

ОТРИМАННЯ СФЕРИЧНОГО ПОРОШКУ ТИТАНУ ДЛЯ 3D ДРУКУ ПЛАЗМОВО-ДУГОВИМ РОЗПИЛЕННЯМ ДРОТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В.М. Коржик¹, Д.В. Строгонов¹, О.С. Терещенко¹,
О.В. Ганущак¹, А.Ю. Тунік¹, В.А. Костін¹, С.Л. Чигілейчик², В.К. Юлюгін¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vnkorzhyk@gmail.com
²АТ «Івченко-Прогрес». 69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2

Експериментально підтверджена можливість отримання сферичного порошку титану шляхом застосування технології плазмово-дугового розпилення дроту компактного перерізу марки Cr-Ti Grade 2 діаметром 1,0 та 1,6 мм. Аналіз гранулометричного складу порошку показав, що у випадку розпилення титанового дроту діаметром 1,0 мм основною фракцією є фракція 140 мкм, яка складає 96 % від загальної маси порошку, де кількість дрібнодисперсної фракції 63 мкм складає до 60 мас. %, а у випадку дроту діаметром 1,6 мм основною фракцією є фракція 200 мкм, яка складає 95 мас. %, а кількість дрібнодисперсної фракції 63 мкм не перевищує 38 мас. %. Виконано дослідження параметрів форми титанового порошку, яке показало, що більшість часток має правильну сферичну форму з середнім коефіцієнтом сферичності близьким до 0,9, кількість часток з сателітами та часток неправильної форми не перевищує 1 мас. %, що обумовлює високі технологічні властивості отриманого порошку, які знаходяться на рівні з іншими промисловими технологіями отримання сферичних порошків методами плазмового та газового розпилення. Досліджено хімічний та фазовий склад розпиленого порошку, з'ясовано, що фазовий склад складається з α -Ti, а хімічний склад відповідає стандарту ASTM B 348-05. Показано, що використання технології плазмово-дугового розпилення дроту із титану дозволяє отримувати сферичні порошки, які можуть бути застосовані у якості витратних матеріалів для 3D друку виробів для авіаційної, ракетно-космічної, медичної, енергетичної та хімічної галузей методами електронно-променевого плавлення (EBM), прямого лазерного (LDED) та плазмового вирощування (PMD). Бібліогр. 22, табл. 4, рис. 4.

Ключові слова: плазмово-дугове розпилення, дріт, компактний переріз, титан, сферичність, порошки, 3D друк

Вступ. Останнім часом у зв'язку з інтенсивним розвитком авіаційної, ракетно-космічної, медичної, енергетичної та хімічної галузей виникає значна потреба у виготовленні об'ємних деталей складної форми титану та його сплавів, переважно за допомогою адитивних технологій 3D друку [1, 2].

До основних адитивних технологій вирощування виробів із титану та його сплавів слід віднести: селективне лазерне плавлення і спікання (SLM — Selective Laser Melting, SLS — Selective Laser Sintering), електронно-променево плавлення (EBM Electron Beam Melting), методи прямого лазерного (LDED — Laser Direct Energy Deposition) та плазмового вирощування (PMD — Plasma Metal Deposition) тощо. Всі ці методи у якості витратних матеріалів для формування адитивних шарів використовують спеціалізовані сферичні порошки (переважно дрібнодисперсні), до яких висувуються суворі вимоги до гранулометричного складу, форми, їх фізико-хімічних та технологічних властивостей. Так, наприклад, для процесу SLM використовуються порошки вузької фракції 15...45 мкм, EBM — 45...106 мкм,

для LDED — 45...150 мкм, а для технології PMD — фракції 63...160 мкм [3–5]. Окрім цього зазначені порошки повинні мати сферичну форму з мінімальною кількістю зовнішніх (сателіти) та внутрішніх (пори) дефектів, хороші технологічні властивості (високу текучість, насипну щільність, коефіцієнт сферичності та ін.) та низький вміст газових сумішей, що забезпечує високу щільність пакування адитивних шарів, зменшення пористості та підвищення механічних властивостей кінцевого виробу [6–8].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. На даний час найбільш розповсюдженою технологією отримання порошків титану для адитивного виробництва є газове розпилення розплаву (VIGA Vacuum Inert Gas Atomization). Попри ряд переваг, описаних у роботах [9, 10], зазначена технологія має ряд суттєвих недоліків, а саме [10–13]: наявність значної кількості сателітів і часток неправильної форми, більш низький коефіцієнт сферичності для способів газового розпилення розплаву, що обумовлює низькі показники текучості (особливо для дрібнодисперсної фракції

