

ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОЇ СФЕРОДИЗАЦІЇ СТРУМОПРОВІДНОГО ТИТАНОВОГО ДРОТУ

В.М. Коржик, Д.В. Строгонов, О.М. Бурлаченко, А.Ю. Тунік, О.В. Ганущак, О.П. Грищенко
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vnkorzhyk@gmail.com

Експериментально підтверджена можливість отримання сферичних титанових порошків шляхом застосування технології плазмово-дугового розпилення компактного струмопровідного дроту марки Ti Grade 2 діаметром 1,6 мм. Аналіз гранулометричного складу порошку показав, що основною фракцією порошку є фракція 25...250 мкм, яка складає 95 % від загального об'єму порошку, кількість частинок фракції <25 мкм та 250...315 мкм не перевищує 5 %. Досліджено параметри форми титанового порошку, показано що більшість частинок має правильну сферичну форму з коефіцієнтом сферичності близьким до 0,8. Кількість дефектних частинок не перевищує 3 % від загальної маси порошку. З'ясовано, що розпилення за схемою дріт-анод призводить до значного підвищення ККД нагріву дроту (приблизно в 4 рази) у порівнянні зі схемою розпилення нейтрального дроту, що сприяє підвищенню продуктивності процесу з 2...5 до 12 кг/год. Показано, що використання технології плазмово-дугової сферодизації титанового дроту дозволяє отримувати сферичні порошки для 3D друку високоякісних виробів для аерокосмічної галузі за технологіями селективного та прямого лазерного плавлення і спікання, електронно-променевого плавлення та методами порошкової (гранульної) металургії (гаряче ізостатичне пресування з наступною термомеханічною обробкою). Бібліогр. 21, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: плазмово-дугове розпилення; струмопровідний дріт; сферодизація; титановий порошок; гранулометричний склад; сферичність

Вступ. Останнім часом у зв'язку з інтенсивним розвитком аерокосмічної, суднобудівної, енергетичної, хімічної та біомедичної галузей виникає потреба у ремонті та виготовленні об'ємних деталей складної форми із титану та його сплавів за допомогою адитивних технологій (3D друку) та гранульної металургії [1].

До основних технологій 3D друку виробів із титану та його сплавів слід віднести: селективне та пряме лазерне плавлення і спікання (SLM — Selective Laser Melting, SLS — Selective Laser Sintering, DMLS — Direct Metal Laser Sintering), електронно-променево плавлення (EBM — Electron Beam Melting). До таких деталей, які виготовляють вказаними способами слід віднести: компоненти реактивних та ракетних двигунів — лопатки, диски компресора та вентилятора, деталі кріплення, кронштейни, захисні оболонки, патрубки; деталі фіюзеляжу літаків — закрилки, лонжерони, шпангоути, стулки шасі; деталі судових енергетичних установок — клапани, труби теплообмінників, компоненти турбін; деталі біомедичного призначення — хірургічні (стоматологічні) імпланти та ендопротези та ін. [2].

В технологіях гранульної металургії, яка включає компактування сферичних частинок (гранул) із мікрокристалічною (нанокристалічною) структурою, що закристалізувалися із розплаву з висо-

кою швидкістю, для виготовлення конструкційних, в тому числі гранульних композитів на основі титанових сплавів і інтерметалідів титану, із комплексом підвищених фізико-механічних характеристик найбільш перспективним способом є гаряче ізостатичне пресування (HIP — Hot Isostatic Pressing) [3]. HIP дозволяє створювати матеріали із задалегідь заданими властивостями за рахунок формування комбінацій гранул різного хімічного, фазового та фракційного складів у необхідних пропорціях. Такі гранульні композити є перспективними для виготовлення деталей авіаційної та автомобільної техніки (компресорні лопатки газотурбінних двигунів, клапани газорозподілу, деталі гідроапаратури, гільзи, поршні тощо).

У цих методах за витратний матеріал для формування адитивних шарів і гранульних композицій використовують спеціалізовані сферичні титанові порошки, до яких висуваються суворі вимоги до їх гранулометричного складу, форми, механічних та технологічних властивостей. Так, наприклад, в процесі SLM використовують порошки вузької фракції розміром 25...45 мкм, EBM — 45...106 мкм, DMLS — 45...150 мкм, а для технології HIP — 106...250 мкм [4]. Також ці порошки повинні мати низький вміст газових сумішей (кисню — не більше 0,15 мас. %, водню — не більше 0,01 мас. %) і високі технологічні вла-

В.М. Коржик — <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Д.В. Строгонов — <http://orcid.org/0000-0003-4194-764X>,
О.М. Бурлаченко — <https://orcid.org/0000-0003-2277-4202>, А.Ю. Тунік — <https://orcid.org/0000-0001-6801-6461>,
О.В. Ганущак — <https://orcid.org/0000-0003-4392-6682>, О.П. Грищенко — <https://orcid.org/0000-0003-2640-8656>

