

Капустян Олексій Євгенович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0002-8979-8076

Погрелюк Ірина Миколаївна, доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, ORCID: 0000-0002-3009-2829

Лаврись Сергій Мирославович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України ORCID: 0000-0003-2616-8699

Канашевич Георгій Вікторович, доктор технічних наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, ORCID: 0000-0002-6708-040X

Білоник Ігор Методійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0002-3873-5307

Осіпов Михайло Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0002-7903-9463

Завгородній Олександр Васильович, аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0009-0005-7967-4757

Білоник Дмитро Ігорович, аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0009-0000-6182-7042

ОТРИМАННЯ ТИТАН-МОЛІБДЕНОВИХ СФЕРИЧНИХ ПОРОШКІВ МЕТОДОМ PREP З ВИКОРИСТАННЯМ КАТОДІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ БЕЗКАМЕРНОЮ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЮ ВИПЛАВКОЮ

Стрімкий розвиток технологій 3D-друку обґрунтовує актуальність виготовлення порошків методом PREP. Підтвердження тому, це активна участь в наукових дослідженнях інноваційних матеріалів, розробці технологій, обладнання фахових установ України, Європи, Китаю, Америки.

Порошки титану та титанових сплавів знаходять широкий попит як жаростійкі, жароміцні та корозійнотривкі матеріали. Відомо, що легування титану молібденом від 3 % до 10 % підвищує його корозійну тривалість в розчинах неорганічних кислот від 20 до 300 разів, що робить цей двокомпонентний сплав перспективним матеріалом для отримання високорозійнотривких порошків. В роботі наведені свідчення о високій біосумісності двокомпонентних титан-молібденових сплавів. Для виготовлення широкого спектру деталей медичного призначення найбільш доцільно використовувати пошаровий синтез двокомпонентним порошком. Титан-молібденові катоди виготовляли зі зливків діаметром 55 мм, які отримали за технологією безкамерної електрошлакової виплавки. Витратні електроди були виготовлені з титанових та молібденових стрічок, які з'єднані в пакет методом TiG. Титан-молібденовий зливочок мав гладку поверхню, щільну бездефектну макроструктуру, включень часток нерозплавленого молібдену не виявлено. Встановлено, твердість відливки та вміст молібдену та титану по перерізу майже не змінювалась. Центр – 33,0...33,2 HRC, Ti – 91,15 %, Mo – 8,83 %; половина радіуса – 33,0...33,5 HRC, Ti – 91,60 %, Mo – 8,84 %; край – 33,5...34,0 HRC, Ti – 91,10 %, Mo – 8,90 %. Розпилений порошок мав наступний хімічний: Ti – основа, 8,700 % Mo; 0,180 % Fe; 0,050 % C; 0,030 % Si; 0,035 % N; 0,150 % O; 0,009 % H, форма часток – сферична, насипна маса 1,9...2,2 г/см³ та фракційний склад: 40...50 мкм – 7 %; 50-60 мкм – 15 %; 60...70 мкм – 23 %; 70...80 мкм – 28 %; 80...90 мкм – 17 %; 90...100 мкм – 7 %. В цілому, порошок відповідає критеріям якості порошків адитивного призначення.

Ключові слова: PREP, порошки з титанових сплавів, електрошлакове виплавлення, витратний електрод, хімічний склад.

Вступ. Інтенсивний розвиток адитивних технологій гостро ставить питання про виробництво витратних матеріалів, взагалі порошків жароміцних, високоміцних та корозійнотривких титанових сплавів.

На сьогоднішній день, титанові порошки для адитивних технологій випускають такі відомі фірми як: Concept Laser (Німеччина), Carpenter Technology Corporation (США), Arcam (Швеція) та інші.

Дослідження по вдосконаленню технологій та обладнання для отримання титанових порошків, покращенню їх властивостей, розширенню марочного складу, активно проводяться в провідних українських науково-дослідних інститутах та університетах (Науково-технічний комплекс «Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Науково-виробниче підприємство "ВМСК", Акціонерне товариство «Інститут титану», Науково-виробниче підприємство "Дельфін").

Одним з найбільш поширених методів отримання титанових порошків, призначених для використання в адитивних технологіях є метод PREP. Сутність методу достатньо повно розкрита в роботах [1, 2].

