

ВІДЦЕНТРОВЕ ПЛАЗМОВЕ РОЗПИЛЕННЯ ПОРОШКІВ ІЗ ТИТАНОВИХ І ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВИТРАТНИХ ЗАГОТОВОК ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ВИПЛАВКИ

О.В. Овчинников¹, О.В. Завгородній², В.І. Броньська¹, Є.А. Сторчак¹, Р.Ю. Білий³, М.М. Пясецький³

¹АТ «Інститут титану». 69035, м. Запоріжжя, просп. Соборний, 180

²ТОВ «Мультифлекс». 69063, м. Запоріжжя, просп. Соборний, 156

³Український державний університет науки і технологій. 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2

РЕФЕРАТ

В сучасних умовах для української промисловості існують труднощі, пов'язані із металевими порошками для адитивних технологій: висока вартість, складність їх стабільних поставок і обмеженість лише іноземними марками сплавів є головним стримуючим фактором для впровадження 3D друку у високотехнологічні галузі виробництва. Тому дослідження, спрямовані на розвиток вітчизняних технологій виготовлення сферичних порошків із титанових і жароміцних нікелевих сплавів, є актуальною задачею. В роботі досліджено процес виготовлення сферичних порошків за технологією ротаційного плазмового розпилення і показана ефективність використання в якості витратної заготовки зливків електронно-променевого виплавлення. При цьому визначено вплив технологічних параметрів розпилення на розмір та якість порошків із жароміцних і титанових сплавів. Бібліогр. 12, табл. 5, рис. 4.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: зливок, жароміцні сплави, електронно-променево виплавлення, ротаційне плазмово розпилення, сферичний порошок, адитивні технології

ВСТУП

Розвиток в Україні виробництва металевих порошків для 3D друку дозволяє вирішити питання витратних матеріалів і сприяє більш активному впровадженню адитивних технологій у високотехнологічні галузі промисловості, тому є пріоритетним науковим напрямом. Особливої актуальності адитивне виробництво набуло в сучасних умовах для швидкого і точного виготовлення деталей малоресурсних газотурбінних двигунів нового покоління.

Загальною вимогою до металевих порошків адитивного призначення є сферична форма частинок з характерним розміром 15...200 мкм. У процесі електронно-променевого вирощування ЕВМ (Electron Beam Melting) ефективно застосовуються порошки розміром 45...160 мкм, під процеси селективного лазерного плавлення та спікання SLM (Selective Laser Melting) та SLS (Selective Laser Sintering), холодного газодинамічного напилення або вирощування CS (Cold Spray) потрібна фракція 15...53 мкм, а під процеси прямого плазмового PMD (Plasma Metal Deposition) та лазерного LDED (Laser Directed Energy Deposition) використовують порошки з розмірним діапазоном 53...150 мкм. Такі розміри частинок визначають мінімальну товщину насипного шару та низьку шорсткість майбутньої

деталі. Вимога сферичної форми також пов'язана з тим, що такі частинки більш компактно укладаються в певний об'єм і мають необхідну плинність у системі подачі сипучого порошку з мінімальним опором [1]. При цьому порошки повинні мати високу хімічну однорідність і знижений вміст шкідливих домішок, в їх структурі не повинно бути несплавлень, пор, раковин, включень.

Основними технологіями одержання порошків, які забезпечують виконання цих вимог, є методи диспергування розплаву. До основних технологічних варіантів диспергування розплаву належить газова атомізація, де плавлення зливку VIGA (Vacuum Induction Melting and Inert Gas Atomization) або прутка EIGA (Electrode Induction Melting and Inert Gas Atomization) відбувається у вакуумній камері з подальшим розпиленням струменем холодного інертного газу та відцентрова (ротаційна) атомізація. Також до цих технологій належить плазмово розпилення дроту PA (Plasma Atomization) [2, 3]. До головних недоліків технологій VIGA, EIGA, PA можна віднести наявність в розпиленіх партіях порошків окремих частинок неправильної форми, а також частинок-сателітів внутрішньої пористості. Високі вимоги до адитивних порошків не допускають вище описані недоліки, оскільки можуть викликати нестабільність процесу 3D друку. У вітчизняній промисловості впровадження адитивних технологій зіткнулося з низкою проблем, пов'язаних із вихідними порошками. Висока вартість сировини, якою є сферичні порошки зарубіжного