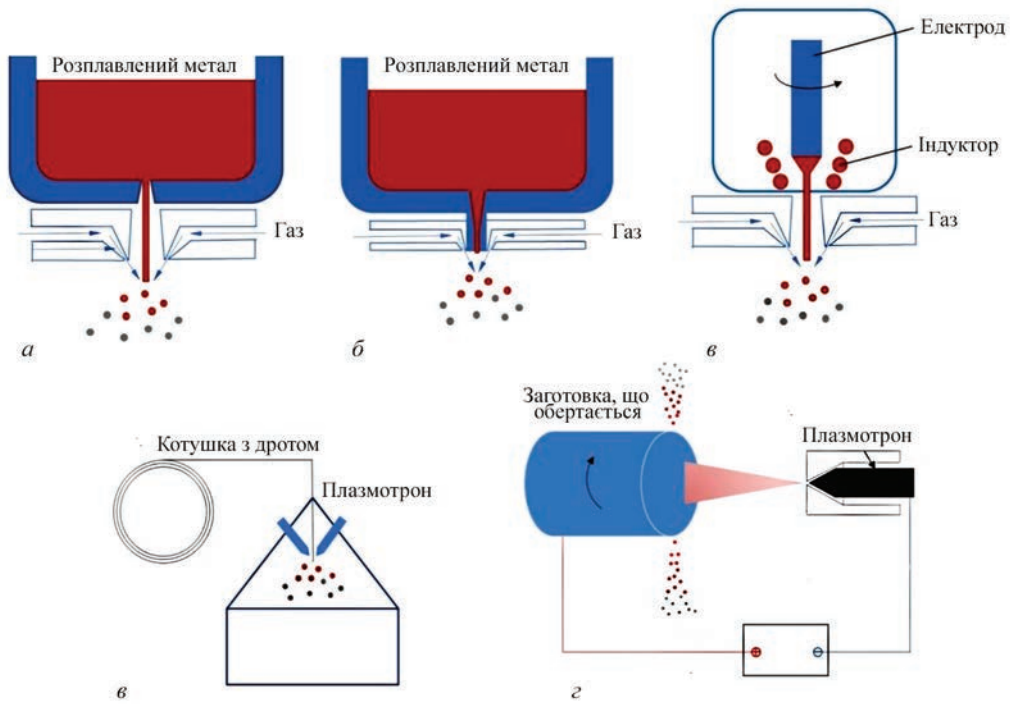


Рис. 1. Схеми процесу розпилення: а — FFGA; б — CCGA; в — EIGA; з — PA; д — PREP [1]

стивості (сипучість, текучість, насипну щільність, коефіцієнт сферичності та ін.). Порошки для НІР повинні мати високу насипну щільність, текучість для забезпечення високої щільності пакування і подальшого пресування, відсутність внутрішніх дефектів (пор), а також мікрокристалічну (в деяких випадках нанокристалічну) структуру, яка формується при твердінні порошків при надвисоких швидкостях охолодження ($10^4 \dots 10^6$ °C/c) та

забезпечує підвищені механічні властивості готового виробу [5].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Загальна практика отримання таких порошків включає наступні технології (рис. 1): газове розпилення вільнопадаючого струменя (FFGA — Free Fall Gas Atomization), газове розпилення обмеженого струменя (CCGA — Close-Coupled Gas Atomization), індукційне плавлення електрода з

Таблиця 1. Особливості різних способів отримання сферичних порошків

Спосіб отримання	Вихідний матеріал	Гранулометричний склад	Продуктивність	Морфологія порошку	Характеристики порошку
FFGA/CCGA	Попередньо підготовлений розплав	Розмір частинок 25...500 мкм, відсоток дрібної фракції <100 мкм до 40 мас. %	До 100 кг/8 год	Форма майже сферична, коефіцієнт сферичності 0,6...0,7	Наявність сателітів, несферичних частинок та частинок з порами і включеннями <15 мас. %
EIGA	Прецизійно оброблені циліндричні заготовки	—>—	—>—	Форма майже сферична, коефіцієнт сферичності > 0,7	Наявність сателітів, несферичних частинок та частинок з порами <10 мас. %
PA	Дротові матеріали, прутки	Розмір частинок 25...300 мкм, відсоток дрібної фракції <100 мкм до 40...50 мас. %	—>—	Форма сферична, коефіцієнт сферичності > 0,8	Наявність сателітів, несферичних частинок та частинок з аргоновими порами <5 мас. %
PREP	Прецизійно оброблені циліндричні заготовки	Розмір частинок 50...500 мкм, відсоток дрібної фракції <100 мкм до 20 мас. %	До 150 кг/8 год	Форма сферична, коефіцієнт сферичності >0,9	Складність отримання фракції <50 мкм, наявність частинок з вольфрамовими включеннями <1,5 мас. %

розпиленням газом (EIGA — Electrode Induction Gas Atomization), відцентрового плазмового розпилення заготовки (PREP — Plasma Rotating Electrode Process), плазмового розпилення дроту (PA — Plasma Atomization) [6].

У табл. 1 наведено ключові особливості вищезазначених способів розпилення та характеристик отриманих порошків [7].

Найбільш поширеними способами отримання сферичних порошків титану є технології GA та PREP [8]. Проте попри наявності великої кількості переваг вони мають ряд недоліків, до яких слід віднести для: GA — відносно низький коефіцієнт сферичності, наявність дефектних сателітних частинок і часто несферичної форми, закриті аргонові пори та ін.; PREP — складність отримання порошків <100 мкм, проблеми, пов'язані з виготовленням циліндричної заготовки з точними розмірами, складність кінематичної схеми цього обладнання, необхідність його експлуатації при надвисоких швидкостях вузлів обертання заготовки (20000...40000 об/хв), труднощі, що виникають при цьому.

Значний потенціал подальшого розвитку і практичного застосування для отримання сферичних порошків із титану і високолегованих титанових сплавів містять технології плазмово-дугового розпилення дротів або прутків, однією із різновидів якої є приведений вище процес PA [9]. Основною перевагою цієї технології є велика кількість технологічних параметрів, завдяки яким можна регулювати гранулометричний склад порошку у широких межах, а також можливість використовувати широку номенклатуру стандартних витратних матеріалів із суцільних дротів та прутків [10].