Для виготовлення порошків методом PREP застосовують широкий спектр сучасних матеріалів таких як титанові, цирконієві та алюмінієві сплави, жароміцні нікелеві та кобальтові сплави, нержавіючу, інструментальну та мартенсито-старіючу сталі та інші [3, 4].

Перспективним матеріалом для отримання висококорозійнотривких порошків є двокомпонентні сплави α -титану з молибденом. Наприклад, в роботі [5] встановлено, що вироби зі сплаву $Ti + 3\% Mo$, які працюють в середовищі 5 % розчину сірчаної кислоти при температурі 100 °C мають корозійну тривкість в 23,5 разів вищу у порівнянні з титаном VT1-0, при 5 % молибдену, корозійна стійкість підвищується в 117,0 разів.

Спільними дослідженнями Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України і Національного університету «Запорізька політехніка» встановлено, що легування α -титану 10 % молибденом при безкамерному електрошлаковому виплавленні ще більш підвищує корозійну тривкість цього сплаву у розчинах неорганічних кислот. Так в водних розчинах 20 % HCl та 40 % H_2SO_4 при кімнатній температурі швидкість корозії сплаву Ti10Mo відбувається значно повільніше у порівнянні з технічно чистим титаном відповідно у 117 та 315 разів [6].

В хімічних технологіях таких, як гідроліз цукру у вторинній кислоті, виробництві кристалічної глюкози, мінеральних добрив, барвників титан-молибденові сплави, як висококорозійностійкі матеріали є пріоритетними [6].

Останнім часом до двокомпонентних титан-молибденових сплавів виникла підвищена увага як до біосумісного матеріалу [7, 8]. Розробкою цього наукового напрямку займаються такі фахові установи як University of Medicine and Pharmacy Iași, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi Romania; Harbin Institute of Technology, Harbin; Central University of Technology, Bloemfontein. Виготовлення деталей медичного призначення, різноманітні хірургічні вироби, імпланти, протези та інші потребують титан-молибденові сплави у вигляді відливок, прокату та найбільш всього, як порошок для 3D-друку [9, 10].

Для цього, перш за все, потрібно отримати титан-молибденовий зливок, який би мав високу фізико-хімічну однорідність, що забезпечить необхідну якість порошків.

На сьогодні основний метод отримання двокомпонентних титан-молибденових сплавів – є вакуумно-дуговий переплав витратного електрода.

Досліджено декілька способів виготовлення витратних електродів. Так, змішування титанової губки ТГ-110 зі штабіками спеченого молибдену, або лігатурою Ti70Mo не дали очікуваних результатів у зв'язку з утворенням в зливку включень нерозчиненого молибдену. Це пояснюється суттєвою різницею у фізичних властивостях вихідних матеріалів. Температура плавлення α -титану 1660 °C, а молибдену – 2660 °C, щільність титану 4500 кг/м³, а молибдену – 10500 кг/м³. Застосування молибденового порошку при пресуванні титанової губки у витратний електрод призводило до великих витрат та також не забезпечило потрібної якості зливка. В роботі [11] досліджено особливості

плавлення витратного електроду, який складався з прутків технічно чистого титану BT1-0 та молібденових штабків. Доведено, що складові такого електроду розплавляються поодиноці і кожна із складових є відокремленим джерелом утворення крапель. В такому випадку отримати достатньо високу фізико-хімічну однорідність зливка не вдається. Тому, вирішення цієї проблеми відбувається шляхом багатократного переплаву титан молібденового зливка, як витратного електроду [12]. Наприклад, сплав 4201 (Mo 28...32%) виплавляють трьох кратним вакуумно-дуговим переплавом.

З результатів роботи автори роблять висновок – для забезпечення високої фізико-хімічної однорідності титан-молібденових зливок потрібно, щоб на торці, який плавиться, утворювалась монолітна ділянка хімічний склад якої був би близьким до розрахункового. Але в умовах вакуумно-дугової плавки це не можливо.

Значно ширші можливості в плані конструкції та виготовлення витратних електродів належать електрошлаковій технології. Комбіновані, біметалеві, поліметалеві, щільної смуги, та смуг з різних матеріалів дозволяють вирішувати широкий спектр технологічних питань. Суттєва розбіжність в температурі плавлення (майже в тисячу градусів) на наш погляд може бути використана в організації принципово нового механізму плавлення витратного електроду – контактного плавлення. Таке плавлення може відбуватися на занурений в шлак частині торця між щільно з'єднаними смугами титану та молібдену. При цьому, в зливку не повинно залишитися часток нерозчиненого молібдену. Але, ці припущення потрібно підтвердити експериментально.