В.М. Коржик — <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Д.В. Строгонов — <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>,
О.С. Терещенко — <http://orcid.org/0009-0003-4021-0758>, О.В. Ганущак — <https://orcid.org/0000-0003-4392-6682>,
А.Ю. Тунік — <https://orcid.org/0000-0001-6801-6461>, В.А. Костін — <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>,
С.Л. Чигілейчик — <https://orcid.org/0000-0002-2372-9078>, В.К. Юлюгін — <https://orcid.org/0009-0000-8377-6725>

© В.М. Коржик, Д.В. Строгонов, О.С. Терещенко, О.В. Ганущак, А.Ю. Тунік, В.А. Костін,
С.Л. Чигілейчик, В.К. Юлюгін, 2025

<63 мкм) і призводить до формування дефектів у наплавлених шарах; наявність внутрігранульної аргонової пористості для порошків, отриманих за технологією газового розпилення, яку в деяких випадках неможливо усунути за допомогою подальшої холодної або гарячої обробки тиском; високу собівартість виготовлення порошків газовим розпиленням, оскільки показник «gas to metal ratio» (витрати (m^3) розпилюючого газу (аргону), необхідного для отримання 1 кг порошку) може складати 26...110.

Також значне поширення набула технологія відцентрового плазмового розпилення заготовки, що обертається (PREP Plasma Rotating Electrode Process), в якій плазмовим струменем розплавляється поверхневий шар торця заготовки, що обертається, а розпилення розплаву здійснюється за рахунок відцентрових сил. Однак даний метод також має ряд суттєвих обмежень, тому що експлуатація обладнання PREP пов'язана зі значними складнощами отримання фракції 106 мкм, для досягнення виходу зазначеної фракції більше 40 мас. % існує необхідність суттєвого підвищення швидкості обертання заготовки (більше 30000 об/хв), що ускладнює і так непросту кінематичну схему установки (необхідне зниження рівня вібрацій, проектування складних підшипникових систем та ін.). Також сюди можна віднести труднощі, пов'язані з виготовленням циліндричної заготовки з точними розмірами, яка повинна бути відшліфована з високою точністю [12].

В цьому аспекті відкриваються перспективи отримання сферичних порошків за допомогою технологій, у яких в якості вихідних матеріалів використовуються дроти або прутки (зливки), а процеси нагріву, розплавлення і диспергації розплаву здійснюються плазмовими струменями без використання відцентрових сил, високооборотистого обладнання із складною кінематичною схемою. До таких технологій відноситься процес плазмово-дугового розпилення, який відрізняються гнучкістю та може використовуватися для отримання порошків з широкого класу матеріалів (заготовок), які або випускаються промисловістю (дроти, прутки), або можуть бути отримані у вигляді злиwkів ливарними методами [13, 14].

Наразі у зв'язку з переходом адитивного виробництва в Україні на новий рівень, для його розширення і забезпечення витратними матеріалами в повній мірі, особливо через інтенсивний розвиток авіаційної та ракетно-космічної галузей, необхідна розробка вітчизняної технології та обладнання для отримання дрібнодисперсних сферичних порошків,

особливо з фракційним складом — 63 мкм, що є актуальною науково-технічною задачею.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є аналіз можливості та оцінка перспективності використання процесу плазмово-дугового розпилення титанового дроту Cp-Ti Grade 2 діаметром 1,0 та 1,6 мм для подальшої розробки вітчизняної технології і обладнання отримання сферичних порошків для 3D друку. Для досягнення цієї мети необхідно: дослідити гранулометричний склад, морфологію, мікроструктуру, технологічні властивості та хімічний і фазовий склад порошку, отриманого за допомогою технології плазмово-дугового розпилення титанового дроту Cp-Ti Grade 2; надати висновки щодо можливості використання отриманих сферичних порошків для 3D друку методами селективного лазерного (SLM) і електронно-променевого (EBM) плавлення, селективного лазерного спікання (SLS), прямого лазерного (LDED) та плазмового (PMD) вирощування.