Відомо, що існує два різновиди процесу плазмово-дугового розпилення дроту (прутка) — схеми з використанням за присадковий матеріал нейтрального та струмопровідного дротів (дріт-анод) [10]. У зв'язку з тим, що технологія плазмово-дугового розпилення знаходиться тільки на етапі промислового впровадження, найбільш розповсюдженим способом є розпилення нейтрального дроту. Проте цей спосіб має суттєвий недолік — низьку продуктивність. У роботі [11] дослідники для розпилення титанового дроту Ti6Al4V використовували комплекс з трьох плазмових генераторів, які дають сукупну продуктивність на рівні 2...5 кг/год. При цьому сумарна електрична потужність, що вкладається у дріт, складає від 20 до 90 кВт, тобто питома електрична потужність для отримання 1 кг титанового порошку становить не менше ніж 10 кВт·год. Варіантом підвищення техніко-економічних параметрів процесу може бути використання технології плазмово-дугового напилення струмопровід-

них дротів, що дозволяє значно підвищити ККД процесу нагріву та плавлення дроту.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є аналіз можливості та оцінка перспективності використання процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідних дротів для отримання сферичних титанових порошків, в тому числі в порівнянні із варіантом розпилення нейтрального дроту. Для досягнення цієї мети необхідно: дослідити гранулометричний склад та параметри сферичності титанового порошку, отриманого за допомогою технології плазмово-дугового розпилення у воду струмопровідного дроту марки Ti Grade 2; провести аналіз ефективності процесу нагріву струмопровідного титанового дроту; надати рекомендації щодо практичного застосування сферичних порошків титану і титанових сплавів, отриманих в процесі плазмово-дугового розпилення.

Матеріали і методика досліджень. Сутність процесу плазмово-дугового розпилення полягає у плавленні струмопровідного дроту-анода, який вводиться у зону високошвидкісного плазмового струменя та подальшому дробленні розплаву, що зривається з торця дроту [12]. Дуга горить між неплавким вольфрамовим катодом і струмопровідним дротом-анодом, що подається за зрізом сопла плазмотрона. Робочий (плазмоутворюючий) газ, що поступає у робочу камеру, нагрівається електричною дугою і витікає із сопла у вигляді плазмового струменя. Відкрита ділянка розряду поза плазмоутворюючим соплом обдувається потоком газу, що витікає з кільцевого зазору між соплами плазмотрона. До особливостей даного способу слід віднести те, що плавлення та струменеве розпилення матеріалу дроту здійснює аргонова плазма, а супутній газ перешкоджає розширенню відкритої ділянки плазмового струменя. Це дозволяє зменшити кут його розкриття за рахунок обтиску плазмового струменя супутнім потоком газу, що забезпечує його прискорення та збільшення газодинамічного напору на торець дроту і сприяє отриманню оптимального фракційного складу дисперсної фази.

Технологічні експерименти проводили у відкритій атмосфері із використанням установки плазмово-дугового напилювання «PLAZER-30» [13], в якій струмопровідний електродний дріт використовували як плавкий анод (рис. 2). Для того, щоб уловлювати розпилені титанові частинки, дріт розпилювали у посудину, наповнену водою, з дистанції 500 мм.

Із застосуванням зазначеного технологічного обладнання проводили дослідження гранулометричного складу частинок при розпилюванні дроту-анода з титану технічного, що відповідає марці Ti Grade 2, США (аналог марки BT1-0 ГОСТ

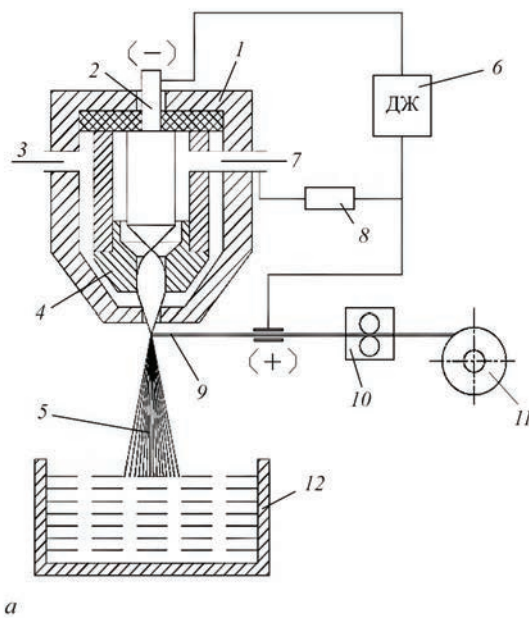


Рис. 2. Схема процесу плазмово-дугового розпилення і сферодизації струмопровідного дроту (а) та зовнішній вигляд процесу розпилення (б): 1 — робоча камера плазмотрона; 2 — вольфрамовий електрод (катод); 3 — канал подачі супутнього газу; 4 — плазмоутворююче сопло; 5 — струмінь розпилюваних частинок; 6 — джерело живлення; 7 — канал подачі плазмоутворюючого газу; 8 — струмообмежувальний опір; 9 — дріт-анод; 10 — механізм подавання; 11 — котушка з дротом; 12 — холодильник з водою [14]

19807–91) діаметром 1,6 мм. Хімічний склад титанового дроту діаметром 1,6 мм марки Ti Grade 2 наступний, мас. %: Fe — <0,25; С — <0,07; Si — <0,10; N — <0,04; O — 0,020; H — <0,01; Ti — основа, а термодинамічні та теплофізичні властивості титану технічного (марки ВТ1-0) [15] такі:

температура плавлення ($T_{пл}$), К	1945
температура кипіння ($T_{кп}$), К	3560
теплота плавлення (λ), Дж/кг	$3,58 \cdot 10^5$
теплота випаровування ($L_{вип}$), Дж/кг	$8,97 \cdot 10^6$
теплоємність титану (C_p) при 1945 К, Дж/кг К	989,2
ентальпія титану (H) при нагріванні від 298 до 1945 К (рідкий титан), Дж/Кг	$3,15 \cdot 10^5$

Згідно раніше отриманих практичних даних, за критерієм візуальної оцінки форми плазмового струменя, при досягненні його мінімального кута розкриття та стабільності процесу було підібрано оптимальний режим та відповідно нього проводили зміни параметрів режиму для з'ясування впливу кожного з них на зміну фракційного складу частинок. Плазмоутворюючим газом служив аргон вищого сорту П згідно ISO 14175–2008 «Welding consumables Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes», у якості супутнього газу використовували повітря.

Розпилення проводили при наступних параметрах процесу: струм — 250 А, витрати плазмоутворюючого газу — 30 л/хв, швидкість подачі дроту — 10,5 м/хв, відстань катод-анод — 8 мм.