Мета роботи. Визначити можливість отримання титан-молібденових сферичних порошків методом PREP з використанням катодів, що виготовлені безкамерною електрошлаковою виправкою.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Виготовити декілька витратних електродів з урахуванням забезпечення виникнення на торці електроду який занурено в шлакову ванну ефекту контактного плавлення між складовими титан – молібден.
2. Отримати методом безкамерної електрошлакової виправки титан-молібденовий зливко складу Ti10Mo, дослідити макро- та мікроструктуру, визначити розподіл молібдену та твердості по перерізу зливка.
3. Виготовити катоди складу Ti10Mo та провести їх розпилення методом PREP.
4. Дослідити якісні характеристики порошку: хімічний склад, морфологію часток, гранулометричний склад, насипну вагу.

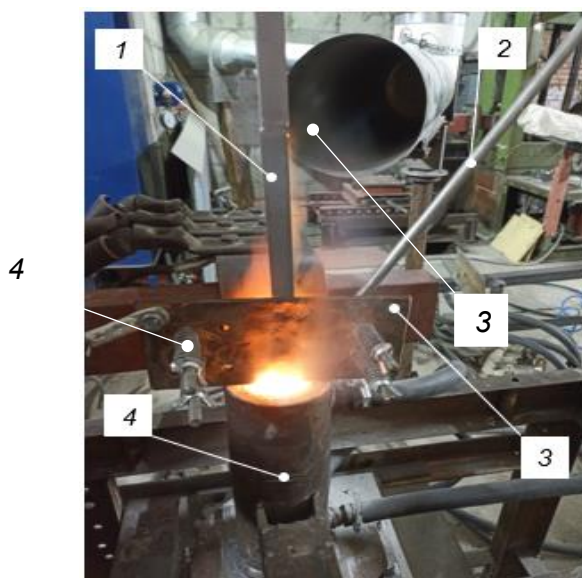
Матеріал, обладнання, методики досліджень. Титан-молібденові зливки діаметром 55 мм для виготовлення катодів отримали безкамерною електрошлаковою виправкою. Витратні електроди складали з трьох титанових стрічок марки BT1-0 (Ti основа; Fe = 0,150 %; C = 0,060 %; Si = 0,020 %; N = 0,025%; O = 0,080 %; H = 0,009 %) перерізом 25 мм × 5 мм та двох молібденових стрічок марки МЧ (Mo – 99,970 %; Fe – 0,015 %; Si – 0,008 %; Ni – 0,038) перерізом 20 мм × 0,5 мм виробництва ТОВ Коростенський металургійний завод. Співвідношення титанових та молібденових стрічок складала 9 до 1. Поверхню стрічок обробляли піскоструминною очисткою та травили в розчині 550 см³ H₂O, 350 см³ HCl та 50 г вторинного натрію[13]. Потім стрічки поєднували між собою у витратний електрод методом TiG. Поверхня стрічок була гладкою, характерною для листів холодної прокатки. При зварюванні це дозволило їх щільно притиснути між собою, що є однією з важливих вимог виникнення ефекту контактного плавлення торця титан-молібденового електроду.

Зливки отримували на електрошлаковій установці А-550, яку додатково обладнали ковзним струмовідводу та пристроєм для захисту аргонном поверхні шлакової ванни і розігрітої частини витратного електроду (рис. 1). Струм плавки 1800...1900 А, напруга – 21 В, флюс – 100 % CaF₂, кристалізатор діаметром 55 мм.

Якість зливка дослідили по наступним показникам: стан поверхні, макро- та мікроструктура, вміст молібдену та твердість в центрі, половині радіусу та краю зливка. Застосували стандартні методики та обладнання.

Враховуючи, що висота кристалізатора складала 250 мм, то зливки виготовили біметалевими (нижня частина α-титан, верхня – α-титан легований 10 % молібдену). Такий варіант виготовлення зливка дозволив з'єднати нижню титанову частину зливка

з хвостовиком із титанового прокату ВТ1-0 для забезпечення необхідної довжини катода (600 мм). Після з'єднання дослідний катод проточили на діаметр 50 мм.