Матеріали та методика досліджень. *Методика розпилення дроту та визначення фракційного складу порошку.* Експерименти виконували на технологічному обладнанні для плазмово-дугового розпилення дрових матеріалів «PLAZER 50-PL-W» (виробник ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР», Україна) [15] при застосуванні дослідного плазмотрону з мідним пустотілим електродом, що працює за схемою дуга непрямої дії (рис. 1, а, б) [16]. Технологія плазмово-дугового розпилення дрових матеріалів (РА — Plasma Atomization) добре описана у роботах [17–19] і в загальному випадку полягає у плавленні дроту, що вводиться у зону витікання плазмового струменя під зріз сопла плазмотрону та подальшого дроблення шару розплаву, що формується на торці розпилюваного дроту. Даний метод передбачає формування високошвидкісного (у деяких випадках надзвукового) плазмового струменя, що значно збільшує динамічний напір на диспергований розплав і призводить до його інтенсивного фрагментування, що у свою чергу створює умови для отримання оптимального гранулометричного складу дисперсної фази.

Плазмово-дугове розпилення дроту виконували у лабораторній камері розпилення в середовищі аргону відповідно до методики [20], де перед його напуском здійснювали відкачування внутрішнього об'єму камери до залишкового тиску $5...7 \cdot 10^{-3}$ Торр, значення якого контролювали за допомогою термпарного манометричного перетворювача «ПМТ-2» (Україна) та іонізаційно-термпарного вакууметра «ВИГ-2» (Україна).

Параметри режиму плазмово-дугового розпилення нейтрального дроту складали: сила стру-

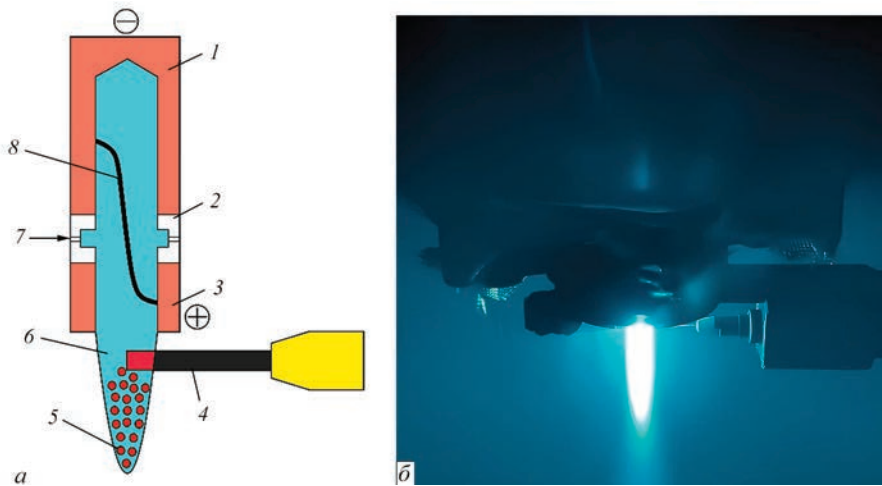


Рис. 1. Схема (а) та візуалізація (б) процесу плазмово-дугового розпилення титанового дроту Cr-Ti Grade 2 у камері розпилення

му — 300 А, робоча напруга дуги — 140 В, витрата плазмоутворюючого газу — 15 м³/год, швидкість подачі дроту — 3...7 м/хв, відстань від торця сопла плазмотрона до розпилюваного дроту — 4 мм. Плазмоутворюючим газом був аргон вищого ґатунку ІІ згідно ISO 14175–2008.

Прийнятні режими розпилювання визначали за досягнення плазмовим струменем мінімального кута розкриття та стабільності процесу при плавленні розпилюваного дроту в осевій зоні плазмового струменя.

Гранулометричний склад лабораторних партій порошоків встановлювали методом ситового аналізу згідно з методикою ISO 2591-1:1988 на ударному ситовому аналізаторі «АС 200У (РОТАП)» (Україна) з комплектом сит з розмірами отворів 25...400 мкм, маса проби складала не менше 200 г порошку.

Матеріали для розпилення. У якості розпилюваного матеріалу використовували дроти компактного перерізу з технічного титану марки Cr-Ti Grade 2 діаметром 1,0 та 1,6 мм, хімічний склад яких наведено у табл. 1.

Визначення морфології та мікроструктури порошку. Зовнішній вигляд частинок порошоків досліджували на растровому електронному мікроскопі «JEOL JSM-840» (Японія) при наступних параметрах: $U = 20$ кВ, $I = 10^{-10} \dots 10^{-7}$ А. Зображення отримували в режимі вторинних електронів, комп'ютерної програми ZAF/PB, призначеної для дослідження шорстких поверхонь. Подальший аналіз зображень для дослідження сферично-

сті порошку виконували у програмному продукті «MIPAR» (США) за методикою [21].