Відбір проб для дослідження гранулометричного складу порошку, морфології поверхні та ін.

виконували з використанням лабораторного віброгрохота «Analizzette 3 Spartan» (Німеччина) з комплектом сит 25...500 мкм, маса проби становила не менше 100 г порошку. Гранулометричний склад лабораторних партій порошку проводили методом ситового аналізу згідно методики ISO 25911:1988 «Test sieving Part 1: Methods using test sieves of woven wire cloth and perforated metal plate» за допомогою віброгрохота «Analyset 3 Spartan» з набором сит 25...40, 40...63, 63...80, 80...100, 106...125, 125...160, 160...200, 200...250, 250...315, 315...400, 400...450, 450...500 мкм. Форму частинок, їх мікроструктуру досліджували за допомогою методів оптичної (мікроскоп «Neophot-32» (Німеччина)) та аналітичної растрової електронної (мікроскоп «PHILIPS SEM-515» (Нідерланди)) мікроскопії. Опис форми частинок виконували за методикою зі стандарту ISO 9276-6:2008 «Representation of results of particle size analysis — Part 6: Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology».

Результати досліджень. Дослідження гранулометричного складу та параметрів сферичності титанового порошку. Дослідження гранулометричного складу частинок (рис. 3) показало, що при розпиленні струмоведучого компактного дроту Ti Grade 2 у воду основною фракцією є фракція 25...250 мкм, яка складає 95 % від загальної маси порошку. При цьому кількість частинок фракції <25 мкм та 250...315 мкм при даному режимі розпилення не перевищує 5 %.

Доля фракції 25...45 мкм від загальної маси порошку складає 9,2 мас. %, 45...100 — 39,6; 45...140 — 58,6; 100...250 — 47,5.

Дослідження форми порошку показало, що порошок загалом має правильну сферичну форму (рис. 4), при цьому коефіцієнт сферичності складає 0,76.

Характерними дефектами в отриманому порошку є сателіти, окислені частинки та частинки неправильної форми, доля яких приблизно складає не більше 3 мас. %.

Слід відмітити, що розпилення дроту і формування струменя з перегрітих частинок та їх подальше твердіння здійснювалось на повітрі та у воді, де мають місце процеси інтенсивної хімічної взаємодії титану з киснем, азотом та воднем, що може спричиняти погіршення параметрів сферичності порошку. Схоже явище має місце при розпиленні іншого хімічно активного металу — алюмінію. Автори роботи [16] пояснюють це тим, що на поверхні частинок в процесі їх сферодизації та твердіння утворюється щільний оксидний шар, який призводить до зменшення сили поверхневого натягу розплавленого металу і сприяє формуванню частинок неправильної форми. В роботі [17] відмічається, що плазмово-дугове розпилення дроту у камерах з інертною атмосферою дозволяє отримувати порошок, коефіцієнт сферичності якого може досягати приблизно 0,90. Тому підвищення параметрів сферичності частинок можна досягти за рахунок створення інертної атмосфери у середовищі, де відбуваються процеси розпилення, диспергування та твердіння порошоків.

Оцінка коефіцієнта корисної дії та продуктивності процесів нагріву струмопровідного та нейтрального дровів плазмовою дугою при розпиленні титанового дроту. Розрахунки процесів нагріву та плавлення дроту проводили за наближеним методом В.В. Кудінова [10]. При цьому були прийняті наступні припущення: анодна пляма, яка розташовується на дроті, викликає випаровування 2 мас. % від ваги витраченого дроту (на основі експериментальних досліджень з'ясовано, що при розпиленні нейтрального дроту у воду вага зібраного порошку на 4 мас. % менше ваги розпиленого порошку, а при розпиленні струмопровідного дроту ця величина складала майже 6 мас. %; температура рідких крапель у місці формування розплаву на торці дроту дорівнює температурі плавлення металу (температуру частинок в зоні формування розплаву вимірювали оптичним пірометром, з'ясовано, що їх температура перевищує температуру плавлення металу на 200...300 °С, тому цим перегрівом нехтували і вважали, що дріт у зоні

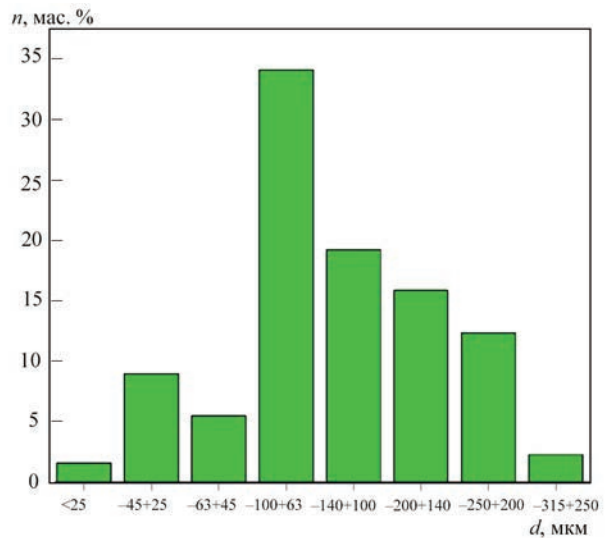


Рис. 3. Гранулометричний склад титанового порошку, отриманого в процесі плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту марки Ti Grade 2

розпилення нагрівається до температури плавлення); коефіцієнт загальної тепловіддачі від газу до дроту визначали виходячи з режиму нагріву та швидкості плавлення нейтрального дроту (при цьому режим нагріву дроту встановлювали таким чином, щоб середньомасова температура плазми при розпиленні нейтрального дроту дорівнювала середньомасовій температурі плазми при розпиленні струмопровідного дроту).

