

НОВИЙ ПІДХІД ДО СФЕРОЇДИЗАЦІЇ ЗАЛІЗНИХ ПОРОШКІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАЗМОТРОНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ОБЕРНЕНОЇ ПОЛЯРНОСТІ ІЗ ЗОВНІШНІМ ВІНОСНИМ ЕЛЕКТРОДОМ

В.М. Коржик, О.С. Терещенко, Д.В. Строгонов, В.С. Петрук, О.Ф. Тищенко, В.Є. Ярош

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

РЕФЕРАТ

У роботі представлено та експериментально обґрунтовано новий підхід до плазмової сфероїдизації порошків нерегулярної форми, який є критично важливим для виробництва сировини для адитивних технологій (3D друку металом). Пропонується використання плазмотрону постійного струму на оберненій полярності із зовнішнім виносним електродом, положення якого можна регулювати під час горіння дуги. Встановлено, що такий підхід дозволяє збільшити робочу напругу і загальну потужність дуги у 3...4 рази (до 100 кВт і більше) та значно збільшити об'єм і довжину плазмового струменя (до 10...180 мм), що значно підвищує ефективність обробки. На прикладі порошку заліза марки ПЖР нерегулярної форми підтверджено можливість та ефективність методу. Після плазмової обробки близько 95 % частинок були оплавлені та сфероїдизовані. Це призвело до значного покращення технологічних властивостей: коефіцієнт сферичності зріс з 0,18...0,20 до 0,86...0,89; текучість порошку підвищилася на 25 % (для фракції –63 мкм) та на 75 % (для фракції 63...160 мкм); насипна щільність зросла на 20...39 %. Результати демонструють, що запропонована конструкція плазмотрона з керованою довжиною дуги є перспективною альтернативою існуючим радіочастотним та дуговим системам і може бути в перспективі ефективно адаптована для сфероїдизації широкого спектра тугоплавких та керамічних порошків. Бібліогр. 27, табл. 1, рис. 8.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: плазмова сфероїдизація, плазмотрон на оберненій полярності, порошки нерегулярної форми, адитивні технології, текучість, коефіцієнт сферичності, порошки

ВСТУП

В останні роки спостерігається безперервне впровадження адитивних технологій друку металом (Metal Additive Manufacturing) у сучасних виробничих процесах у медичній, авіаційній, аерокосмічній, оборонній галузях. Зростаюча популярність 3D друку з використанням технологій Selective Laser Sintering (SLS), Selective Laser Melting (SLM), Electron Beam Melting (EBM) пояснюється такими перевагами над традиційними методами виготовлення як скорочення часу виробництва, зниження собівартості виробництва за рахунок зменшення кількості відходів, можливості створення геометрії заготовок, що неможливо отримати фрезеруванням та прецизійним литтям. Зазначені технології використовують у якості сировини порошкові матеріали з певним комплексом властивостей, що включає в себе високий коефіцієнт сферичності, відсутність закритої пористості та сателітів на поверхні частинок. Крім того, такі порошки, залежно від методу вирощування заготовок, повинні мати вузький гранулометричний склад у межах 20...100 мкм [1, 2]. Так, наприклад, для процесу SLM використовуються порошки вузької фракції 15...45 мкм, для EBM — 45...106 мкм,

для LDED — 45...150 мкм, а для технології PMD фракції 63...160 мкм [3–5].

Галузь адитивного виробництва на сьогодні знаходиться на підйомі і активно розвивається. Якщо за даними досліджень ринку станом на 2022 р. оборот становив порядку 18 млрд. доларів [6], то у 2025 р. він зріс більше ніж на 73 % та має тенденцію до швидкого зростання щороку. Так, за прогнозами аналітиків, доля адитивного виробництва на світовому ринку зростатиме на 20...25 % щороку і збільшиться в 5 разів до 2034 р. (рис. 1) по відношенню до сьогоднішнього обороту [7].

Переважна більшість технологій отримання порошків металів, сплавів, тугоплавких сполук отримують методами електролізу, відновленням з оксидів, карботермічним синтезом, самопоширюваним високотемпературним синтезом (SHS), хімічним осадженням, механічним помелом (у кульових, планетарних, атриторних млинах) і іншими технологіями, при яких форма частинок порошків завжди нерегулярна (гранчаста, пластинчаста, агломератна, губчаста, дендритна, голкоподібна) [8, 9]. Наприклад, цим відрізняються наступні порошки: мідь електролітична (катодна), залізо відновлене, тугоплавкі сполуки, такі як інтерметаліди (NiAl , Ni_3Al , TiAl , NbAl_3 , MoSi_2 , TiSi_2 , NiTi), карбіди (WC , TiC , NbC , Cr_3C_2), бориди (TiB_2 , ZrB_2 , HfB_2), оксиди (Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , TiO_2 , Y_2O_3 , CeO_2 , ThO_2). Причому, для зазначених тугоплав-

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

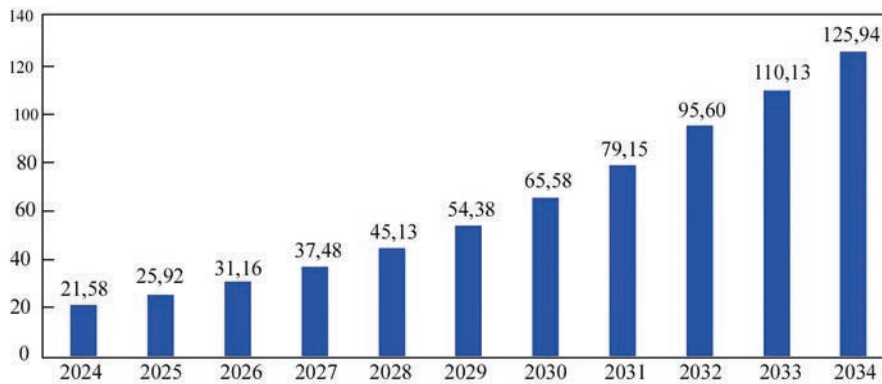


Рис. 1. Тенденції світового ринку адитивних технологій на 2024–2034 рр. [7]

ких сполук не існує методів отримання порошків сферичної форми, що могли б бути використані у адитивних технологіях.