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/>

виробництва, труднощі їх стабільних поставок і обмеженість іноземними марками сплавів є головним стримуючим фактором. Нікелеві та титанові сплави для адитивного виробництва мають найбільший потенціал, оскільки вихідний матеріал має велику вартість, а також близько половини ціни готової деталі займають витрати на закупівлю прутків із необхідного сплаву. Тому важливим завданням є заміна імпортованих порошкових матеріалів на порошки власного виробництва. Для цього, насамперед, необхідно розробити технології та провести удосконалення обладнання для отримання порошкових матеріалів із різних сплавів. Одним із напрямків удосконалення технологічного ланцюга при цьому може стати використання (на заміну покупним пруткам) злитків, виплавлених провідними українськими компаніями.

Ротаційне плазмове розпилення PREP (Plasma Rotating Electrode Process) є технологією, яка здатна забезпечити виготовлення високоякісних порошків, що практично не містять дефектних частинок [4]. Однак на сьогоднішній день є низка невирішених питань стосовно відпрацювання технологій плазмове розпилення із застосуванням саме литих заготовок. До підприємств, що мають спеціальне обладнання і багаторічний досвід виплавлення злитків із титанових, жароміцних, нікелевих та спеціальних сплавів належить ДП «Науково-виробничий центр «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» [5]. В умовах цього підприємства за електронно-променевою технологією одержані злитки, що використовували для виготовлення сферичних порошків, досліджених в даній роботі.

Існуючому в Україні обладнанню по виробництву сферичних порошків (типу УЦР) більше 30-ти років і його технологічні можливості на період його створення характеризувались швидкістю обертання витратного електрода в межах $15000 \dots 18000 \text{ хв}^{-1}$, що дозволяло отримувати гранули розміром приблизно $200 \dots 250 \text{ мкм}$ [6]. З урахуванням сучасних вимог до порошків адитивного призначення обладнання для плазмове розпилення порошків потребувало глибокої модернізації.

ТОВ «Мультифлекс» (м. Запоріжжя) є провідним виробником металевих сферичних порошків ротаційним плазмовим розпиленням, де проведена модернізація обладнання і виробництва в цілому. Розробку нового проекту цеху з виробництва сферичних порошків для цього підприємства виконав ТОВ «Науково-дослідний і проектний інститут титану» (м. Запоріжжя), в результаті проведена повна модернізація і реконструкція об'єкта. Поставлене виробниче завдання при цьому складало 100 кг за один цикл роботи для порошків на основі титану і 250 кг — для нікелевих сплавів з виходом не менше 93% кондиційного порошку. Отже, відпрацювання

технологій плазмове розпилення із застосуванням литих заготовок здійснювали в умовах компанії ТОВ «Мультифлекс».

Мета роботи полягала у визначенні оптимальних технологічних режимів ротаційного плазмове розпилення зливків електронно-променевої виплавки із титанових та жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення дисперсних ($40 \dots 120 \text{ мкм}$) сферичних порошків адитивного призначення.

ОБЛАДНАННЯ ТА МЕТОДИКИ

Виплавлення зливків (діаметром 53 мм , $L = 700 \text{ мм}$) виконано із використанням багатоцільового електронно-променевого обладнання UE-208M, оснащеного газорозрядними електронними гарматами з кристалізатором, що мав циліндричну форму. Конструктивна схема електронно-променевої установки UE-208M наведена на рис. 1. Технологічне устаткування, в якому відбувався процес електронно-променевого перепау, складається з проміжної ємності і кристалізатора, що представляє собою порожнистий замкнутий контур, оснащений піддонном, що вертикально переміщується з поглибленням у вигляді ластівчин хвіст. Внутрішня частина кристалізатора, що контактує з металом зливка, виконана з міді і охолоджується водою (рис. 2). Вакуумна система установки створює і підтримує розрідження в плавильній камері (до $6 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$ — на початку плавки і 10^{-1} Па — під час плавки).

Після виплавки зливки охолоджували в камері плавки в умовах вакууму, вони мали світлу неокислену поверхню (рис. 2, а). Глибина поверхневих дефектів типу гофр становила не більше 2 мм , дефекти у вигляді розривів, тріщин і несплавлень не виявлені. Для подальшого ротаційного плазмове розпилення зливки підлягали механічній обробці поверхні на діаметр 50 мм (рис. 2, б).