Було розраховано загальний баланс потужності на дроті-аноді, що нагрівається плазмовою дугою:

$$q_t + q_e + q_{дж} = q_{пл} + q_{вип}, \quad (1)$$

де q_t — потужність, що передається дроту за рахунок променистого та конвективного теплообміну зі струменем газу; q_e — потужність, що передається дроту від електронів; $q_{дж}$ — потужність, що виділяється у вильоті дроту при проходженні

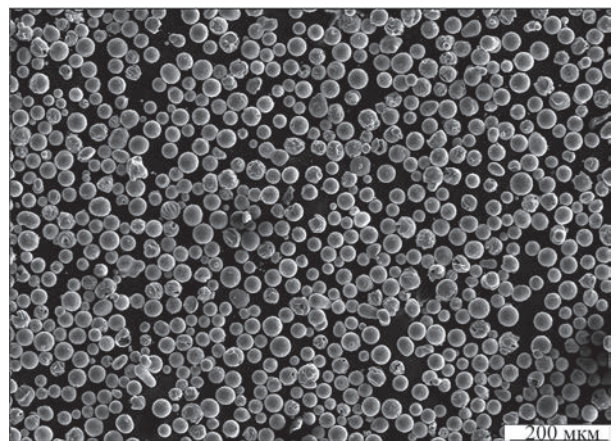


Рис. 4. Морфологія порошку фракції 25...45 мкм, отриманого за технологією плазмово-дугового розпилення компактного струмопровідного дроту марки Ti Grade 2 у воду

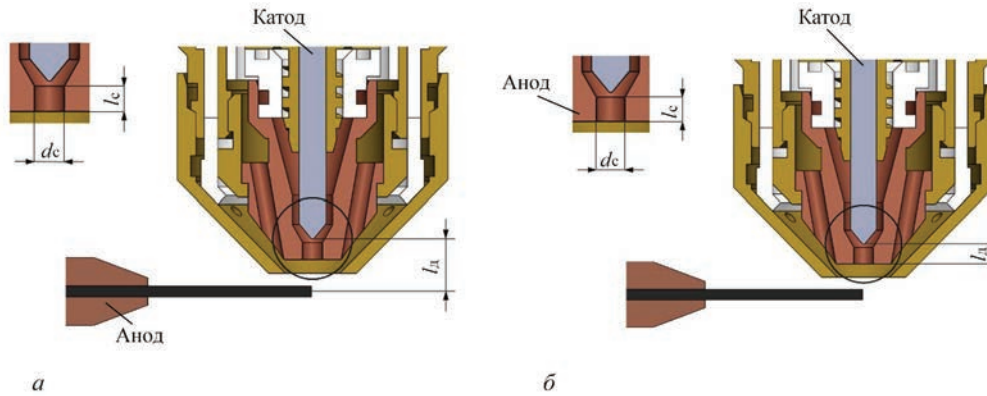


Рис. 5. Конструктивні параметри плазмотрона, мм: *a* — при розпиленні струмопровідного дроту ($l_d = 7$; $d_c = 3$; $l_c = 2$); *b* — при розпиленні нейтрального дроту ($l_d = 3$; $d_c = 3$; $l_c = 2$)

струму; $q_{пл} + q_{вип}$ — потужність, що витрачається на нагрів, плавлення та випаровування дроту.

Середньомасову температуру газу в сопловому каналі плазмотрона було розраховано за наступною формулою [10]:

$$T_{Ar} = \frac{I[U - (U_k + U_a)]}{\pi d_c \alpha_c l_d} \left(1 - e^{-\frac{\pi d_c \alpha_c l_d}{c_p \vartheta}} \right), \quad (2)$$

де I — струм, А; U — напруга дуги, В; d_c — діаметр сопла, м; ϑ — витрата аргону (масова швидкість), кг/с; l_d — довжина дуги, м; $U_k + U_a$ — сума катодного й анодного падіння напруги, що дорівнює 7 В; α_c — коефіцієнт теплообміну між газом та каналом сопла, $\alpha_c = 8,38 \cdot 10^2$ Вт/м²·К; c_p — питома теплоємність аргону, яку в інтервалі температур 8000...12000 можна вважати постійною і рівною $11,3 \cdot 10^2$ Дж/кг·К.

У випадку розпилення струмопровідного дроту струм дуги складав 250 А, напруга дуги — 65 В, витрата аргону (масова швидкість) — $1,49 \cdot 10^{-3}$ кг/с, діаметр сопла — $3 \cdot 10^{-3}$ м, довжина сопла — $2 \cdot 10^{-3}$ м, довжина дуги — $7 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 5), плазмований струмінь розплавляв $3,3 \cdot 10^{-3}$ кг/с титанового дроту марки Ti Grade 2 діаметром 1,6 мм.

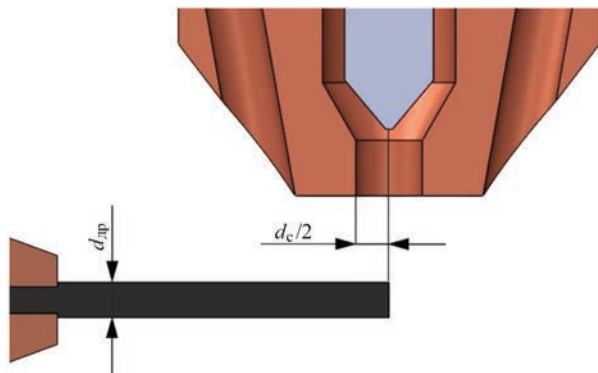


Рис. 6. Конструктивні параметри плазмотрона (мм) при визначенні поверхні теплообміну зі струменем газу: $d_c = 3$; $d_{др} = 1,6$

У випадку розпилення нейтрального дроту відмінними параметрами були: струм дуги — 380 А, напруга дуги — 45 В та її довжина — $3 \cdot 10^{-3}$ м (рис. 5). Це забезпечило отримання однакої середньомасової температури аргонної плазми для обох випадків і відповідно однакову потужність, що передається від плазми до дроту. Згідно з експериментальними даними прийнято, що при такому режимі роботи плазманий струмінь розплавляє 4 кг/год ($1,1 \cdot 10^{-3}$ кг/с) нейтрального титанового дроту марки Ti Grade 2 діаметром 1,6 мм.