Проблематика розвинутої морфології порошкових частинок в свою чергу полягає у значному погіршенні технологічності порошків, їх текучості, а у випадку порошків, отриманих високоенергетичним розмелом, значно ускладнює їх використання для шарового наплавлення шарів та знижує механічні властивості заготовки через формування пор внаслідок підвищення об'єму укладки [10].

Одним з перспективних методів, що дозволяє отримувати високоякісні порошки з високими технологічними параметрами є плазово-дугове розпилення, проте даний метод має свої вимоги до розпилюваних матеріалів. Так, у випадку розпилення заготовок у вигляді прутків, зазвичай використовують метод розпилення заготовки при її обертанні (плазове розпилення з обертовим електродом — PREP) з швидкістю у десятки тисяч обертів за хвилину, що вимагає високої точності виготовлення заготовки виключно циліндричної форми [11, 12]. У випадку розпилення дрових матеріалів виникає проблема обмеженості номенклатури доступних марок дров, адже не з кожного металевого сплаву можливо виготовити дріт волочінням [13].

Проте, з іншого боку, плазовий дуговий розряд, що горить у інтервалі температур 5000...20000 °C являє собою надзвичайно ефективне джерело нагріву, яке може бути використане для пропускання порошків крізь її стовп, що супроводжується локальним оплавленням частинок та сфероїдизацією їх поверхні внаслідок дії сил поверхневого натягу. Причому, даний метод має широкі можливості керування режимом обробки за рахунок зміни параметрів потужності плазової дуги [14]. З цієї точки зору актуальним є оцінка застосування розробленого авторами даної роботи плазмотрона на оберненій полярності з зовнішнім електродом з функцією

переміщення під час горіння плазової дуги або зміни його положення відносно осі плазмотрона. Це відкриває можливість додаткового збільшення довжини плазового дугового розряду як вздовж його осі, так і перпендикулярно, і, відповідно, підвищення загальної потужності дуги (наприклад, в 3...4 рази при збільшенні відстані між катодом та соплом до 100...180 мм). Відповідно, об'єм плазового струменя при цьому збільшується багатократно, що приводить до збільшення продуктивності, коефіцієнту корисної дії та можливості сфероїдизації порошків відносно крупних фракцій.

Таким чином, переведення нерегулярних порошків (інтерметалідів, сплавів, оксидів, карбідів, боридів, металів тощо) у сферичну форму дає низку критичних переваг для адитивного виробництва, порошкової металургії, напилення і навіть каталітичних систем та різко розширює можливості їх застосування у всіх сферах промисловості, дозволяє отримати дану продукцію з високою доданою вартістю та розширити існуючий ринок порошків, що використовуються у адитивних технологіях.

Плазова сфероїдизація порошків дозволяє: поліпшити сипкість і текучість; досягти вищої насипної густини; забезпечити кращу повторюваність і контроль процесу 3D друку та відтворення фізико-хімічних властивостей вирощених заготовок.

Метою даної роботи є експериментальне підтвердження перспективності застосування нової конструкції плазмотрону на оберненій полярності з керуванням довжиною дуги для сфероїдизації порошків нерегулярної форми на прикладі порошку заліза, а також дослідження морфології та технологічних властивостей порошку після плазової обробки.

Запропонований підхід до обробки порошкових матеріалів є новим та вимагає детального дослідження, що в свою чергу потребує вирішення наступних задач: підтвердити можливість зміни довжини плазової дуги при використанні плаз-

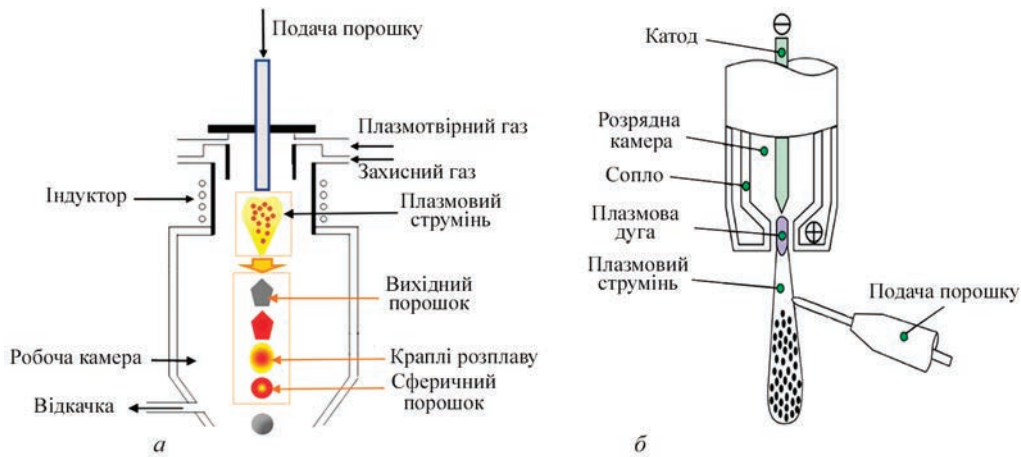


Рис. 2. Схема процесу плазмової сфероїзації порошкових матеріалів: *а* — з використанням радіочастотних плазмотронів; *б* — з використанням дугових плазмотронів на прямій полярності

мотрона на оберненій полярності з виносним електродом та можливістю регулювання відстані між катодом і анодом та встановити вплив зміни цієї відстані на робочу напругу та стабільність горіння плазми; підтвердити можливість сфероїзації порошків нерегулярної форми з використанням плазмотрона на оберненій полярності з регульованою довжиною дуги на прикладі порошку заліза ПЖР, дослідити морфологію та технологічні властивості порошку ПЖР до та після плазмової обробки з використанням запропонованого підходу.