1 – витратний біметалевий електрод; 2 – аргонна система;
3 – ковзний струмопідвід; 4 – кристалізатор

Рисунок 1 – Робочий момент безкамерного електрошлакового виплавлення зливка Ti10Mo

Роботи по розпиленню титан-молібденових катодів виконували на ТОВ «Мультифлекс». Установка для розпилення методом PREP (рис. 2) має наступні характеристики: встановлена потужність – 130 кВт; продуктивність плавлення – 20...150 кг/год; герметична ємність для готового порошку до 250 кг; діаметр заготовки, що переплавляється – 50 мм або 80 мм; частота обертання заготовки – 15000...30000 хв⁻¹; газове середовище суміш газів Ar + He; тиск газу в плавильній камері – від 0,015 мПа до 0,02 мПа; потужність плазмотрону не більше 80 кВт.



Рисунок 2 – Установка для розпилення методом PREP

Розпилення виконали на слідуючій режимі: струм – 950...1000 А, напруга дуги – 45 В, витрата плазмоутворюючого газу – 65...75 л/хв, швидкість обертання витратного електроду – $(17...22) \times 10^3$ хв⁻¹, швидкість подачі витратного електроду – 0,05 м/хв,

зазор між катодом та анодом – 3 мм, відстань між анодом та витратним електродом 30...50 мм, глибина занурення катода – 10 мм.

Порошок досліджено на хімічний склад, морфологію, розподіл по фракціях, насипну вагу.

Хімічний склад визначали спектральним методом з використанням приладу «SPECTROMAX» фірми «SPECTRO». Вміст домішок (азоту, кисню) у частинках порошку визначали за допомогою газоаналізатора моделі ON900 фірми «ELTRA», з консолідованих заготовок виготовлені спеціальні циліндричні зразки діаметром 5 мм довжиною 3,5 мм. Фракційний склад гранул із досліджених сплавів визначений методом розсіву на ситах з розміром комірок (40, 100, 125, 160, 200 та 250) мкм (сухий ситовий аналіз) [14]. Насипна вага визначалася за ISO 3923-1:2008 із застосуванням лійки.

Результати досліджень та їх обговорення. Зовнішній вигляд зливка, його макроструктура, схема вимірювання вмісту молібдену, твердості та мікроструктура наведені на рисунку 3.

Притаманні характеристики якості відливки: гладка поверхня, щільна та бездефектна макроструктура, включення часток нерозплавленого молібдену не виявлено.

Встановлено, що твердість відливки та вміст молібдену по перерізу, майже не змінюється. Перша зона (центр) 33,0...33,2 HRC, Ti – 91,15 %, Mo – 8,83 %; друга зона (половина радіуса) 33,0...33,5 HRC, Ti – 91,60 %, Mo – 8,84 %; третя зона (край) 33,5...34,0 HRC, Ti – 91,10 %, Mo – 8,90%.

Доведено наступне, що застосування біметалевого комбінованого витратного електрода складу титан 90 %, молібден 10 % забезпечило легування зливка вторинного α -титану молібденом в межах поставленої в роботі цілі. Рівномірний розподіл молібдену в зливку пояснюється особливим характером плавлення біметалевого титан-молібденового торця витратного електрода. При зануренні в шлак температура торця складає близько 1400...1500 °C, починає відбуватися процес контактного плавлення між титановими та молібденовими стрічками. Цьому сприяють: висока температура, щільний контакт між стрічками, які виготовлені з чистих матеріалів (BT1-0 та МЧ) «сигароподібний» вигляд діаграми титан-молібден, висока хімічна активність титану [15]. В результаті занурення в шлак торець витратного електрода, який складався із п'яти стрічок, контактним плавленням перетворюється на моноліт орієнтовного хімічного складу 91 % титану та 9 % молібдену. Згідно з діаграмою стану титан-молібден температура плавлення такого сплаву 1700...1750 °C. Далі такий монолітний торець плавиться як звичайний цільний електрод.

Рівномірний розподіл молібдену по перерізу зливка, висока швидкість кристалізації у водоохолоджуваному мідному кристалізаторі є запорукою утворення однорідної та дисперсної двофазної ($\alpha + \beta$)-мікроструктури (рис. 3, г). Мікроструктуру виявили після гартування та травлення шліфа у реактиві Кролла. Встановлено, що мікроструктура має, так звану, «кошикову» будову, β -фаза дисперсна та рівномірно розподілена (рис. 3, г).

