Борисова А.Л., Адеева И., Туник А.Ю. Композиционные порошки для ГТН Fe-Cr-SiC, полученные методом МХС. Структура и свойства. Международная конференция «*Сварка и родственные технологии – настоящее и будущее*», 25-26 ноября 2013, Киев, Украина, С. 166-167.

40. **Бурлаченко А.Н.** Получение композиционных порошков системы «Ферросплав-SiC» для газотермического напыления покрытий методом механохимического синтеза. VII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені процеси і технології», 22-24 мая 2013, Киев, Украина, С. 87.

41. Борисов Ю.С., Астахов Е.А., Борисова А.Л., Кильдий А.И., Рупчев В.Л., Адеева Л.И., **Бурлаченко А.Н.**, Вигилянська Н.В., Туник А.Ю. Структура и фазовый состав детонационных композиционных покрытий из композиционного порошка FeTi-SiC, полученного методом механохимического синтеза. III Международная Конференция «*HighMatTech*», 3-7 октября 2011, Киев, Украина, С. 399.

42. Борисов Ю.С., Астахов Е.А., Ипатов З.Г., Рупчев В.Л., **Бурлаченко А.Н.**, Янцевич К.В. Коррозионная стойкость детонационных покрытий системы Fe-Cr-SiC в различных агрессивных средах. X міжнародна конференція-виставка «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів», 8-11 червня 2010, Львів, Україна, С. 27.

Патенти:

43. Спосіб плазово-дугового напылення покриттів струмопровідним дротом. Патент КНР на винахід CN114351078B China: C23C 4/134 (2016 .01), C23C 4/131(2016 .01), C23C 4/06 (2016 .01) / Ван Сюебін, Коржик В., Ле Вангун, Чжан Ханг, Хаскін В., Фіалко Н., Дем'янов О., Щерецький В., Строгонов Д., **Бурлаченко О.** №. CN202111581484.X; зареєстровано: 22.12.2021; опубліковано: 22.03.2024.

44. Спосіб гібридного плазово-електродугового розпилення дротяних матеріалів. Патент КНР на винахід CN115740471A China: B22F 9/08 (2006 .01), B22F 1/052 (2022 .01) / Сюй Мучжун, Коржик В., Чао Тін, Лю Цзіган, Строгонов Д., **Бурлаченко О.**, Дем'янов О. №. CN202211660902.9; зареєстровано: 23.12.2022; опубліковано: 07.03.2023.

АНОТАЦІЯ

Бурлаченко О.М. Структурно-фазові перетворення в металокерамічних та інтерметалідних порошках і металопорошкових дротах в процесі плазово-дугового розпилення та формування покриттів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 - «Матеріалознавство». - Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України, м. Київ, 2025 р.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-практичної проблеми створення науково-технічних основ управління структурою і фазовим складом композиційних металокерамічних та інтерметалідних порошків в процесі їх отримання, і на цій основі формування покриттів методом плазово-дугового розпилення.

В роботі запропоновано технологію механохімічного синтезу як спосіб отримання металокерамічних та інтерметалідних порошків для формування покриттів газотермічним напиленням. Встановлено закономірності, що відбуваються при формуванні металокерамічних та інтерметалідних порошків на основі систем Ti-Al і Fe-Al в умовах механохімічного синтезу, проведено термодинамічну оцінку міжфазної взаємодії компонентів порошків, виявлено послідовність стадій протікання процесу синтезу нових фаз з утворенням композиційних частинок.

Встановлено закономірності структурно-фазових перетворень в металокерамічних та інтерметалідних порошкових частинках на стадії їх проходження через об'єм високотемпературного плазового струменя. Відмічено, що під час переміщення частинок крізь плазовий струмінь вихідні частинки коагулюються, в результаті чого їхній середній розмір збільшується від 9–15 мкм до 19–31 мкм.