ПОРІВНЯННЯ ВИДІВ ГЕНЕРАТОРІВ ПЛАЗМИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ ДЛЯ СФЕРОЇЗАЦІЇ

На сьогодні існує два основних методи формування плазмового струменя, що застосовуються для оплавлення порошків з розвинутою поверхнею: радіочастотний з плазмотронами, що генерують плазмовий струмінь за допомогою високочастотного електромагнітного поля, що індукується котушкою; дуговий з плазмотронами, що генерують плазмовий струмінь за рахунок електродугового розряду, що горить між електродами, проміжок між якими заповнений плазмотвірним газом.

Перший метод є безелектродним, відрізняється складністю обладнання при меншій щільності енергії плазмового розряду, проте має більший час перебування частинок порошку у плазмовому струмені, виключає можливість забруднення порошків матеріалами електродів та дозволяє використовувати активні гази для формування плазми [15]. Другий метод є більш технологічним, відрізняється високою продуктивністю, проте вносить домішки у оброблюваний продукт та може при цьому працювати з інертними газами або з сумішами інертних газів з домішками реактивних газів [16].

Метод пропускання через плазму, індуковану високочастотним електромагнітним полем, відрізняється відсутністю електродів, а сам плазмовий струмінь утворюється за рахунок пропускання плазмотвірного газу через кварцову трубку, що введена у соленоїд — котушку індуктивності, яка при підключенні до високочастотного джерела живлення генерує радіочастотне електромагнітне поле, що розігріває газ до його іонізації. В той же час, електромагнітне поле соленоїда обтискає плазмовий струмінь концентруючи його енергію. Порошок для обробки за такою схемою подається транспортуєчим газом співвісно з плазмотвірним газом [15, 17].

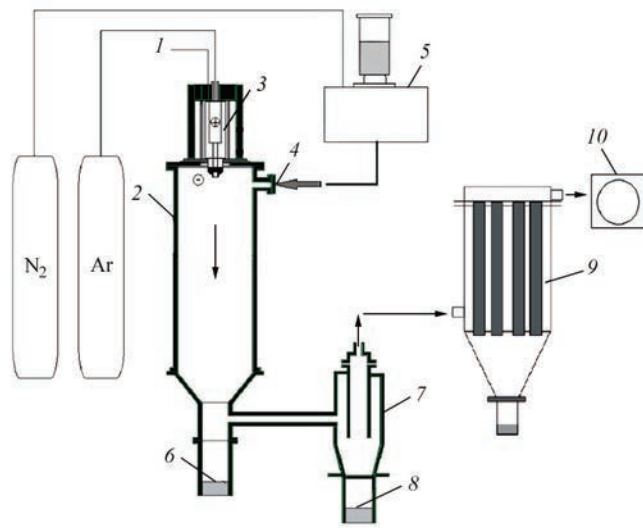
Радіочастотна плазмова обробка має суттєву перевагу — довгий час перебування частинок порошку у плазмі за рахунок невеликої швидкості струменя 10...30 м/с [18] та його більшої довжини в поєднанні з технологічною можливістю введення порошку співвісно з плазмовим струменем. Ці фактори підвищують ефективність та вірогідність сфероїзації, адже всі введені частинки проходять через плазмовий струмінь в обмеженому просторі [11].

Радіочастотний метод широко використовується для сфероїзації порошків нерегулярної форми. Наприклад, канадський виробник Текпа пропонує серійне обладнання для обробки порошків від лабораторних партій в 0,5...1,5 кг/год до промислових у 50 кг/год з плазмотронами потужністю від 15 до 200 кВт [19].

На сьогодні не існує комерційно реалізованих систем сфероїзації порошків, заснованих на дугових плазмотронах. Їх основною областю застосування є плазмове напилення функціональних покриттів завдяки високошвидкісним та надзвучковим плазмовим струменям, що отримують з використанням сопел, діаметр проходу яких в рази менше за діаметр трубки радіочастотних плазмотронів. Втім, на відміну від високочастот-



а



б

Рис. 3. Загальний вид установки для плазмової сфероїдизації Tekna TEKSPHERO-80, а також її схематичне зображення: 1 — камера плазмотрона; 2 — камера реактора; 3 — плазмотрон; 4 — ввід порошку у плазмовий струмінь; 5 — порошковий живильник; 6 — оброблений порошок (крупний); 7 — сепаратор типу циклон; 8 — оброблений порошок (дрібний); 9 — рукавний фільтр; 10 — витяжний вентилятор

них плазмових систем, дугові відрізняються простішим технологічним обладнанням та можливістю отримання плазмової дуги потужністю у сотні кіловат, що потенційно може використовуватися для обробки порошкових матеріалів. На додачу до цього, вартість отримання 1 кВт потужності на дугових плазмотронах у три рази дешевша, ніж на радіочастотних [17].

Схематично процес пропускання порошків через плазмовий струмінь за обома описаними підходами наведено на рис. 2.

Додатковою перевагою дугових плазмотронів є електродна схема, що в залежності від конструкції плазмотрона дозволяє реалізувати роботу як на прямій, так і на оберненій полярності. Використання схеми роботи з прямою полярністю відрізняється режимом горіння дугового заряду між внутрішнім електродом та соплом всередині плазмотрона, що обумовлює високу щільність енергії плазмового струменя і, одночасно, неможливість отримання плазмового струменя великої довжини та перерізу через малий дуговий проміжок.

З іншої сторони, перспективним для задач плазмово-дугової обробки порошків є режим роботи на оберненій полярності, що відрізняється від прямої полярності відносно вільним переміщенням та прив'язуванням анодної плями по верхній електрода, що при наявності зовнішнього електрода та газового потоку з великою витратою плазмотвірного газу дозволяє розтягувати дугу та збільшувати тим самим її напругу, і, відповідно, потужність дугового розряду та довжину плазмового струменя [20].