Для знаходження потужності, що передається титановому дроту за рахунок теплообміну зі струменем газу при плавленні нейтрального дроту, автори запропонували наступну емпіричну формулу:

$$q_T = V_{пл}(\lambda + H) = 1,1 \cdot 10^{-3} \cdot (3,58 \cdot 10^5 + 3,15 \cdot 10^5) = 741 \text{ Вт},$$

де $V_{пл}$ — швидкість плавлення нейтрального титанового дроту ($1,1 \cdot 10^{-3}$ кг/с); λ — теплота плавлення титану ($3,58 \cdot 10^5$ Дж/кг); H — ентальпія титану при нагріванні від 298 до 1945 К ($3,15 \cdot 10^5$ Дж/кг) (див. термодинамічні та теплофізичні властивості титану).

Результати, отримані авторами на основі експериментальних досліджень [10], показали, що теплообмін між газом та дротом виникає на ділянці $d_c/2$ (рис. 6), де дрід нагрівається від кімнатної температури до температури плавлення металу ($T_{пл}$). При цьому автори зробили припущення, що дрід на ділянці $d_c/2$ має середню температуру $T_{др} = T_{пл}/2$.

Тоді потужність, що передається дроту за рахунок теплообміну зі струменем газу, визначається за формулою:

$$q_T = F \alpha_T (T_{Ar} - T_{др}), \quad (3)$$

де F — площа поверхневого теплообміну, м²; α_T — коефіцієнт повної тепловіддачі від газу до дроту,

Вт/м²; T_{Ar} — середньомасова температура аргонової плазми, К; $T_{др}$ — температура дроту, К.

Площа поверхневого теплообміну визначається:

$$F = \frac{\pi d_{др}^2}{4} + \pi d_{др} \frac{d_c}{2}, \quad (4)$$

де $d_{др}$ — діаметр дроту, який дорівнює $1,6 \cdot 10^{-3}$ м; d_c — діаметр сопла, що дорівнює $3 \cdot 10^{-3}$ м.

Потужність, що передається дроту від електронів, визначається:

$$q_e = I \left(U_{a(Ar)} + \phi \right), \quad (5)$$

де I — струм, що протікає через дріт, А; $U_{a(Ar)}$ — величина анодного падіння напруги для металу дроту в аргоні (2,5 В); ϕ — робота виходу електронів для металу анода (3,9 В).

Потужність, що виділяється у вильоті дроту при проходженні струму, описується формулою:

$$q_{дж} = I^2 \frac{\rho l}{S}, \quad (6)$$

де I — струм, що протікає через дріт, А; ρ — електричний опір провідника зі струмом для титану дорівнює $1,68 \cdot 10^{-6}$ Ом·м; l — довжина провідника (відстань від місця токопідводу); $l = 0,01$ м; S — площа поперечного перерізу дроту діаметром 1,6 мм, яка становить $2,6 \cdot 10^{-6}$ м².

Оскільки при розпиленні струмопровідного дроту випаровується 2 % від загальної маси порошку, швидкість випаровування титану визначається рівнянням: $V_{вип} = V_{пл} \cdot \%_{вип} = 6,6 \cdot 10^{-5}$ кг/с. Для знаходження потужності, що витрачається на випаровування матеріалу дроту, автори запропонували наступну емпіричну формулу:

$$q_{вип} = V_{вип} L_{вип} = 6,6 \cdot 10^{-5} \cdot 8,97 \cdot 10^6 = 592 \text{ Дж},$$

де $V_{вип}$ — швидкість випаровування титану при розпиленні струмопровідного дроту ($6,6 \cdot 10^{-5}$ кг/с); $L_{вип}$ — теплота випаровування ($8,97 \cdot 10^6$ Дж/кг).

Загальна кількість теплоти, що вкладається у дріт в процесі плазово-дугового розпилення, визначається за наступною формулою:

$$q_{заг} = \eta IU. \quad (7)$$

Було розраховано внесок кожної складової у загальний баланс потужності на дроті-аноді із титану при потужності дуги 16 кВт. Результати розрахунків зведено у табл. 2.

У випадку нагрівання плазовою дугою нейтрального титанового дроту ККД дорівнює:

Таблиця 2. Загальний баланс потужності на дроті-аноді

Стаття балансу	Потужність, Вт	Відносна величина балансу, %
Отримувана потужність дроту:		
від електронів	1600	~58
при теплообміні зі струменем плазми	741	~27
при протіканні струму	403	~15
Загалом:	2744	100
Потужність, що витрачається на:		
нагрів і плавлення дроту	2172	~79
випаровування дроту	572	~21
Загалом:	2744	100

$$\eta = \frac{741}{380 \cdot 45} \approx 4 \%,$$

а при розпиленні струмопровідного титанового дроту:

$$\eta = \frac{2744}{250 \cdot 65} \approx 17 \%.$$

Проведені експериментальні дослідження показали, що продуктивність способу плазово-дугового розпилення струмопровідного титанового дроту діаметром 1,6 мм марки Ti Grade 2 в діапазоні споживаної потужності плазмотрона 15...20 кВт знаходиться на рівні 10...12 кг/год. Продуктивність способу плазового розпилення нейтрального дроту діаметром 3,2 мм марки Ti6Al4V згідно з літературними даними може складати приблизно 2,5 кг/год при потужності плазмотрона біля 28 кВт [18] та до 5 кг/год при потужності до 90 кВт [19]. Також слід зазначити, що для PREP технології плазової сферодизації прутків із сплаву марки Ti6Al4V діаметром 75 мм продуктивність процесу складає приблизно 12,5 кг/год при споживаній потужності 38 кВт [20].