Ротаційне плазмове розпилення литих заготовок здійснювали на модернізованій установці УЦР-4 (рис. 3), плазмоутворююча газова суміш складалась із аргону і гелію в різних співвідношеннях. Дослідні розпилення проводили на прикладі титанового сплаву Grade 5 (Ti-6Al-4V) і жароміцного нікелевого сплаву INCONEL 718, хімічний склад яких наведено у табл. 1.

В процесі PREP плазмова дуга діє на торець заготовки, що швидко обертається (витратний електрод), відбувається плавлення металу і відтискання його під дією відцентрових сил до периферії витратного електрода. Зі зростанням потужності плазмової дуги кількість розплаву (швидкість розпилення) збільшується внаслідок зниження в'язкості розплаву у зв'язку з підвищенням температури та більш швидким переміщенням його до вінця, де розплав диспергується в краплі. Дослідні

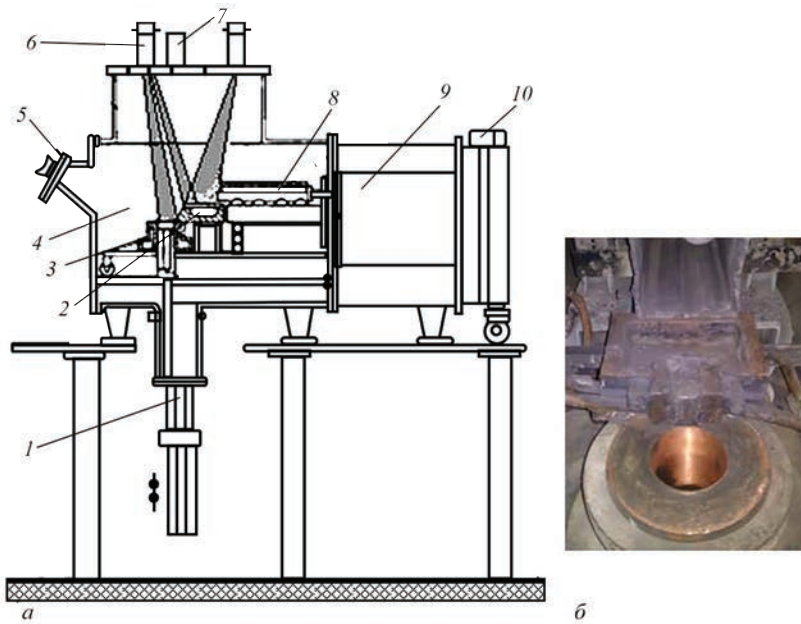


Рис. 1. Схема електронно-променевої установки УЭ-208М (а) і зовнішній вигляд кристалізатора (б) [5]: 1 — механізм витягування злитка; 2 — проміжна ємність; 3 — кристалізатор; 4 — камера плавки; 5 — оглядова система; 6 — електронно-променева гармата; 7 — водяний реостат; 8 — витратна заготовка; 9 — камера; 10 — механізм подачі заготовки

Таблиця 1. Хімічний склад сплавів для виготовлення сферичних порошків, %

Марка сплаву	C	O	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	V	Al	Nb
Ti-6Al-4V (Grade 5)	≤0,10	≤0,20	≤0,1	—	—	—	Основа	3,5...4,5	5,5...6,75	—
INCONEL718	≤0,10	0,02...0,05	≤0,30	≤0,6	14,0...16,0	43,0...47,0	1,9...2,4	—	0,9...2,4	0,8...1,5

розпилення за технологією PREP здійснювали за умов створення вакууму в камері на рівні 10^{-3} Па, після чого подавали суміш аргону і гелію в певному співвідношенні. Витрати плазмоутворюючої газової суміші за один процес розпилення становив близько 12 м^3 , при цьому витрати газу в одиниці часу складали близько 40 л/хв і для всіх дослідів це значення було постійне. Витрати газу вимірювали ротаметром і регулювали через спеціальну мембрану в зоні отвору подачі газової суміші (діаметром 16 мм). Потужність дуги плазмотрона залежала від співвідношення Ar/He в газовій суміші і сили струму, конкретне значення якої (із діапазону 700...1200 А) налаштовувалось під кожне розпилення і не змінювали під час робочого процесу.

Отримані порошки тестували згідно національних стандартів «Порошки металічні» ДСТУ 2049-92. Фракційний склад визначали стандарт-

ним методом розсіву на ситах із різними розмірами комірок (від 40 до 200 мкм), а також при мікроскопічному дослідженні. Отримані фракції проаналізовано для визначення їх розмірів, форми частинок, а також їх відсоткового розподілу у пробі. Використання статистичних методів для обробки результатів аналізу полягало у визначенні середніх розмірів частинок і розподілу їх за розміром.