Автори даної статті, беручи за основу плазмотрон постійного струму зі схемою роботи на оберненій полярності, запропонували використання зовнішнього виносного катода спеціальної конструкції з механізмом для переміщення, що дозволяє регулювати довжину плазмового струменя в широких межах та може використовуватися для ефективної сфероїдизації порошків нерегулярної форми.

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЛАЗМОВОЇ ОБРОБКИ ПОРОШКІВ НЕРЕГУЛЯРНОЇ ФОРМИ

Підхід до отримання сферичних порошків шляхом переплавлення або оплавлення при пропусканні через стовп плазмової дуги відомий з 1978 р., коли він був описаний в патенті US 4076640A компанії Херох Сорг. Винахідники Рудольф Хагенсі та Роберт Дж. Хагенбах запропонували використання енергії плазмової дуги для сфероїдизації подрібненого магнетиту та інших феромагнітних руд з метою отримання порошків, що використовуються в плотерах для електростатичного друку. Їх установка являла собою вертикальний реактор довжиною 6700 мм і діаметром 915 мм з конусом для збирання порошку в нижній частині, плазмотроном з трьома графітовими анодами, системою подачі плазмотвірного газу (аргону), вводом для подачі вихідного порошку азотом та відводом на циклони та рукавні фільтри для очистки відпрацьованих газів та видалення дрібних фракцій і пилу.

Протягом 1980–1990-х рр. енергія плазмової дуги почала застосовуватися у процесах синтезу нових матеріалів, в яких отримання сферичних частинок при оплавленні або конденсації через

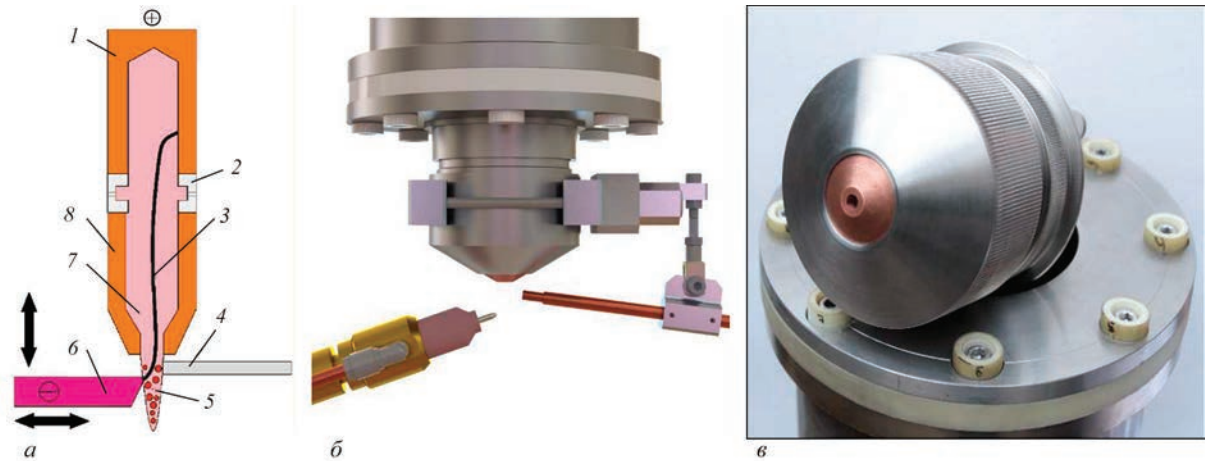


Рис. 4. Схема процесу плазмово-дугової сфероїзації металевих порошків нерегулярної форми (а), 3D модель (б) та зовнішній вид вузла розпилення з плазмотроном (в) для реалізації зазначеного процесу: 1 — мідний пустотілий електрод (анод); 2 — ізолятор-завихрювач; 3 — плазмова дуга; 4 — трубка подачі порошку у стовп дуги; 5 — порошок; 6 — вольфрамовий зовнішній електрод (катод); 7 — плазмовий струмінь; 8 — сопло

газову фазу було другорядним ефектом, якому не надавали значення. Потенціал плазмової дуги як інструменту для отримання сферичних порошків та сфероїзації розкрився тільки з початком розвитку адитивних технологій для 3D друку металевими порошками [21–23].

Загалом сучасна система плазмової сфероїзації порошкових матеріалів включає в себе плазмотрон, що монтується вертикально на герметичну камеру реактора, порошковий живильник, систему подачі плазмотвірного та транспортуючого газів, збірник оплавленого порошку, комплекс циклонів та фільтрів для відділення дрібних фракцій порошків, що виносяться з відпрацьованими газами. Загальний вид устаткування для сфероїзації порошків на прикладі комерційно реалізованої системи виробництва компанії Tekna (Канада) наведено на рис. 3 [24, 25].

Як видно з наведеної схеми, обладнання для сфероїзації мінімально відрізняється від установок для плазмово-дугового розпилення дрових матеріалів в контрольованому середовищі. Основною відмінністю є вузол введення та подачі порошку, що обробляється.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для реалізації запропонованого підходу було використано плазмотрон з мідним пустотілим електродом оригінальної конструкції Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, розроблений для експлуатації на оберненій полярності з використанням зовнішнього виносного електрода спеціальної конструкції та радіальною подачею порошку під зріз плазмотрона.

Експерименти виконували на технологічному обладнанні для плазмово-дугового розпилення виробництва ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) на установ-

ці «PLAZER 180 PL S» з встановленням виносного електрода на двохосьовий маніпулятор для регулювання відстані між кінцем електрода та соплом у координатах x та z . Конструкція виносного електрода включає вузол подачі захисного газу (аргону) та модуль водяного охолодження для забезпечення тепловідведення від вольфрамового електрода.

Сила струму у процесі обробки становила 200 А при початковій напрузі дуги 120...140 В та використанні аргону як плазмотвірного газу з витратою 30...50 л/хв. Витрата захисного газу для виносного електрода становила 15...25 л/хв.