Розпилений титан-молібденовий порошок, форма часток, розподіл по фракціям наведено на рис. 4.

Хімічний склад порошку наступний, %: Ti основа; Mo = 8,700; Fe = 0,180; C = 0,050; Si = 0,030; N = 0,035; O = 0,150; H = 0,009. Насипна вага складала 1,9...2,2 г/см³.

Порошок відповідав критеріям якості порошків адитивного призначення: хімічний склад знаходився в межах норм для сплаву Ti10Mo; частинки порошку мали сферичну форму без «сателітів», діаметр частинок порошку відповідав заданому рівню дисперсності, необхідному для 3D-друку.

Подальші дослідження будуть спрямовані на отримання методом 3D-друку зразків деталей та визначення їх властивостей.

Висновки.

1. Встановлена принципова можливість застосування технології безкамерного електрошлакового виплавлення зливок Ti10Mo, призначених для виготовлення катодів установок PREP.

2. Доведено, що висока фізико-хімічна однорідність зливка Ti10Mo забезпечується протіканням процесу «контактного плавлення» торця витратного електрода. При цьому розбіжність по вмісту молібдену в зливку складає не більш 1 %.

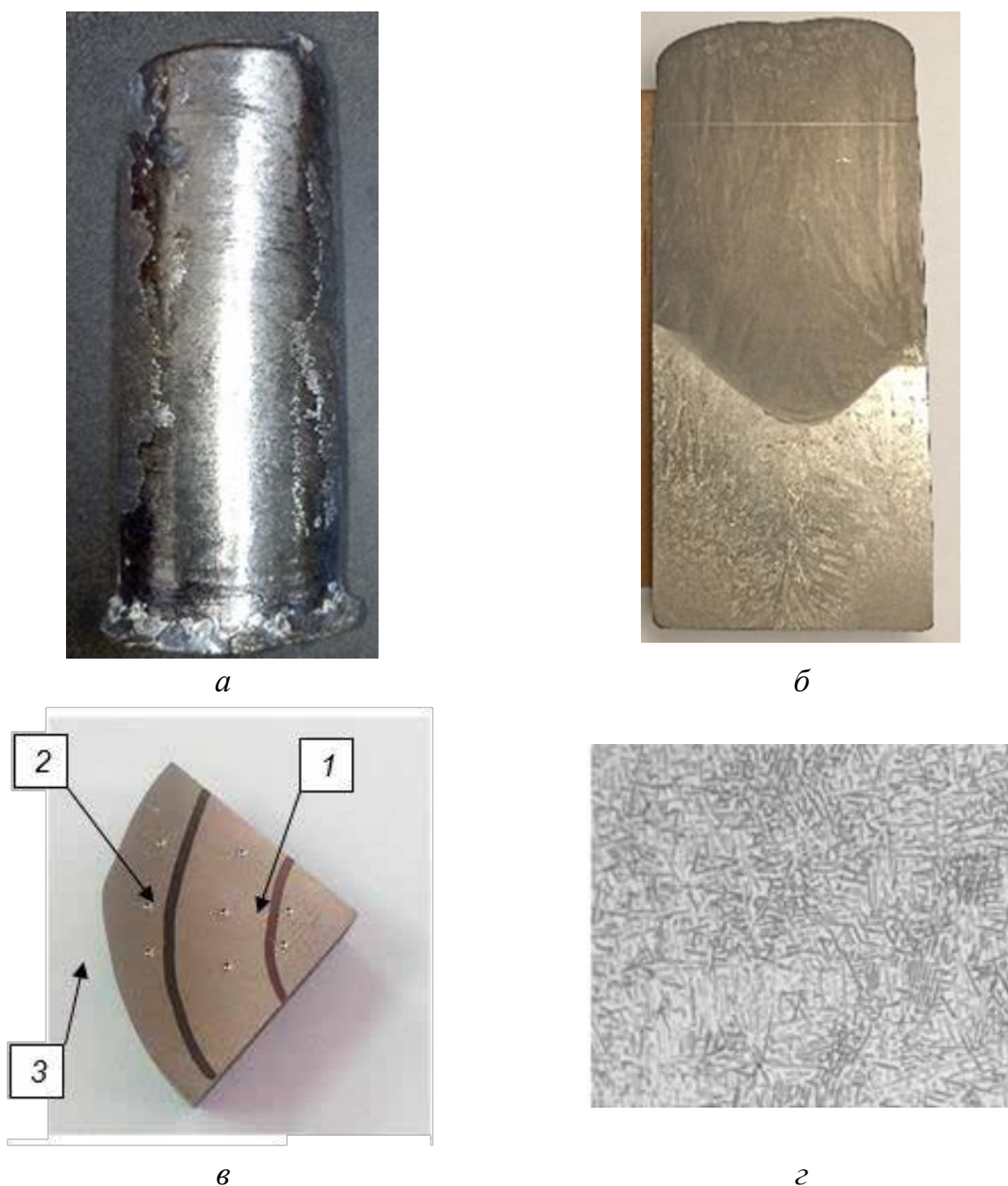


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд зливка (а), макроструктура (б), схема вимірювання вмісту молибдену та твердості (в), мікроструктура (г)

3. Досліджено, що процес розпилення катодів зі сплаву Ti10Mo протікав стабільно, без порушення параметрів режиму, що пояснюється температурою плавлення сплаву Ti10Mo 1750 °C та незначним підвищенням питомої ваги.

4. Визначено, що порошок розпилений з катодів сплаву Ti10Mo має сферичну форму, розподіл часток за основними фракціями: 40...50 мкм – 7 %, 50...60 мкм – 15 %, 60...70 мкм – 23 %, 70...80 мкм – 28 %, 80...90 мкм – 17 %, 90...100 мкм – 7 %, насипна вага 1,9...2,2 г/см³.

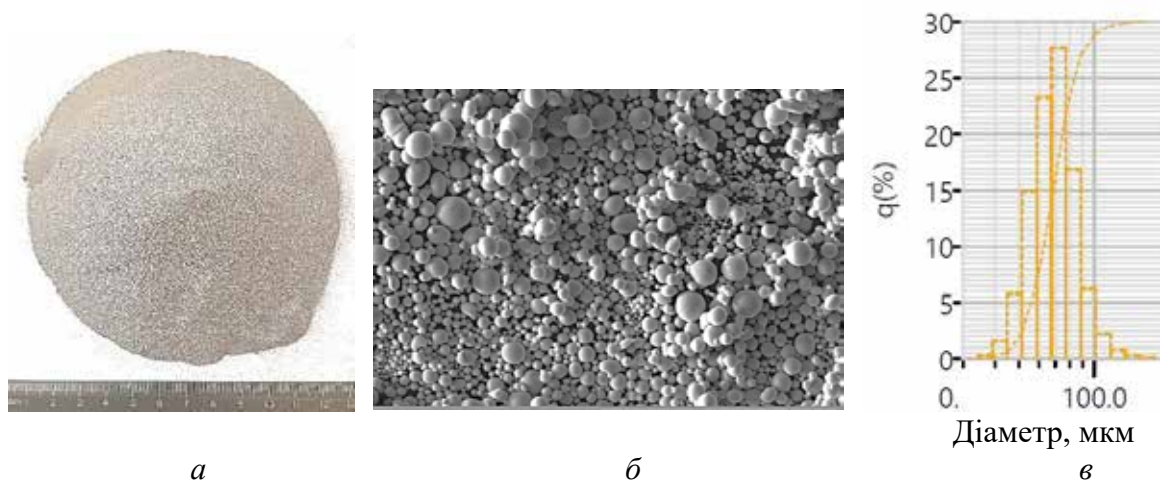


Рисунок 4 – Отриманий титан-молібденовий порошок (а), форма часток (б), розподіл по фракціям (в)