Насипну щільність та текучість порошку визначали із використанням методу воронки Холла по ISO 4490-78. Для металографічного аналізу

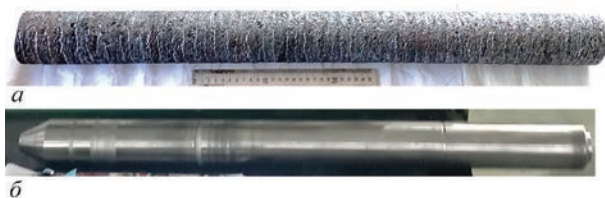


Рис. 2. Зовнішній вигляд злитка із жароміцного нікелевого сплаву, одержаного електронно-променевою плавкою до (а) і після (б) механічної обробки

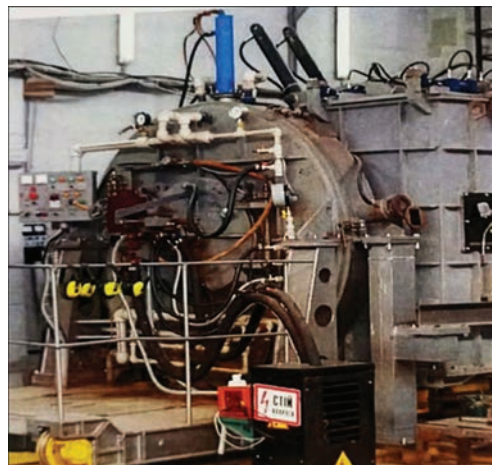


Рис. 3. Зовнішній вигляд обладнання УЦР-4 для виготовлення металевих сферичних порошків ТОВ «Мультифлекс» за технологією PREP

порошок заливали в електропровідний смолистий матеріал і полірували з використанням алмазних суспензій. Мікроструктурний аналіз виконано із використанням інвертованого мікроскопу відбитого світла («Carl Zeiss»).

Мікротвердість вимірювали на приладі MM7T фірми «BUEHLER». Для вимірювання мікротвердості частинок порошку виготовляли мікрошліфи з полірованою поверхнею, порошок при цьому запресовували в бакеліт із застосуванням автоматичного запресувального апарату «SIMPLIMET 2000». Замірам підлягали частинки порошку, що повністю вийшли в поле шліфа. Мікротвердість в зоні поверхні частинок порошку вимірювали на відстані ~15...18 мкм від краю, в центральній зоні частинок — на відстані ~1/2 діаметра, виконували не менше п'яти замірів.

Хімічний склад досліджених зразків визначали спектральним методом з використанням приладу «SPECTROMAX» фірми «SPECTRO», де аналіз засновується на визначенні інтенсивностей спектру, що збуджується, від кожного хімічного елемента, який прямо пропорційний його ваговій частці в сплаві. Вміст кисню у частинках порошку визначали за допомогою газоаналізатора моделі ON900 фірми «ELTRA». Принцип визначення газових домішок полягав в спалюванні зазначених зразків (або порції порошку такої ж ваги, як зразок довжиною 3,5 і діаметром 5 мм із титанового сплаву та діаметром 3 мм — для нікелевих сплавів) і визначенні вмісту кисню, що виділився.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості плазмоутворюючого газу застосовували інертні по відношенню до титану і нікелю газу — аргон, гелій. Вибір оптимального складу плазмоутворюючої газової суміші та оптимальної швидкості обертання витратного електрода — важлива частина вдосконалення технології розпилення нікелевих жароміцних та титанових сплавів, для чого проводили дослідні процеси відцентрового розпилення на різних рівнях зазначених параметрів (табл. 2). Для визначення раціонального технологічного режиму ротаційного плазмового розпилення витратного електрода із авіаційних жароміцних сплавів для отримання порошків різних фракційних складів проведена серія

Таблиця 2. Чисельні характеристики технологічних параметрів плазмового розпилення, яким варіювали в процесі дослідження

Експеримент	X_1 (хв ⁻¹)	X_2 (He, %)
1	20 000	30
2	30 000	—»—
3	20 000	60
4	30 000	—»—
5	25 000	45

дослідних розпилень. При цьому для кожного розпилення змінювали наступні технологічні параметри: швидкість обертання витратного електрода (X_1); вміст гелію He (X_2)% в плазмоутворюючій газовій суміші (аргон + гелій).