Схема процесу плазмово-дугової обробки порошків нерегулярної форми та обладнання для цього наведені на рис. 4.

Перед введенням порошку в плазмовий струмінь запалювали основну плазмову дугу при відстані між соплом та зовнішнім катодом у діапазоні 15...20 мм, після чого катод відводили вбік на 20...50 мм та опускали вниз відносно початкового положення на 30...180 мм (рис. 5). Відповідно, при цьому збільшується об'єм основного плазмового струменя та формується другий струмінь, що горить радіально до основного.

Досліди зі сфероїзації проводили на залізних порошках марки ПЖР (ГОСТ 9849–86), отриманих методом розпилення розплаву водою. Дані порошки були класифіковані на ситах, а для дослідів відібрані порошки фракцій –63 мкм та –100+160 мкм. Порошки вводили у плазмовий струмінь нижче зрізу сопла плазмотрона під кутом 30° до нормалі. Сфероїзацію проводили на повітрі зі збором порошку у воду з відстані 500 мм. Загальний вигляд плазмової обробки порошку наведено на рис. 6.

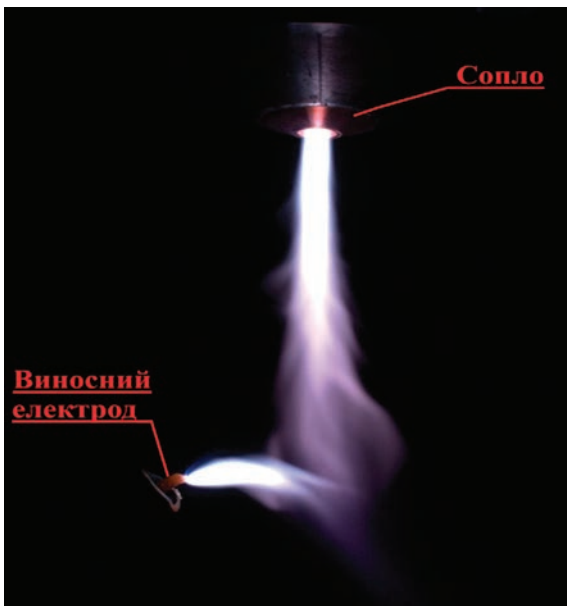


Рис. 5. Зовнішній вигляд розтягнутого плазмового розряду, довжина дуги 180 мм

Гранулометричний склад вихідних та сфероїдизованих порошків визначали методом ситового аналізу згідно з методикою ISO 2591-1:1988 на ударному ситовому аналізаторі «АС 200У (РОТАП)» (Україна) з комплектом сит з розмірами комірок 25...250 мкм, маса проби складала не менше 200 г порошку.

Морфологію вихідних та сфероїдизованих порошків досліджували з використанням зображень, отриманих з використанням скануючого електронного мікроскопу «Tescan VEGA3 EasyProbe» (Чехія) та їх наступною обробкою та аналізом з використанням програмного забезпечення «ImageJ» (США) за методикою, описаною у роботі [26].

Текучість порошку визначали за допомогою приладу Холла згідно з методикою, наведеною у стандарті ASTM B213 20 «Standard Test Methods

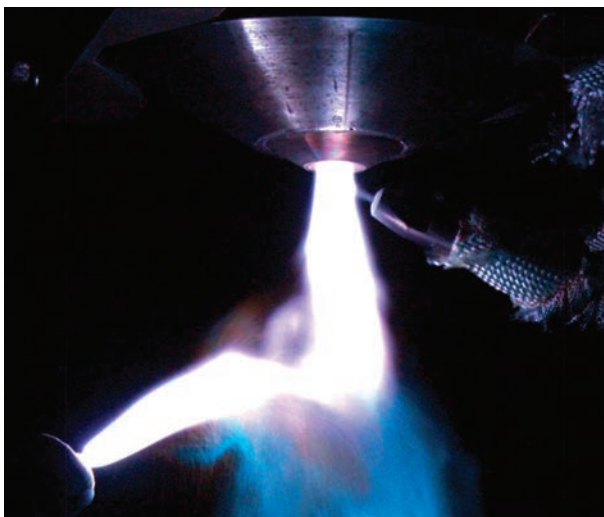


Рис. 6. Зовнішній вигляд процесу плазмової сфероїдизації на повітрі

for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel».

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

У ході досліджень було встановлено, що при відведенні виносного катода вниз відносно осі основного плазмового струменя робоча напруга збільшується від початкових 120...140 до 300...350 В, а при використанні спеціальних джерел живлення з великим холостим ходом — до 400...500 В. Тобто, загальна потужність процесу може бути збільшена від 24 до 100 кВт і більше, залежно від можливостей джерела живлення, що в перспективі має підвищити ефективність процесу за рахунок збільшення потужності та загального об'єму отриманої плазми в десятки разів. Так, при використанні запропонованого підходу, порошок, що вводиться під зріз сопла плазмотрона, знаходитиметься у плазмовому струмені набагато довше, ніж при стандартній схемі плазмово-дугової обробки з дугою довжиною 30...50 мм. При цьому, за рахунок великого об'єму плазми, вірогідність високотемпературної обробки всіх частинок порошку, що вводяться у струмінь, може бути наближеною до такої у процесі сфероїдизації у радіочастотній плазмі з осью подачею порошку. Передбачається, що запропонований процес буде ефективним для обробки порошків з широким гранулометричним складом і може бути застосований для сфероїдизації керамічних порошків та інших тугоплавких матеріалів.