Визначення фазового складу порошку. Фазовий склад порошку та параметри ґраток окремих фаз досліджували методом рентгеноструктурного фазового аналізу (РСФА). Рентгенографічні дослідження проводили на дифрактометрі «ДРОН-М1» (Україна) в монохроматизованому CuK_α -випромінюванні. В якості монохроматора використовували монокристал графіту, який було встановлено на дифрагований пучок. Дифрактограми знімали за допомогою покровкового сканування в інтервалі кутів $2\theta = 10 \dots 120^\circ$. Крок сканування складав $0,05^\circ$, час експозиції — 3...9 с. Обробку даних дифрактометричних вимірів проводили з використанням програми для повнопрофільного аналізу рентгеновських спектрів від суміші полікристалічних фазових компонентів «PowderCell 2.4» (Німеччина).

Визначення елементного хімічного складу порошку. Для визначення елементного хімічного складу титанового порошку застосовували метод рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) з використанням детектора «Link 860/500» (Англія).

Визначення вмісту кисню і азоту у порошку. Дослідження вмісту кисню і азоту у розпилюваних порошках виконували на газовому аналізаторі «LECO TC-436 Nitrogen Oxygen Analyzer» (США).

Визначення технологічних властивостей порошку. Текучість порошку визначали за допомогою приладу Холлу згідно зі стандартом ASTM B213. Вимірювання насипної щільності проводили відповідно до стандарту ASTM B212.

Результати досліджень та їх обговорення Дослідження гранулометричного складу отриманого порошку (рис. 2) показало, що найбільша кількість дрібнодисперсної фракції порошку має місце при розпиленні титанового дроту діаметром 1,0 мм, де основною фракцією порошку є фракція 140 мкм, яка

Таблиця 1. Хімічний склад розпилюваних дротів марки Cr-Ti Grade 2 відповідно до вихідного сертифікату, мас. %

Ti	Fe	O	C	N	H
Основа	0,2	0,18	0,05	≤0,03	0,012

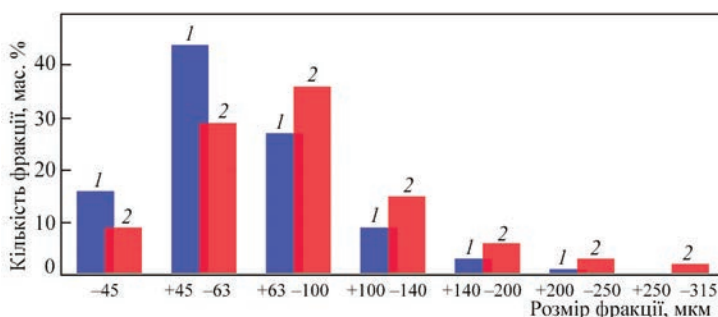


Рис. 2. Розподіл гранулометричного складу порошку, отриманого при плазмово-дуговому розпиленні титанового дроту Cr-Ti Grade 2 діаметром 1,0 (1) та 1,6 мм (2)

складає 96 мас. %, а доля дрібнодисперсної фракції 63 мкм становить 59 мас. %. Для випадку розпилення титанового дроту діаметром 1,6 мм основною фракцією порошку є фракція 200 мкм, яка складає 95 мас. %, а кількість дрібнодисперсної фракції 63 мкм порошку не перевищує 38 мас. %.

Формування порошків менших розмірів при розпиленні титанового дроту діаметром 1,0 мм при інших незмінних параметрах процесу пояснюється меншими розмірами рідкого прошарку, у порівнянні з розмірами прошарку, що формується на торці розпилюваного дроту діаметром 1,6 мм, це у свою чергу сприяє зменшенню розмірів фрагментів, що утворюються при розпиленні [16].

Аналіз морфології титанового порошку у програмному продукті «MIPAR» (рис. 3) на прикладі фракції 106 мкм показав, що порошок має сферичну форму з середнім коефіцієнтом сферичності

$S = 0,87...0,91$, при цьому практично відсутні зовнішні дефекти у вигляді сателітів та часток неправильної форми, доля яких не перевищує 1 мас. %, на поверхні порошку фіксуються виходи дендритів та границь зерен. Дослідження мікроструктури порошку показало відсутність внутрішніх дефектів у вигляді порожнин, тріщин тощо.