Функцією відгуку обрано розмір частинок порошку (Y , мкм).

Вміст гелію на рівні 30 % обрано, спираючись на дані досліджень [7, 8] в якості нижнього рівня, а вдвічі вище значення — в якості експериментального, що стало верхнім значенням діапазону варіювання. Вище значення (60 % He) не розглядали, оскільки гелій підвищує проплавлення здатність плазми і, як наслідок, на поверхні торця витратного електрода, що плавиться, може утворитися глибокий кратер, що негативно впливає на процес розпилення і якість порошку. Інші технологічні параметри становили: напруга — 50...70 В, потужність плазмотрону — в межах 65...100 кВт.

Для титанового сплаву Grade 5 (Ti-6Al-4V) та нікелевого сплаву INCONEL 718 заданий розмір порошку складав 40...110 мкм (фракції — за вимогою замовника). Введення гелію до плазмоутворюючої газової суміші з аргонном позитивно впливало на зменшення розміру фракції порошку зі сплаву Grade 5 і найбільший ефект мало при досягненні 60 % He в суміші з Ar при максимальній швидкості обертання заготовки 30 тис. хв⁻¹. На підставі дослідних розпилень згідно матриці планування експерименту (змінювали X_1 — швидкість обертання і X_2 — вміст гелію в плазмоутворюючій суміші). Отримані залежності показують спільний вплив цих двох параметрів на розмір частинок порошків. Залежності розміру частинок (Y_1, Y_2 , мкм) для порошку зі сплавів Grade 5 (1), INCONEL 718 (2) лінійні і мали наступний вигляд:

$$Y_1 = 212,90 - 0,00283 \cdot X_1 - 0,833 \cdot X_2; \quad (1)$$

$$Y_2 = 291,04 - 0,00563 \cdot X_1 - 1,375 \cdot X_2; \quad (2)$$

Одержані рівняння показують, що збільшення швидкості обертання та вмісту гелію зменшує середній розмір частинок і дозволяють прогнозувати технологічні параметри для виготовлення необхідного розміру сферичних порошків.

В результаті оптимізації технологічних параметрів розроблено вдосконалену технологію ротаційного плазмового розпилення нікелевих жароміцних і титанових сплавів за рахунок підвищення потужності плазми в поєднанні із збільшенням швидкості обертання витратної заготовки. Потужність плазми підвищували шляхом змін її теплофізичних властивостей в результаті введення до аргону інертного газу гелію в оптимальному співвідношенні. Можливість прогнозувати фракційний склад порошків, використовуючи регресій-

Таблиця 3. Технологічні властивості різних партій порошків, виготовлених на модернізованому обладнанні відцентрового плазмового розпилення

Марка сплаву	Фракція порошку, мкм	Текучість (на 50 г навішування), с	Насипна щільність, г/см ³
Ti-6Al-4V (Grade 5)	-100+50	15	1,5
	-60+30	19	2,0
	-40	21	2,5
INCONEL 718	-50+30	15	4,4
	-30	11	5,1

ні залежності технологічних параметрів плазмового розпилення, дозволяло отримувати порошки різних розмірів, оптимальних для конкретних технологій 3D-вирощування виробів з них. Таким чином, оптимальними режимами розпилення, що дозволяли отримати заданий розмір фракції порошку для досліджених сплавів, визначено: швидкість обертання — 30000 хв⁻¹; співвідношення газів у плазмоутворюючій суміші — 60 % He/4 % Ar.

Окрім розміру частинок до порошків адитивного призначення висуваються ряд вимог до його якості, серед яких ключовими є сферичність, відсутність сателітів, окислення поверхні, відсутність внутрішньої пористості, однорідність хімічного складу і мікроструктури, а також необхідний рівень технологічних властивостей порошку (табл. 3).

Порошок із титанового сплаву Grade5 (Ti-6Al-4V) характеризувався вищими значеннями текучості, ніж нікелеві сплави, але їх насипна щільність вище, ніж у титанового сплаву. Таку різницю в технологічних властивостях можна пояснити різною питомою вагою досліджуваних матеріалів, а також впливом розміру частинок порошків на їх якість.