Таким чином, процес плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту-анода характеризується більш високими значеннями ККД у 4,25 рази в порівнянні із плазово-дуговим розпиленням нейтрального присадкового дроту, що істотно впливає на продуктивність процесу, максимальні значення якої можуть досягати 12 кг/год для споживаної потужності 20 кВт. Подальше підвищення продуктивності даного процесу досягається збільшенням електричної потужності джерел живлення, плазмотрона і обладнання для плазово-дугового розпилення струмопровідних дротів.

Розрахунки показують, що при підвищенні потужності даного обладнання від 15...20 до 40 кВт можна очікувати збільшення показника продук-

тивності процесу до 18...20 кг/год. В цілому, можливості плазмового обладнання дозволяють підвищувати потужність до 100...120 кВт, що дозволяє використовувати для розпилення як дроти, так і прутки діаметрами 3...6 мм і вище, та ще в більшій мірі збільшувати показник продуктивності процесу отримання сферичних титанових порошків.

Аналіз результатів досліджень. Аналіз результатів досліджень гранулометричного складу продуктів плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту марки Ti Grade 2 показав, що вони переважно представляють собою сферичні порошки з частинками розміром 25...250 мкм. Доля основних фракцій від загальної маси отриманого порошку, які відповідають вимогам різних методів 3D друку, складає: 45...106 мкм — 39,6 % (EVM); 45...140 мкм — 58,6 % (DMLS); 106...250 мкм — 47,5 % (HIP).

Дослідження форми частинок титанового порошку показало, що загалом частинки мають правильну сферичну форму з коефіцієнтом сферичності ($S_{\text{сф}}$) 0,76 при невеликій кількості дефектних частинок (< 3 мас. %). Однак в цьому аспекті потрібно відмітити, що плазмово-дугове розпилення титанового дроту здійснювали в повітряній атмосфері при подальшій кристалізації у воду. В даному процесі плавлення торця дроту та диспергування розплаву здійснюється в аргоновій плазмі, твердіння та формоутворення частинок порошків відбувається в повітряній атмосфері та у воді, що може бути фактором, який впливає на утворення вказаної долі частинок недосконалої сферичної форми.

Дослідження процесів нагріву струмопровідного дроту показало, що основним джерелом нагріву дроту є струм, що складає приблизно 58 % від загальної потужності, яка вкладається у дріт. При цьому ККД нагріву струмопровідного дроту майже у 4 рази більше порівняно з нагрівом нейтрального дроту, що проявляється у зростанні продуктивності процесу з 2...5 до 12 кг/год. Різке підвищення ККД нагріву дроту плазмовою дугою у порівнянні з плазмовим струменем може пояснюватися частковою зміною механізму нагріву з теплообмінного на механізм електронного бомбардування, коли електрони, що пройшли стовп дуги, гальмуються в анодній області, утворюючи надлишковий негативний заряд і осідають на аноді, віддаючи йому свою енергію [21].

Також слід зауважити, що показник питомих енерговитрат для отримання 1 кг титанового порошку за технологією плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту складає 1,5...1,7 кВт·год/кг, що є значно нижчим показником у порівнянні з іншими про-

мисловими технологіями плазмового розпилення — розпиленням нейтрального дроту, де значення показника питомих енерговитрат можуть варіювати в широких межах в залежності від характеристик обладнання та становити 11 кВт·год/кг при потужності плазмотрона 28 кВт або 18 кВт·год/кг при загальній потужності трьох плазмотронів 90 кВт. Для технології PREP питома споживана потужність для отримання 1 кг титанового порошку становить біля 3 кВт·год/кг. При цьому потрібно врахувати, що дослідження в цій роботі приводили на прикладі титанового дроту діаметром 1,6 мм. При використанні дротів більших діаметрів в цьому процесі існує потенціал подальшого зниження питомої енергоефективності.

Отримані результати гранулометричного складу та параметрів сферичності порошку дозволяють рекомендувати технологію плазмово-дугової сферодизації струмопровідного дроту для отримання сферичних порошків (гранул) із титану і титанових сплавів для 3D друку способами прямого лазерного та електронно-променевого плавлення, а також за допомогою методів порошкової металургії. Аналіз гранулометричного складу частинок показав, що для використання титанових порошків при селективному лазерному плавленні і спіканні є необхідним проведення подальших досліджень по оптимізації режимів плазмово-дугового розпилення дроту з метою збільшення долі фракції 25...45 мкм у загальному об'ємі порошку. Також слід зауважити, що значна доля фракцій отриманого порошку по розмірам і коефіцієнту сферичності відповідає вимогам до матеріалів для технологій компактування в гранульній металургії, особливо для процесу HIP (106...250 мкм). Зокрема, вказані порошки, отримані при надвисоких швидкостях охолодження, створюють умови для формування мікроструктурної (а в деяких випадках нанокристалічної) структури, що сприятливо впливає на механічні властивості отриманих із них виробів.

Висновки

1. На прикладі титанового дроту Ti Grade 2 діаметром 1,6 мм підтверджена перспективність застосування технології плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту для отримання сферичних порошків із титану і титанових сплавів. Встановлено, що при плазмово-дуговій сферодизації струмопровідного титанового дроту основною фракцією є фракція розміром 25...250 мкм, яка складає 95 % від загальної маси порошку, кількість частинок фракції <25 та 250...315 мкм при оптимальних режимах розпилення знаходиться на досить низькому

рівні і не перевищує 5 %. Загалом частинки мають правильну сферичну форму з показником коефіцієнта сферичності близьким до 0,8 при невеликій кількості дефектних частинок (<3 мас. %).

2. Обґрунтовано підвищену енергетичну ефективність процесу плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту-анода, який в порівнянні із плазово-дуговим розпиленням нейтрального присадкового дроту характеризується в 4,25 рази більш високими значеннями ККД та в 1,5...6,0 разів показником максимальної продуктивності процесу (відповідно 12 кг/год при 20 кВт та 2...5 кг/год у випадку показника споживаної електричної потужності 20...90 кВт) та меншим питомим енергоспоживанням (1,6 кВт·год/кг для плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту і 11...18 кВт·год/кг для нейтрального). Також по показникам продуктивності і питомого енергоспоживання ця технологія має переваги перед процесом PREP (3 кВт·год/кг), який використовується в промисловості для отримання титанових порошків сферичної форми.