Високі показники сферичності досліджуваних порошків обумовлюють їх високі технологічні властивості (табл. 2), які можна порівняти з властивостями порошків, отриманих за технологією відцентрового розпилення заготовок зі швидкістю більше 30 000 об/хв (SS-PREP — Supreme-Speed Plasma Rotating Electrode Process [22]).

За допомогою методу РСМА і газового аналізу встановлено хімічний склад порошків (табл. 3), отриманих при плазмово-дуговому розпиленні титанового дроту Cr-Ti Grade 2 та з'ясовано, що

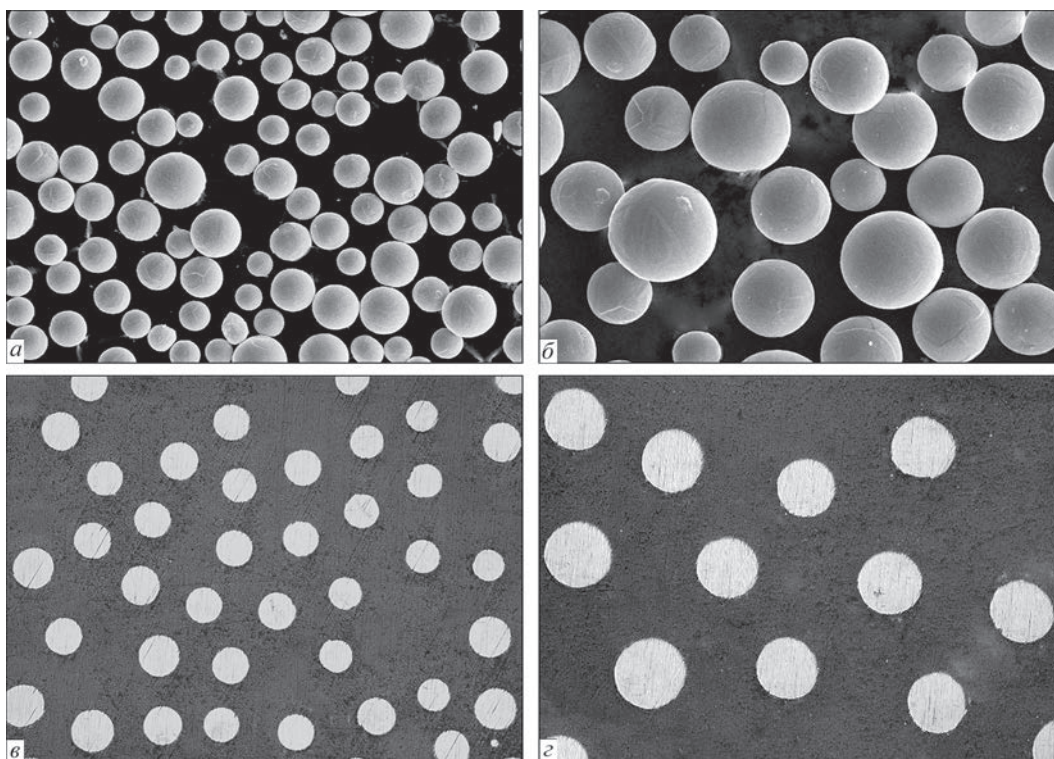


Рис. 3. СЕМ зображення морфології (а, б) та мікроструктури (в, з) титанового порошку марки Cr-Ti Grade 2 фракції 106 мкм; а, в — $\times 100$; б, з — $\times 200$

Таблиця 2. Порівняння технологічних властивостей титанового порошку Cp-Ti Grade 2, отриманих за технологіями відцентрового плазмового розпилення заготовок (SS-PREP), газового розпилення розплаву (GA) та плазмово-дугового розпилення дроту (PA)

Метод	Розмір фракції, мкм	Текучість, с/50 г	Насипна щільність, г/см ³
SS-PREP (Sino-euro Ltd, Китай) [23]	15...45	≤30	≥2,5
	45...106	≤27	≥2,5
	45...150	≤27	≥2,5
GA (Höganäs, Швеція) [24]	15...45	40	2,34
	45...106	35	2,37
	45...150	33	2,37
PA (AP&C, США) [25]	15...45	29	2,55
	45...106	25	2,61
	45...150	23	2,65
PA (ІЕЗ ім. С.О. Патона, Україна)	15...45	32	2,46
	45...106	28	2,53
	45...150	25	2,57

Таблиця 3. Хімічний склад вихідного дроту і титанового порошку марки Cp-Ti Grade 2, мас. %