Таблиця 4. Мікротвердість частинок сферичних порошків

Марка сплаву	Фракція порошку, мкм	Мікротвердість частинок порошку, HV ^{0,05}	
		поверхня	сердечник
Ti-6Al-4V (Grade 5)	40...100	275...311	220...295
INCONEL 718	60...110	370...392	395...400

При мікроаналізі встановлено, що виготовлені порошки мали правильну сферичну форму, без сателітів, мікропор та структурних змін на поверхні частинок (рис. 4), що відповідало вимогам адитивних технологій на вихідний порошок.

Мікроструктура частинок порошків відрізнялася наддрібним зерном і тонкою кристалічною структурою, що може забезпечити найкраще поєднання міцності і пластичності, тобто максимально реалізувати потенціал досліджуваних сплавів.

В умовах кристалізації сферичних частинок порошку спостерігалось більш істотне зрушення від рівноважного стану фаз у досліджуваних сплавах, ніж при кристалізації зливка. Створилися умови для утворення високодисперсних, псевдогомодогенних сумішей, що підвищили механічні властивості, а також можуть збільшувати ефективність подальшої зміцнюючої термообробки. Однорідність мікроструктурного стану підтвердили виміри мікротвердості частинок сферичних порошків, виконаних на поперечних мікрошліфах (табл. 4).

Мікроструктурний стан і хімічна однорідність частинок, що підтверджувалась замірами мікротвердості по поверхні і в поперечному перерізі шліфа порошку, а також відсутність газонасичення порошків і неметалевих включень показали, що модернізоване обладнання та розроблені техноло-

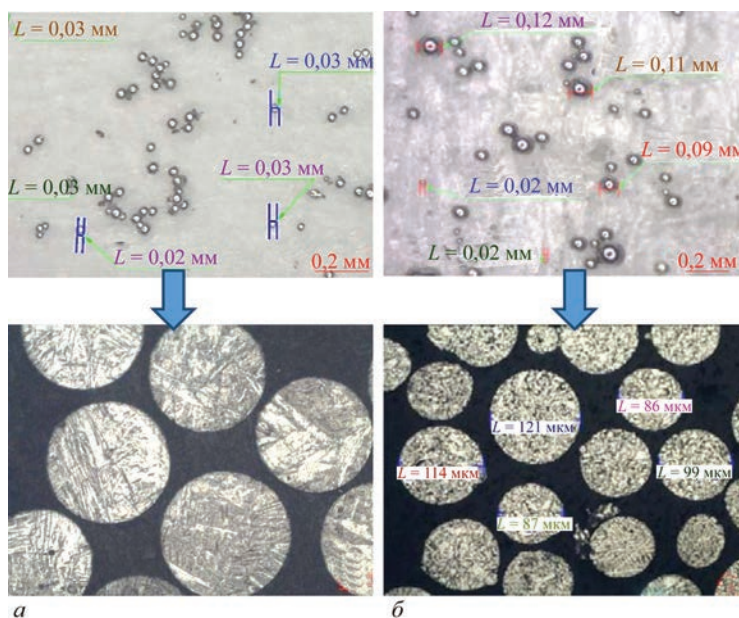


Рис. 4. Стан поверхні (×20) і мікроструктура частинок порошків, виготовлених на модернізованому обладнанні ТОВ «Мультифлекс» зі сплавів Ti-6Al-4V (а) та Inconel 718 (б), ×500

Таблиця 5. Порівняння основних параметрів порошків зі сплавів типу Ti–6Al–4V (Grade5, Grade 23) від різних виробників [9–12]

Виробник	Hoganas (Швеція)	Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd (Китай)	AP&C a Colibrium Additive Company (США)	Pyrogenesis (Канада)	ТОВ «Мультифлекс» (Україна)
Фракційний склад, мкм	45...106	85...90, 125...130	45...150	45...106	40...100
Насипна щільність, г/см ³	2,35	2,5...2,7	2,59	2,51...2,65	2,2...2,5
Текучість, с (на 50 г)	29	20...25	25	21...28	15,0...21,0
Вміст кисню, %	0,17	0,08...0,10	0,13	0,13	0,15

гічні режими розпилення зливків дозволяють виготовляти якісні сферичні дисперсні порошки для застосування в адитивних технологіях виготовлення різних деталей. В результаті виконаних дослідних робіт на підприємстві «Мультифлекс» створені відповідні технічні умови: «Порошки титанових сплавів сферичної форм для адитивних процесів вирощування» (ТУ У 24.4-31914753-001:2018), «Порошки зі сплавів на основі нікелю та на залізо-нікелевій основі» (ТУ У 24.4-31914753-002:2020).