Крім того встановлено, що відведення виносного катода по горизонталі відносно сопла плазмотрона дозволяє багатократно підвищити ресурс вольфрамового електрода, який виводиться з стовпа основного плазмового струменя та має ефективний газовий захист, забезпечений конструктивним рішенням у вигляді пальника для ТІГ зварювання. Так, під час початку процесу спостерігається оплавлення торця катода, проте після виведення з зони горіння основного плазмового струменя на відстань від 20 мм катод залишається холодним, а дуга жорстко прив'язується до катодного п'ятна на кінчику електрода, а на вильоті електрода спостерігається процес катодної очистки. Таким чином, зношування матеріалу катода відбувається переважно за механізмом електроерозії, до якої вольфрам має високу стійкість [27].

Дослідження морфології порошків ПЖР показали, що вихідні порошки являють собою конгломерати нерегулярної форми з розвинутою поверхнею (рис. 7, а, б). Після проходження плазмової оброб-

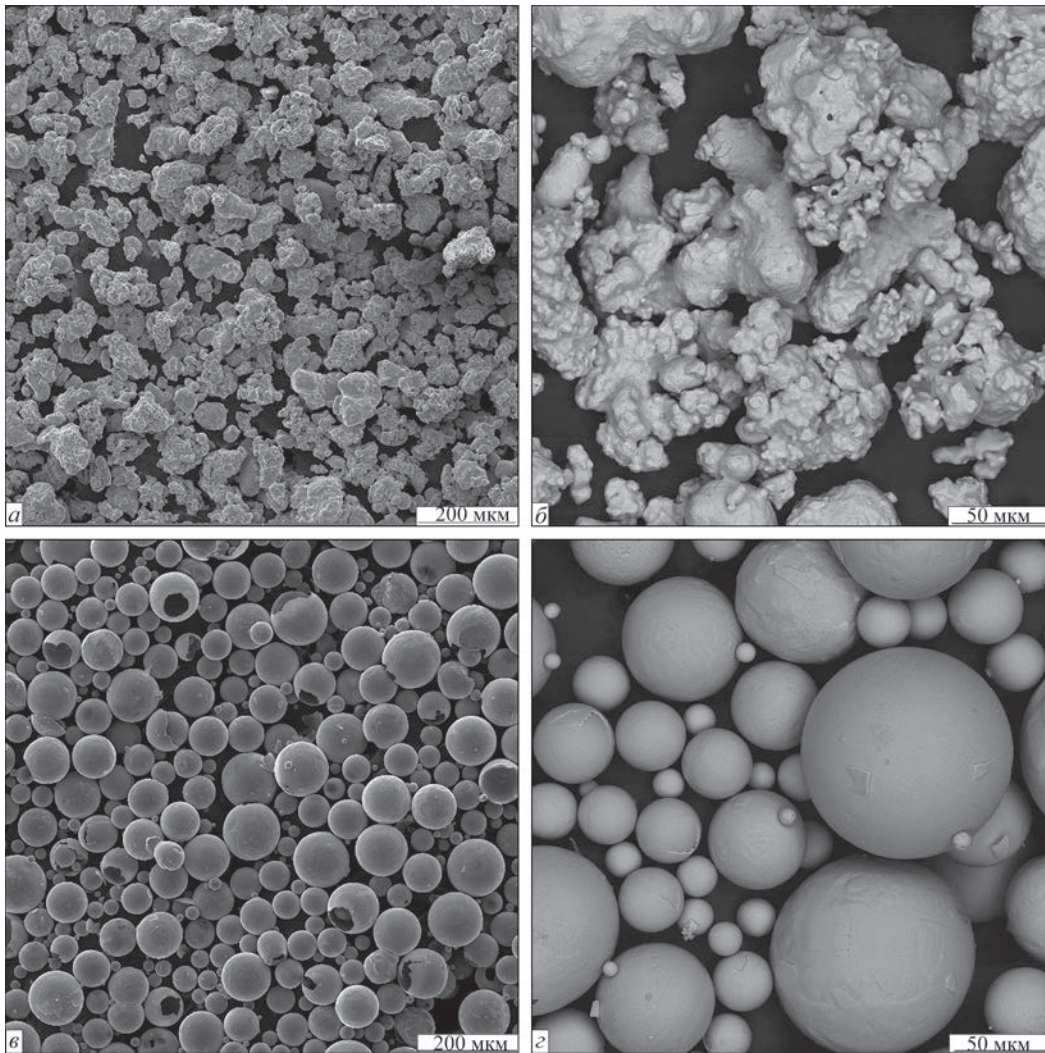


Рис. 7. Зовнішній вигляд порошку ПЗР до (а, б) та після (в, г) плазмової сфероїдизації

ки зібрані порошки демонструють високий ступінь сфероїдизації: більше 95 % частинок було оплавлено та сфероїдизовано (рис. 7, в, г). При цьому, певна кількість частинок відрізняється пустотілістю — характерним дефектом при розпиленні у повітряну атмосферу. Краплі розплаву інтенсивно окислюються у наслідок інтенсивної хімічної взаємодії з киснем та азотом, що входять до складу повітря та сфероїдизуються із ізолюванням захоплених газів всередині металевої оболонки при швидкому охолодженні при входженні у воду. Використання герметичного реактора з попередньою вакуумною очисткою атмосфери і наступним заповненням аргонном вирішить проблему з формуванням пористості та окисленням частинок.

Крім того, спостерігається ефект руйнування конгломератів з формуванням дрібних частинок, що були їх складовими. Тобто, при проходженні через плазмовий струмінь, частинки порошку розплавлялися та розбивалися плазмовим струменем.

Результати дослідження технологічних властивостей порошків (таблиця) показали значне по-

кращення текучості обробленого порошку. Так, текучість фракції 63...160 мкм підвищилася на 75 %, а текучість порошку класу –63 мкм стала краще на 25 %. Насипна щільність при цьому зростає на 20 % для класу –63 мкм та на 39 % для фракції 63...160 мкм.

Аналіз мофрології порошку на отриманих зображеннях у програмному продукті ImageJ показав, що коефіцієнт сферичності порошку після плазмової обробки у порівнянні з вихідним зростає від 0,2 до 0,86 для фракції –63 мкм та від 0,18 до 0,89 для фракції 63...160 мкм.