Досліджувана зона	Ti	Fe	O	N
Стандарт ASTM B 348-05	Основа	≤0,30	≤0,25	≤0,03
Вихідний дріт		0,18	0,23	0,02
Порошок фракції -106 мкм		0,19	0,20	0,01
Порошок фракції +106; -160 мкм		0,21	0,22	0,02

Таблиця 4. Результати РСФА порошків із титану Cp-Ti Grade 2 фракцій -106, +106; -160 мкм

Зразок	Фази	Вміст фаз, об. %	Параметри ґратки, Å
Фракція порошку -106 мкм	α-Ti	100	$a = 2,9487; c = 4,6850; c/a = 1,5888$
Фракція порошку +106; -160 мкм			$a = 2,9501; c = 4,6871; c/a = 1,5887$

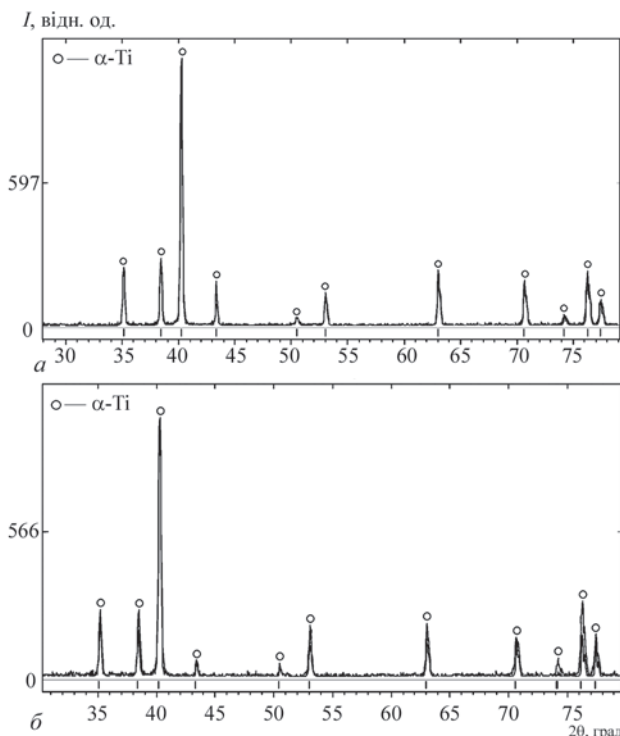


Рис. 4. Дифрактограми порошків із титану Cp-Ti Grade 2 фракцій -106 мкм (а), +106; -160 мкм (б)

він відповідає хімічному складу вихідного матеріалу — дроту (стандарт ASTM B 348-05).

За результатами рентгенографічних досліджень (рис. 4, табл. 4) встановлено, що фазовий склад порошків складається з α-Ti з параметрами ГЦК решітки: $a = 2,95 \text{ Å}; c = 4,69 \text{ Å}$.

Аналіз результатів досліджень хімічного і фазового складу, технологічних властивостей та гранулометричного складу сферичного титанового порошку Cp-Ti Grade 2, отриманого при плазмово-дуговому розпиленні, показав, що зазначені порошки можуть бути використані для 3D друку різними методами, а саме: плазмово-дугове розпилення струмопровідного дроту діаметром 1,0 мм дозволяє отримувати якісні титанові порошки, де доля фракції 45...106 мкм складає до 70 мас. %, які доцільно використовувати переважно у процесі електронно-променевого плавлення (EBM); плазмово-дугове розпилення струмопровідного дроту діаметром 1,6 мм дозволяє отримувати якісні титанові порошки, де доля фракції 45...140 мкм складає до 80 мас. %, які більш раціонально використовувати для процесів прямого лазерного (LDED) та плазмового вирощування (PMD).

Висновки

1. Встановлено, що при плазово-дуговому розпиленні титанового дроту Cr-Ti Grade 2 діаметром 1,0 мм основною фракцією є фракція 140 мкм, яка складає 96 мас. % від загальної маси порошку, де кількість дрібнодисперсної фракції 63 мкм становить до 59 мас. %, у випадку розпилення дроту діаметром 1,6 мм основною фракцією є фракція 200 мкм, яка складає 95 мас. %, а кількість дрібнодисперсної фракції 63 мкм не перевищує 38 мас. %. Загалом порошки мають правильну сферичну форму з показником коефіцієнта сферичності близьким до 0,9, при невеликій кількості сателітів та часток неправильної форми (<1 мас. %). Дослідження хімічного та фазового складу титанового порошку показало, що фазовий склад розпиленого порошку, незалежно від розміру фракції, складається з α -Ti, а хімічний склад відповідає стандарту ASTM B 348-05, що висувається до прутків і заготовок із титану та його сплавів.