Порівняльний аналіз металевих порошків виробництва українського підприємства ТОВ «Мультифлекс» із порошками іноземних виробників показав, що закордонні порошки і порошки українського виробництва мають стабільні та вузькі фракційні склади, що дозволяє досягати повторюваних результатів при лазерному і електронно-променевому друці тощо. Вміст кисню, який критично впливає на пластичність і схильність до крихкого руйнування, у зарубіжних порошках близький до вмісту кисню в порошках, виготовлених ТОВ «Мультифлекс» і за розглянутими показниками якості українські порошки можуть конкурувати із зарубіжними аналогами (табл. 5) [9–12].

По технологічним характеристикам і за вмістом кисню порошки ТОВ «Мультифлекс» відповідають властивостям ряду промислових виробників, таких як «Hoganas» (Швеція), «Sino-Euro Materials Technologies of Xi'an Co., Ltd» (Китай), «AP&C a Colibrium Additive Company» (США), «Pyrogenesis» (Канада).

Слід також враховувати, що вітчизняні порошки мають перевагу у вартості та доступності. При сучасному рівні організації виробництва собівартість порошку зі сплаву Grade 5 (Ti–6Al–4V) від ТОВ «Мультифлекс» на 40...50 % нижча, ніж у європейських або канадських. Крім того, локальне виробництво дозволяє адаптувати хімічний склад та фракційний діапазон під специфіку замовника. Оптова ціна на порошки зі сплавів типу Ti–6Al–4V на зовнішньому ринку складає приблизно 200 євро/кг, при тому, що придбання їх українськими підприємствами, які впроваджують адитивні способи виробництва, обходиться вдвічі дорожче, що формує високу собівартість деталей із них. До того ж формується сировинна залежність

від закордонних постачальників. Використання в якості витратних електродів зливків електронно-променевого виплавлення дозволило сформувати замкнений цикл виробництва без залучання іноземних поставок деформованих прутків.

ВИСНОВКИ

1. Показані результати практичної реалізації застосування злитків електронно-променевої виплавки діаметром 50 мм, довжиною 700 мм в якості витратних електродів для виготовлення дисперсних сферичних порошків за PREP-технологією із титанового сплаву Ti–6Al–4V (Grade 5) і жароміцного нікелевого сплаву INCONEL 718.

2. Визначені оптимальні технологічні параметри ротаційного плазмового розпилення злитків зі сплаву Grade 5 та нікелевого сплаву INCONEL 718 для забезпечення виходу заданої фракції 40...100 мкм, що можуть бути використані в адитивних процесах електронно-променевого плавлення EBM, прямого плазмового PMD та лазерного LDED вирощування. Оптимальні технологічні параметри становили 30000 хв⁻¹ і співвідношення газів 60 % He/40 % Ar.

3. Порошки, виготовлені згідно оптимізованим технологічним параметрам, відповідали критеріям якості порошків адитивного призначення: частинки порошку мали правильну форму без сателітів, характеризувались відсутністю внутрішньої пористості та неметалевих включень, розмір частинок — в заданому діапазоні. В результаті виконаних дослідних робіт створені технічні умови на сферичні порошки із титанових сплавів (ТУ У 24.4-31914753-001:2018) і на порошки зі сплавів на основі нікелю та залізо-нікелевій основі (ТУ У 24.4-31914753-002:2020).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ/REFERENCES

- Osamu, Kanou, Nobuo, Fukada, Shigehisa, Takenaka (2017) The use of HDH titanium alloy powder for additive manufacturing application. *J. of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, **64**, 295–299. DOI: <https://doi.org/10.2497/jjpspm.64.295>
- Ahsan, M.N., Pinkerton, A.J., Moat, R.J., Shackleton, J. (2011) A comparative study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti–6Al–4V powders. *Materials Science and Engineering A*, **528(25)**, 7648–7657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.06.074>