Бібліографічний перелік

1. Chen G., et al. Shape memory TiNi powders produced by plasma rotating electrode process for additive manufacturing // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017. Vol. 27(12). P. 2647–2655.
2. Isonishi K., Kobayashi M., Tokizane M. Production of Ti-6Al-4V alloy powders by plasma rotating electrode process // Tetsu-to-Hagan. 1989. Vol. 75(10). P. 1913–1920.
3. Офіційний сайт ТОВ «МУЛЬТІФЛЕКС». URL: <https://surl.lu/bjophw>. (дата звернення: 30.06.2025).
4. Laboratory of powder and special metallurgy. URL: <https://ussi.zp.ua/poroshkovoy-metal/>. (дата звернення: 30.06.2025).
5. Коррозія. Методи захисту від корозії [електронний ресурс] // – ООО «Спецтехніка-Україна. – Режим доступа: www.spt-ukr.com/library/5/page36 -].
6. Погрелюк І.М., Білоник Д.І., Лаврись С.М., Білоник І.М., Проскурняк Р.В., Капустян О.Є. Підвищення корозійної тривкості титану вторинного виготовлення легуванням молібденом // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2025. Т. 61, № 1. С. 103–108. URL: <http://jnas.nbuu.gov.ua/article/UJRN-0001556647>.
7. Xian W.H., Li D.G., Chen D.R. Investigation on ultrasonic cavitation erosion of TiMo and TiNb alloys in sulfuric acid solution // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 62. P. 104877. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104877.
8. Forna N., Cimpoeșu N., Agop M., Iordache C., Forna D., Mocanu C. Thermal properties of two titanium alloy dental implants – linear behaviour and calorimetric analysis // 2011 E-Health and Bioengineering Conference (EHB). Iasi, Romania, 2011. P. 1–4.
9. Chen Y.Y., Xu L.J., Liu Z.G., Kong F.T., Chen Z.Y. Microstructures and properties of titanium alloys Ti-Mo for dental use // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006. Vol. 16. P. s824–s828. DOI: 10.1016/S1003-6326(06)60308-7.
10. Dzogbewu T.C., de Beer D.J., du Preez W.B. Laser powder bed fusion of Ti15Mo fused tracks and layers // JOM. 2023. Vol. 75. P. 3183–3196. DOI: 10.1007/s11837-023-05842-2.
11. Dzogbewu T.C., du Preez W.B. In situ alloying of Ti10Mo fused tracks and layers via laser powder bed fusion // Manufacturing Review. 2022. Vol. 9. DOI: 10.1051/mfreview/2022022.
12. Добаткин В. И., Аношкин Н. Ф., Андреев А. Л. Слитки титановых сплавов. Металлургия, 1966. 286 с.
13. Применение титана в народном хозяйстве / под ред. А. И. Туманова. Киев: Техника, 1975. 200 с.
14. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов. Киев: Наукова думка, 1990. 512 с.
15. ДСТУ 2640-94. Порошки металеві. Визначення розміру частинок сухим просіюванням (ISO 4497:1983, ГОСТ 18318-94, NEQ; IDT). [На заміну ГОСТ 18318-73; чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1994.
16. Хайрулаев М.Р., Дадаев Д.Х. Контактное плавление в простых системах: монография. Махачкала: Махачкала, 2013. 196 с.

References

1. Chen G., et al. Shape memory TiNi powders produced by plasma rotating electrode process for additive manufacturing // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017. Vol. 27(12). P. 2647–2655.
2. Isonishi K., Kobayashi M., Tokizane M. Production of Ti-6Al-4V alloy powders by plasma rotating electrode process // Tetsu-to-Hagan. 1989. Vol. 75(10). P. 1913–1920.
3. Official website of LLC MULTIFLEX. URL: <https://surl.lu/bjophw>. (date of access: 30.06.2025).
4. Laboratory of powder and special metallurgy. URL: <https://ussi.zp.ua/poroshkovoy-metal/>. (date of access: 30.06.2025).
5. Corrosion. Methods of Protection Against Corrosion [electronic resource] // – LLC "Spetstekhnika-Ukraine". – Access mode [www.spt-ukr.com/library/5/page36 -](http://www.spt-ukr.com/library/5/page36-).
6. Pogrelyuk I.M., Bilonyk D.I., Lavrys S.M., Bilonyk I.M., Proskurnyak R.V., Kapustyan O.E. Increasing the corrosion resistance of secondary titanium by doping with molybdenum // Physico-chemical mechanics of materials. 2025. T. 61, № 1. C. 103–108. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001556647>.
7. Xian W.H., Li D.G., Chen D.R. Investigation on ultrasonic cavitation erosion of TiMo and TiNb alloys in sulfuric acid solution // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 62. P. 104877. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104877.
8. Forna N., Cimpoeșu N., Agop M., Iordache C., Forna D., Mocanu C. Thermal properties of two titanium alloy dental implants – linear behaviour and calorimetric analysis // 2011 E-Health and Bioengineering Conference (EHB). Iasi, Romania, 2011. P. 1–4.
9. Chen Y.Y., Xu L.J., Liu Z.G., Kong F.T., Chen Z.Y. Microstructures and properties of titanium alloys Ti-Mo for dental use // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006. Vol. 16. P. s824–s828. DOI: 10.1016/S1003-6326(06)60308-7.
10. Dzogbewu T.C., de Beer D.J., du Preez W.B. Laser powder bed fusion of Ti15Mo fused tracks and layers // JOM. 2023. Vol. 75. P. 3183–3196. DOI: 10.1007/s11837-023-05842-2.
11. Dzogbewu T.C., du Preez W.B. In situ alloying of Ti10Mo fused tracks and layers via laser powder bed fusion // Manufacturing Review. 2022. Vol. 9. DOI: 10.1051/mfreview/2022022.
12. Dobatkin V. I., Anoshkin N. F., Andreev A. L. Titanium alloy ingots. Metallurgy, 1966. 286 p.
13. Application of titanium in the national economy / edited by A. I. Tumanov. Kyiv: Tekhnika, 1975. 200 p.
14. Gurevich S. M. Handbook of welding of non-ferrous metals. Kyiv: Naukova dumka, 1990. 512 p.
15. DSTU 2640-94. Metal powders. Determination of particle size by dry sieving (ISO 4497:1983, GOST 18318-94, NEQ; IDT). [To replace GOST 18318-73; valid from 1996-01-01]. View. officer Kyiv: SE "UkrNDNC", 1994.
16. Khairulaev M.R., Dadaev D.Kh. Contact melting in simple systems: monograph. Makhachkala: Makhachkala, 2013. 196 p.