2. Отримані результати дозволяють розглядати процес плазово-дугового розпилення дрових матеріалів як ефективну технологію, що дає змогу отримувати якісні вітчизняні сферичні порошки, у яких технологічні властивості знаходяться на одному рівні з іншим промисловим способом отримання сферичних порошків для 3D друку — високообертвовим відцентровим плазовим розпиленням заготовок SS-PREP (зі швидкістю більше 30000 об/хв) та мають вищі характеристики порівняно зі способами газового розпилення VIGA та ін. При цьому гранулометричний склад отриманих порошків обумовлює перспективність їх використання саме у процесах електронно-променевого плавлення (EBM), прямого лазерного (LDED) та плазового вирощування (PMD). Для процесу SLM досягається відносно невисокий вихід необхідної фракції 45 мкм на рівні 15 мас. %, тому необхідно виконання подальших досліджень на предмет збільшення виходу зазначеної фракції порошку при плазово-дуговому розпиленні дрових матеріалів.

Список літератури/References

- Nguyen, H., Pramanik, A., Basak, A. et al. (2022) A critical review on additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: Microstructure and mechanical properties. *J. of Materials Research and Technology*, **18**, 4641–4661. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.04.055>
- Matviichuk, V.A., Nesterenkov, V.M., Berdnikova, O.M. (2022) Additive electron beam technology for manufacture of metal products from powder materials. *The Paton Welding J.*, **2**, 16–26. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.02.03>
- Ahn, D. (2021) Directed energy deposition (DED) process: State of the art. *Inter. J. of Precis. Eng. and Manuf.-Green Tech.*, **8**, 703–742. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
- 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>
- 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**, 041–304. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4937809>
- Fatemeh, A., Haydari, Z., Salehi, H. et al. (2024) Spreadability of powders for additive manufacturing: A critical review of metrics and characterization methods. *Particuology*, **93**, 211–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.06.013>
- Olakanmi, E. (2013) Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: Effect of processing conditions and powder properties. *J. of Materials Processing Technol.*, **213**, 1387–1405. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.03.009>
- Attar, H., Prashanth, K., Zhang, L. et al. (2015) Effect of powder particle shape on the properties of in Situ Ti–TiB composite materials produced by selective laser melting. *J. of Mater. Sci. & Technol.*, **31**, 1001–1005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2015.08.007>
- Drawin, S., Deborde, A., Thomas, M. et al. (2020) Atomization of Ti–64 alloy using the EIGA process: Comparison of the characteristics of powders produced in lab scale and industrial-scale facilities. In: *MATEC Web of Conferences*, **321**, 07013. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032107013>
- Xiao, H., Gao, B., Yu, S. et al. (2024) Life cycle assessment of metal powder production: A Bayesian stochastic Kriging model-based autonomous estimation. *Auton. Intell. Syst.*, **4**, 20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43684-024-00079-5>
- Chen, G., Zhao, S., Tan, P. et al. (2018) A comparative study of Ti6Al4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization. *Powder Technology*, **333**, 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.013>
- Sun, P., Fang, Z., Zhang, Y. et al. (2017) Review of the methods for the production of spherical Ti and Ti alloy powder. *JOM*, **69**, 1853–1860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>
- Korzhyk, V., Strohonov, D., Burlachenko, O. (2023) Development of plasma-arc technologies of spherical granule production for additive manufacturing and granule metallurgy. *The Paton Welding J.*, **12**, 3–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.12.01>
- Yurtukan, E., Unal, R. (2022) Theoretical and experimental investigation of Ti alloy powder production using low-power plasma torches. *Transact. of Nonferrous Metals Society of China*, **32**, 175–191. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65786-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65786-2)
- Korzhyk, V., Strohonov, D., Burlachenko, O. (2023) New generation unit for plasma-arc deposition of coatings and atomization of current-carrying wire materials. *The Paton Welding J.*, **10**, 35–42. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.10.06>
- Yin, Z., Yu, D., Zhang, Q. et al. (2021) Experimental and numerical analysis of a reverse-polarity plasma torch for plasma atomization. *Plasma Chem. Plasma Process.*, **41**, 1471–1495. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11090-021-10181-8>
- Kharlamov, M., Krivtsun, I., Korzhyk, V. (2014) Dynamic model of the wire dispersion process in plasma-arc spraying. *J. of Thermal Spray Technol.*, **23**, 420–430. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-013-0027-4>