Отримані результати демонструють перспективність використання запропонованого підходу до сфероїдизації порошків плазмово-дуговим методом з використанням плазмотронів на зворотній полярності з керованою довжиною дуги та можуть бути адоптованими до камер для плазмово-дугового розпилення дрових матеріалів з використанням додаткових вузлів введення порошку та герметичних ввідів лінійного переміщення виносного катода.

Порівняння технологічних властивостей вихідного та сфероїдизованого порошку ПЖР

Порошок	Фракція, мкм	Текучість, с/50г	Насипна щільність, г/см ³	Коефіцієнт сферичності
Вихідний ПЖР	-63	29,1	2,47	0,2
	+63; -160	31,6	2,65	0,18
Сфероїдизований	-63	24,0	2,98	0,86
	+63; -160	18,0	3,68	0,89



Рис. 8. Горизонтальна камера плазмово-дугового розпилення порошкових матеріалів

Для прикладу наводимо рис. 8, на якому зображено дослідну модульну установку ІЕЗ ім. Є.О. Патона для плазмово-дугового розпилення порошків з можливим дооснащенням порошковим живильником.

ВИСНОВКИ

В даній роботі було запропоновано підхід до використання плазмотрона на оберненій полярності з зовнішнім виносним електродом з можливістю регулювання відстані між анодом і соплом по горизонталі та по вертикалі як високоефективного джерела плазми, тепло якої може використовуватися для сфероїдизації порошків нерегулярної форми.

У ході досліджень було встановлено, що використання плазмотрона на оберненій полярності з зовнішнім катодом, положення якого відносно осі плазмотрона може регулюватися під час горіння плазмової дуги, дозволяє збільшити загальну потужність дуги в 3...4 рази при збільшенні відстані між катодом та соплом до 100...180 мм. Відповідно, об'єм плазмового струменя при цьому збільшується багатократно. В той же час відведення катода по горизонталі на відстань від 20 до 50 мм сприяє ефективному захисту вольфрамового електрода від оплавлення з одночасною катодною очи-

сткою поверхні. При цьому, відведення катода як по вертикалі, так і по горизонталі не впливає на стабільність горіння плазмового струменя.

На прикладі порошку заліза ПЖР було підтверджено можливість та ефективність сфероїдизації металевих порошків нерегулярної форми з використанням плазмотрона на оберненій полярності з регульованою довжиною дуги. Дослідження морфології та текучості порошку ПЖР до і після плазмової обробки показали, що близько 95 % частинок порошку проходять через плазмовий струмінь з розплавленням та наступною сфероїдизацією крапель розплаву. Причому встановлено, що плазмова обробка сприяє руйнуванню конгломератної структури вихідного порошку зі збільшенням кількості дрібних частинок, що були складовими конгломератів. Оброблені порошки відрізняються коефіцієнтом сферичності 0,86...0,89 на противагу сферичності вихідного порошку з коефіцієнтом 0,18...0,20. Покращення сферичності сприяло збільшенню текучості порошку на 75 % для класу 63...160 мкм та на 25 % для класу -63 мкм. Насипна щільність при цьому також зростає на 20 % для класу -63 мкм і на 39 % для фракції 63...160 мкм. В той же час встановлено, що частина отриманих порошків має закрити пористість через швидке

оохолодження крапель розплаву з ізолюванням захопленого газу, що пояснюється особливостями плазмової обробки на повітрі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