Kapustian Oleksii, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0000-0002-8979-8076

Pogrelyuk Irina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, ORCID: 0000-0002-3009-2829

Lavris Sergey, Candidate of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, ORCID: 0000-0003-2616-8699

Kanashevich Georgiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Cherkasy State Technological University, ORCID: 0000-0002-6708-040X

Bilonyk Ihor, candidate of technical sciences, Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0000-0002-3873-5307

Osipov Mikhailo, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0000-0002-7903-9463

Zavgorodniy Oleksandr, PhD student, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0009-0005-7967-4757

Bilonyk Dmytro, PhD student, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0009-0000-6182-7042

**OBTAINING TITANIUM-MOLYBDENUM SPHERICAL POWDER
BY THE PREP METHOD USING CATHODES MANUFACTURED
BY CHAMBER-LESS ELECTROSLAG SMELTING**

The rapid development of 3D-printing technologies justifies the relevance of the production of powders by the PREP method. Confirmation of this is active participation in scientific research of innovative materials, development of technologies, equipment of professional institutions of Ukraine, Europe, China and America. Titanium and titanium alloy powders are in wide demand as heat-resistant, heat-resistant and corrosion-resistant materials. It is known that doping titanium with molybdenum from 3 % to 10 % increases its corrosion duration in solutions of inorganic acids from 20 to 300 times, which makes this two-component alloy a promising material for obtaining highly corrosion-resistant powders. The work provides evidence of the high biocompatibility of two-component titanium-molybdenum alloys. For the production of a wide range of medical parts, it is most advisable to use layer-by-layer synthesis with two-component powder. Titanium-molybdenum cathodes were made from ingots with a diameter of 55 mm, which were obtained using the technology of chamberless electroslag smelting. The consumable electrodes were made of titanium and molybdenum strips, which were connected into a package using the TiG method. The titanium-molybdenum ingot had a smooth surface, a dense defect-free macrostructure; no inclusions of unmelted molybdenum particles were detected. It was established that the hardness of the casting and the content of molybdenum and titanium in the cross section almost did not change. Center – 33.0...33.2 HRC, Ti – 91.15 %, Mo – 8.83 %; half of the radius – 33.0...33.5 HRC, Ti – 91.6 %, Mo – 8.84 %; edge – 33.5...34.0 HRC, Ti – 91.10 %, Mo – 8.90%. The sprayed powder had the following chemical composition: Ti – base, 8.700% Mo; 0.180% Fe; 0.050% C; 0.030% Si; 0.035% N; 0.150% O; 0.009% H, particle shape – spherical, bulk density 1.9...2.2 g/cm³ and fractional composition: 40...50 μm – 7%; 50...60 μm – 15%; 60...70 μm – 23%; 70...80 μm – 28%; 80...90 μm – 17%; 90...100 μm – 7%. In general, the powder meets the quality criteria of additive powders.

Keywords: PREP, titanium alloy powders, electroslag smelting, consumable electrode, chemical composition.