Розроблено наукові підходи управління технологією плазово-дугового розпилення композиційних (порошкових) дротів для отримання металокерамічних і інтерметалідних сферичних гранул та покриттів. Підтверджена можливість формування в процесі розпилення переважно однофазової структури із вмістом інтерметалідної фази типу Fe_3Al , щонайменше, 80 % від його загального об'єму.

Вивчено вплив легуючих елементів та введення нанодобавок тугоплавких сполук в порошкові дроти на структуру та гранулометричний склад отриманих порошків. Показано, що нанодобавки сприяють зменшенню середнього розміру частинок в 1,1-1,4 рази. Виявлено підвищення міцності зчеплення покриттів з основою на ~15% і зниження інтенсивності газоабразивного зношування в 2,5 рази, а абразивного в 2 рази.

Розроблені наукові засади для виготовлення відповідного обладнання та практичні технології отримання композиційних порошків та порошкових дротів із металокерамічними та інтерметалідними наповнювачами для газотермічного напилення зносостійких та жаростійких покриттів.

Ключові слова: інтерметалідні покриття, металокерамічні покриття, механохімічний синтез, плазово-дугове напилення, металопорошковий дріт, наномодифікатор, коефіцієнт сферичності, сплет; структурно-фазові перетворення, жаростійкість

ABSTRACT

Burlachenko O.M. **Phase and structural transformations in metal–ceramic and intermetallic powders and powder wires in the process of plasma–arc spraying and coating formation.**

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.02.01 – " Materials science". – E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The dissertation is dedicated to solving an important scientific and practical problem of creating scientific and technical foundations for controlling the structure and phase composition of composite metal-ceramic and intermetallic powders in the process of their production, and on this basis, forming coatings by the plasma-arc spraying method.

The work proposes a technology of mechanochemical synthesis as a method of obtaining metal-ceramic and intermetallic powders for forming coatings by gas-thermal spraying. The regularities that occur during the formation of metal-ceramic and intermetallic powders based on the Ti-Al and Fe-Al systems under the conditions of mechanochemical synthesis have been established, a thermodynamic assessment of the interphase interaction of the powder components has been carried out, and the sequence of stages of the synthesis of new phases with the formation of composite particles has been revealed.

The regularities of structural and phase transformations in metal-ceramic and intermetallic powder particles at the stage of their passage through the volume of a high-temperature plasma jet have been established. It is noted that during the movement of particles through the plasma jet, the initial particles coagulate, because of which their average size increases from 9–15 μm to 19–31 μm .

Scientific approaches to control the technology of plasma-arc spraying of composite (powder) wires for obtaining cermet and intermetallic spherical granules and coatings have been developed. The possibility of forming a predominantly single-phase structure with an intermetallic phase content of Fe_3Al type, at least 80% of its total volume, has been confirmed during the spraying process.

The influence of alloying elements and the introduction of nano-additives of refractory compounds into flux cored wires on the structure and granulometric composition of the obtained powders was studied. It was shown that nano-additives contribute to a decrease in the average particle size by 1.1-1.4 times. An increase in the adhesion strength of coatings to the base by ~15% and a decrease in the intensity of gas-abrasive wear by 2.5 times and abrasive wear by 2 times were found.

Scientific principles have been developed for the manufacture of appropriate equipment and practical technologies for obtaining composite powders and powder wires with cermet and intermetallic fillers for gas-thermal spraying of wear-resistant and heat-resistant coatings.

Key words: intermetallic coatings, metal–ceramic coatings, mechanochemical synthesis, plasma–arc spraying, metal powder wire, nanomodifier, coefficient of sphericity, braid; structural and phase transformations, heat resistance.

Підп. до друку 2 травня 2025 Формат 60х84/16. Бум. офс. №1. Офс. друк
Ум. друк. арк. 1,8. Ум. фарбо-відб. 0,8. Тираж 120 прим. Зам. № 463

ПОД ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11