1. Armstrong, M., Ahmad, M. et al. (2022) An overview of modern metal additive manufacturing technology. *J. of Manufacturing Processes*, **84**, 1001–1029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.060>
2. Moghimian, P., Poirié, T., Habibnejad-Korayem, M. et al. (2021) Metal powders in additive manufacturing: A review on reusability and recyclability of common titanium, nickel and aluminum alloys. *Additive Manufacturing*, **43**, 102017, 14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102017>.
3. Ahn, D. (2021) Directed energy deposition (DED) process: State of the art. *Inter. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*, **8**, 703–742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
4. Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B. et al. (2021) Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, **49**, 271–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mat-tod.2021.03.020>
5. King, W., Anderson, A., Ferencz, R. et al. (2015) Laser powder bed fusion additive manufacturing of metals; physics, computational, and materials challenges. *Applied Physics Reviews*, **2**, 041304. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4937809>
6. (2025) *Additive Manufacturing Market Size, Share & Trends Analysis Report by Component, by Printer Type, by Technology, by Software, by Application, by Vertical, by Material, by Region-Global Industry Analysis, Share, Growth, Regional Outlook and Forecasts, 2023–2032*. <https://www.novaoneadvisor.com/report/additive-manufacturing-market>
7. (2025) *Additive Manufacturing Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034*. <https://www.precedenceresearch.com/additive-manufacturing-market>
8. Antony, L.V.M., Reddy, R.G. (2003) Processes for production of high-purity metal powders. *JOM*, **55**, 14–18. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-003-0153-4>
9. Zach, M., Brashear, D., Duran, J. et al. (2023) Spherical powders: Control over the size and morphology of powders for additive manufacturing and enriched stable isotope nuclear targets. *EPJ Web Conference*, **285**, 03002. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202328503002>
10. Mostafaei, A., He, Y., Ghiaasiaan, R. et al. (2022) Defects and anomalies in powder bed fusion metal additive manufacturing. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **26**, 100974. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2021.100974>
11. Korzhyk, V., Kulak, L., Shevchenko, V. et al. (2017) New equipment for production of super hard spherical tungsten carbide and other high-melting compounds using the method of plasma atomization of rotating billet. *Materials Science Forum*, **898**, 1485–1497. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.898.1485>
12. Fan, X., Tian, Q., Chu, X. et al. (2024) Microstructure and mechanical properties of Co_{31.5}Cr₇Fe₃₀Ni_{31.5} high-entropy alloy powder produced by plasma rotating electrode process and its applications in additive manufacturing. *J. of Materials Research and Technology*, **31**, 1924–1938. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.06.217>
13. Skolyszewski, A., Łuksza, J., Paćko, M. (1996) Some problems of multi-stage fine wire drawing of high-alloy steels and special alloys. *J. of Materials Processing Technology*, **60**, 155–160. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02321-7](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02321-7)
14. Sehhat, H., Chandler, J., Yates, Z. (2021) A review on ICP powder plasma spheroidization process parameters. *Inter. J. of Refractory Metals and Hard Materials*, **103**, 105764. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105764>
15. Dignard, N., Boulos, M. (2000) Powder spheroidization using induction plasma technology. In: *Proc. of the Inter. Thermal Spray Conf.*, 887–893. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2000p0887>
16. Ma, Y., Ke, W., Yang, K., Zhu, X. (2022) Investigation on spheroidization of refractory tungsten powders by laminar DC plasma torch. *Materials Research Express*, **9(11)**, 7. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aca243>.
17. Getto, E., Santucci, J., Gibbs, R.J. et al. (2023). Powder plasma spheroidization treatment and the characterization of microstructure and mechanical properties of SS 316L powder and L-PBF builds. *Heliyon*, **9(6)**, e16583. 21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16583>
18. Boulos, M. (2012) New frontiers in thermal plasmas from space to nanomaterials. *Nuclear Engineering and Technology*, **44(1)**, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.5516/NET.77.2012.001>
19. <https://www.tekna.com/spheroidization-systems>
20. Iovane, P., Borriello, C., Pandolfi, G. et al. (2024) Thermal plasma spheroidization and characterization of stainless steel powders using direct current plasma technology. *Plasma*, **7(1)**, 76–90. DOI: <https://doi.org/10.3390/plasma7010006>
21. Yin, Z., Yu, D., Zhang, Q. et al. (2021) Experimental and numerical analysis of a reverse-polarity plasma torch for plasma atomization. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, **41**, 1471–1495. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10181-8>
22. Taylor, P.R., Pirzada, S.A. (1994) Thermal plasma processing of materials: A review. *Advanced Performance Materials*, **1**, 35–50. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00705312>
23. Pfender, E. (1988) Thermal plasma processing in the nineties. *Pure and Applied Chemistry*, **60(5)**, 591–606. DOI: <https://doi.org/10.1351/pac198860050591>
24. <https://www.tekna.com/spheroidization-systems-teksphero-80>
25. Boulos, M. (2004) Plasma power can make better powders. *Metal Powder Report*, **59(5)**, 16–21. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0026-0657\(04\)00153-5](https://doi.org/10.1016/s0026-0657(04)00153-5)
26. Li, X., Cui, L., Shonkwiler, S. et al. (2023) Automatic characterization of spherical metal powders by microscope image analysis: A parallel computing approach. *J. Iron Steel Res.*, **30**, 2293–2300. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00907-z>.
27. Samsonov, G.V., Mukha, I.M., Globa, L.V. (1969) Theory and production technology of electrode tool materials for electroerosion processing. *Powder Metall. Met. Ceram.*, **8**, 732–737. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00776013>

A NEW APPROACH TO SPHEROIDIZATION OF IRON POWDERS USING A REVERSE POLARITY DC PLASMA TORCH WITH AN EXTERNAL REMOTE ELECTRODE

V.M. Korzhyk, O.S. Tereshchenko, D.V. Strogonov, V.S. Petruk, O.F. Tyshchenko, V.E. Yarosh

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine

ABSTRACT

The paper presents and experimentally substantiates a new approach to plasma spheroidization of irregularly shaped powders, which is critically important for the production of raw materials for additive technologies (3D metal printing). It is proposed to use a reverse polarity DC plasma torch with an external remote electrode, the position of which can be adjusted during the arc discharge. It was found that this approach allows raising the operating voltage and the total arc power by 3–4 times (up to 100 kW and more) and significantly increasing the volume and length of the plasma jet (up to 100...180 mm), which markedly improves the processing efficiency. The feasibility and effectiveness of the method were confirmed using the example of irregularly shaped PZrH iron powder. After plasma treatment, about 95 % of the particles were melted and spheroidized. This led to a significant improvement in technological properties: the sphericity coefficient increased from 0.18...0.20 to 0.86...0.89; the powder flowability increased by 25 % (for the –63 μm fraction) and by 75 % (for the 63...160 μm fraction); the bulk density increased by 20...39 %. The results demonstrate that the proposed design of a plasma torch with a controlled arc length is a promising alternative to existing radio frequency and arc systems, and it can be effectively adapted in the future for spheroidization of a wide range of refractory and ceramic powders. 27 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

KEYWORDS: plasma spheroidization, reverse polarity plasma torch, irregularly shaped powders, additive technologies, flowability, sphericity coefficient, powders

ORCID

В.М. Коржик — <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, О.С. Терещенко — <http://orcid.org/0009-0003-4021-0758>, Д.В. Строгонов — <http://orcid.org/0000-0003-4194-764X>, Петрук В.С. — <http://orcid.org/0000-0003-0742-0131>, О.Ф. Тищенко — <http://orcid.org/0009-0002-1883-1219>, В.Є. Ярош — <http://orcid.org/0009-0009-2340-4300>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

В.М. Коржик

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

E-mail: vn@paton.kiev.ua

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

В.М. Коржик, О.С. Терещенко, Д.В. Строгонов, В.С. Петрук, О.Ф. Тищенко, В.Є. Ярош (2026) Новий підхід до сфероїзації залізних порошків із використанням плазмотрона постійного струму оберненої полярності із зовнішнім виносним електродом. *Сучасна електрометалургія*, 01, 17–26.

DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.01.03>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Отримано 05.12.2025

Отримано у переглянутому вигляді 06.02.2026

Затверджено до друку 31.03.2026

Оприлюднено 14.04.2026