3. Zeoli, N., Tabbara, H., Gu, S. (2011) CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization. *Chemical Engineering Science*, 66(24), 6498–6504. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.09.014>
4. 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)
5. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Berezos, V.A. et al. (2019) Laboratory electron-beam installation UE-208M. *Sovremennaya Elektrometallurgiya*, 3, 15–22 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
6. *Production of spherical powders by TOV «Multiflex». Production of powders from titanium, nickel, zirconium, iron, cobalt and other alloys for additive technologies, surfacing and spraying* [in Ukrainian]. <https://powdermet.com.ua/>
7. Korzhyk, V.M., Strohonov, D.V., Burlachenko, O.M. et al. (2023) Development of plasma-arc technologies for obtaining spherical granules for additive manufacturing and granular metallurgy. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, 11, 37–51 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.11.04>
8. Tang, J., Nie, Y., Lei, Q., Li, Y. (2019). Characteristics and atomization behavior of Ti–6Al–4V powder produced by plasma rotating electrode process. *Advanced Powder Technology*, 30(10), 2330–2337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.07.015>
9. Hogan. Titanium based. URL: https://www.hoganas.com/api/Brochure/?pdf=/globalassets/downloads/library/additive-manufacturing_foram-ti6al4v-45-106-eg_3315hog.pdf&mode=brochure&title=Additive-manufacturing_forAM%20Ti6Al4V%2045-106%20EG_3315HOG.pdf#page=2.
10. Matviichuk, V.A., Nesterenkov, V.M., Berdnikova, O.M. (2022) Additive electron beam technology of manufacture of metal products from powder materials. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, 2, 16–25. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.02.03>
11. AP&C a Colibrium Additive Company (GE Aerospace). <https://www.advancedpowders.com/powders/titanium-alloys/ti-6al-4v-grade-5>.
12. *Pyrogenesis additive. Product specification sheet*. <https://www.pyrogenesis.com/wp-content/uploads/2019/10/Pyro-Genesis-Additive-PRODUCT-SPEC-SHEET-Ti64-Grade-23-45-106microns.pdf>

CENTRIFUGAL PLASMA SPRAYING OF POWDERS OF TITANIUM AND HIGH-TEMPERATURE ALLOYS USING CONSUMABLE BILLETS PRODUCED BY ELECTRON BEAM MELTING

O.V. Ovchynnykov¹, O.V. Zavgorodny², V.I. Bronetska¹, E.A. Storchak¹, R.Yu. Bilyi³, M.M. Piasetskyi³

¹JSC “Titanium Institute”. 180 Sobornyi Ave., 69035, Zaporizhzhia, Ukraine

²LLC «MULTIFLEX». 24 Sobornyi Ave., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine

³Ukrainian State University of Science and Technology. 2 Lazaryana Str., 49010, Dnipro, Ukraine

ABSTRACT

In modern conditions, Ukrainian industry faces difficulties related to metal powders for additive technologies: high cost, difficulty in their stable supply and availability of only foreign alloy brands are the main limiting factors for the introduction of 3D printing into high-tech industries. Therefore, research aimed at the development of domestic technologies for the production of spherical powders from titanium and heat-resistant nickel alloys is an urgent task. The work investigates the process of manufacturing spherical powders with application of the technology of rotary plasma spraying and shows the effectiveness of using electron beam smelting ingots as consumables. At the same time, the effect of the technological parameters of spraying on the size and quality of powders from heat-resistant and titanium alloys is determined. 12 Ref., 5 Tabl., 4 Fig.

KEYWORDS: ingot, heat-resistant alloys, electron beam smelting, rotary plasma spraying, spherical powder, additive technologies

ORCID

O.V. Овчинников — <https://orcid.org/0009-0006-5887-0676>, O.V. Завгородній — <https://orcid.org/0009-0006-7198-1557>,

V.I. Бронецька — <https://orcid.org/0009-0005-4275-8260>, E.A. Сторчак — <https://orcid.org/0009-0002-1213-8122>,

R.Yu. Білий — <https://orcid.org/0009-0001-7844-6649>, M.M. Пясецький — <https://orcid.org/0009-0008-9593-0724>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛІА ЛІСТУВАННЯ

V.I. Бронецька

АТ «Інститут титану». 69035, м. Запоріжжя, просп. Соборний, 180. E-mail: i.bronetska@ust.edu.us

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

O.V. Овчинников, O.V. Завгородній, V.I. Бронецька, E.A. Сторчак, R.Yu. Білий, M.M. Пясецький (2026) Відцентрове плазмове розпилення порошків із титанових і жароміцних сплавів із застосуванням витратних заготовок електронно-променевої виплавки. *Сучасна електрометалургія*, 02, 7–13. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2026.02.01>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 17.04.2026

Отримано у переглянутому вигляді 08.05.2026

Затверджено до друку 20.05.2026

Оприлюднено 27.05.2026