18. Kharlamov, M., Krivtsun, I., Korzhyk, V. et al. (2015) Simulation of motion, heating, and breakup of molten metal droplets in the plasma jet at plasma-arc spraying. *J. of Thermal Spray Technol.*, **24**, 659–670. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0216-4>
19. Gulyaev, I., Dolmatov, A., Kharlamov, M. et al. (2015) Arc-plasma wire spraying: An optical study of process phenomenology. *J. of Thermal Spray Technol.*, **24**, 1566–1573. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0356-6>
20. Adeeva, L., Tunik, A., Korzhyk, V. et al. (2024) Properties of powders produced by plasma-arc spheroidization of current-carrying Fe–Al flux-cored wire. *Powder Metall. Met. Ceram.*, **63**, 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11106-024-00434-4>
21. 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>
22. Liu, Y., Zhao, X., Lai, Y. et al. (2020) A brief introduction to the selective laser melting of Ti6Al4V powders by super-speed plasma rotating electrode process. *Progress in Natural Sci.: Materials Intern.*, **1(30)**, 94–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2019.12.004>

SPHERICAL TITANIUM POWDER PRODUCTION FOR 3D PRINTING BY PLASMA-ARC ATOMIZATION OF WIRE MATERIALS

V.M. Korzhyk¹, D.V. Strohonov¹, O.S. Tereshchenko¹, O.V. Ganushchak¹, A.Yu. Tunik¹, V.A. Kostin¹, S.L. Chygileichyk², V.K. Yulihin¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: vnkorzhyk@gmail.com

²JSC «Ivchenko-Progress». 2 Ivanova Str., 69068, Zaporizhzhia, Ukraine

The possibility of spherical titanium powder production by the technology of plasma-arc atomization of solid Cp-Ti Grade 2 wire with a diameter of 1.0 and 1.6 mm has been experimentally confirmed. Analysis of the particle size distribution of the powder showed that in the case of atomization of titanium wire with a diameter of 1.0 mm, the main fraction is –140 μm , which is 96 % of the total mass of the powder, where the amount of the finely dispersed fraction of –63 μm is up to 60 wt.%, and in the case of wire with a diameter of 1.6 mm, the main fraction is –200 μm , which is 95 wt.%, while the amount of the finely dispersed fraction of –63 μm does not exceed 38 wt.%. A study of shape parameters of the titanium powder was performed, which showed that most particles have a regular spherical shape with an average sphericity coefficient close to 0.9, the number of particles with satellites, and particles of irregular shape does not exceed 1 wt.%, which determines the high technological properties of the produced powder, which are on a par with other industrial technologies of spherical powder production by plasma and gas atomization methods. The chemical and phase composition of the atomized powder was investigated, and it was found that the phase composition consists of α -Ti, and the chemical composition corresponds to the ASTM B 348-05 standard. It was shown that application of the technology of plasma-arc atomization of titanium wire allows obtaining spherical powders that can be used as consumables for 3D printing of products for the aviation, rocket and space, medical, energy and chemical industries by the methods of electron beam melting (EBM), laser direct energy deposition (LDED) and plasma metal deposition (PMD). 22 Ref., 4 Tabl., 4 Fig.

Keywords: plasma-arc atomization, solid wire, titanium, sphericity, powders, 3D printing

Отримано 06.01.2025

Отримано у переглянутому вигляді 06.02.2025

Прийнято 02.05.2025

НОВА КНИГА



Левченко О. Г. Зварювальні аерозолі і гази: процеси утворення, методи нейтралізації та засоби захисту. — 2-ге видання, доповнене. Київ: Видавництво «Каравела», 2025. — 226 с.

У монографії викладено теоретичні положення про процеси утворення шкідливих для зварників аерозолів та газів, що утворюються під час електродугового зварювання, методики їх досліджень, санітарно-гігієнічні характеристики дугового зварювання. Наведено дані про хімічну класифікацію зварювальних аерозолів, методи їх нейтралізації та мінімізації виділень. Розглянуто інформаційні системи гігієнічних характеристик зварювальних матеріалів, сучасні засоби місцевої вентиляції для робочих місць зварників та індивідуального захисту органів дихання.

Книга призначена для наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються розробкою зварювальних матеріалів та технологій, питаннями охорони праці та екології у зварювальному виробництві, сучасними засобами місцевої вентиляції та індивідуального захисту зварників. Іл. 89. Табл. 32. Бібліогр. 89 назв.