3. Отримані результати дозволяють розглядати плазово-дугову сферодизацію струмопровідного дроту як ефективну технологію для отримання порошків (гранул) сферичної форми із титану і титанових сплавів, що відповідають вимогам до матеріалів для 3D друку високоякісних виробів методами селективного та прямого лазерного плавлення і спікання, електронно-променевого плавлення, а також вимогам до матеріалів для гранульної металургії (одержання високоякісних конструкційних металевих матеріалів шляхом компактування частинок (гранул) із мікрористалічною структурою, що закристалізувалися із розплаву з високою швидкістю).

Список літератури/References

1. 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>
2. Fang, Z., Paramore, J., Sun, P. et al. (2018) Powder metallurgy of titanium — past, present, and future. *Inter. Materials Reviews*, **63**(7), 407–459. DOI: <https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1366003>
3. Kim, K.T., Yang, H.C. (2013) Densification behavior of titanium alloy powder under hot isostatic pressing. *Powder Metallurgy*, **44**(1), 41–47. DOI: <https://doi.org/10.1179/003258901666158>
4. Yanko, T.V., Ovchinnikov, A.V., Korzhyk, V.N. et al. (2018) Technological scheme for producing of titanium alloy powders of aircraft purpose for 3D-printing. *Tekhnologicheskie Sistemy*, **4**, 36–41 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.29010/085.7>
5. Kim, Y. et al. (2014) Microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed Ti–6Al–4V alloy. *J. of Alloys and*

- Compounds*, **603**, 207–212. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.03.022>
6. Yim, S., Bian, H., Aoyagi, K., Yamanaka, K. (2021) Spreading behavior of Ti48Al2Cr2Nb powders in powder bed fusion additive manufacturing process: Experimental and discrete element method study. *Additive Manufacturing*, **73**, 337–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102489>
 7. 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>
 8. Nie, Y., Tang, J., Teng, J. et al. (2020) Particle defects and related properties of metallic powders produced by plasma rotating electrode process (PREP). *Advanced Powder Technology*, **31**, 2912–2920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.05.018>
 9. Smirnov, S.A., Kirsankin, A.A., Kalaida, T.A. (2022) Properties of the spherical titanium VT1-00 powder fabricated by plasma atomization of a wire. *Metall.*, **4**, 741–745. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029522070126>
 10. Kudinov, V.V. (1966) *Heating of current-conducting wire by constricted arc* [in Russian].
 11. Kang, I.J., Park, H.J., Cho, C.H. et al. (2021) Development of a plasma and gas hybrid atomization system for the production of metal powder materials. *J. of the Korean Physical Society*, **79**, 1141–1150. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40042-021-00341-6>
 12. Korzhyk, V.M., Khaskin, V.Yu., Yao Yuhui et al. (2022) Influence of accompanying compressing air flow on the coating structure and properties in plasma-arc spraying by consumable current-conducting wire. *The Paton Welding J.*, **2**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.02.01>
 13. Korzhik, V.N., Korob, M.F. (2012) Mechanized line PLAZER 30PL-W for plasma-arc wire surfacing of coatings on large-sized parts of “shaft” type. *Svarshchik*, **4**, 13–15 [in Russian].
 14. Strogonov, D.V., Korzhyk, V.M., Jianglong, Yi et al. (2022) Influence of the parameters of the process of plasma-arc spheroidization of current-conducting wire from low-carbon steel on the granulometric composition of the produced powders. *Suchasna Elektrometalurhiya*, **3**, 29–37 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.03.05>
 15. Desai, P.D. (1987) Thermodynamic properties of titanium. *Inter. J. Thermophys*, **8**, 781–794.
 16. Dietrich, S., Wunderer, M., Huissel, A., Zaeh, M. (2016) A new approach for a flexible powder production for additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, **6**, 88–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.11.012>
 17. Kalayda, T.A., Kirsankin, A.A., Ivannikov, A.Yu. et al. (2021). The plasma atomization process for the Ti–Al–V powder production. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1942**, 012046. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1942/1/012046>
 18. 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>
 19. *Producing the most spherical, pure titanium powders*. https://www.pyrogenesis.com/wp-content/uploads/2019/09/Project_Producing-the-Most-Spherical-Pure-Titanium-Powders.pdf
 20. *LargeScale PREP System*. (SLPAH). <https://prep-system.com/slpa-h/>
 21. Bykovskiy, O.G. (2021) *Welding, cutting and quality control during production of metal structures*. Kyiv, Osнова [in Ukrainian].

EFFECTIVENESS OF THE PROCESS OF PLASMA-ARC SPHEROIDIZATION
OF CURRENT-CONDUCTING TITANIUM WIRE

V.M. Korzhyk, D.V. Strogonov, O.M. Burlachenko, A.Yu. Tunik, O.V. Ganushchak, O.P. Hrishchenko
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

The possibility of producing spherical titanium powders by application of the technology of plasma-arc atomization of compact current-conducting Ti wire of Grade 2 of 1.6 mm diameter was experimentally confirmed. Analysis of granulometric composition of the powder showed that the main fraction of the powder is 25...250 μm , making up 95 % of the total powder volume, quantity of particles of <25 μm and 250...315 μm fractions not exceeding 5 %. Parameters of the titanium powder shape were studied. It was shown that the majority of the particles are of a regular spherical shape with sphericity coefficient close to 0.8. The quantity of defective particles is not more than 3 % of the total weight of the powder. It was found that atomization by the wire-anode scheme leads to a considerable increase of wire heating efficiency (by approximately 4 times), compared to the scheme of atomization of neutral wire, which promotes an increase of process efficiency from 2...5 to 12 kg/h. It is shown that application of the technology of plasma-arc spheroidizing of the titanium wire allows producing spherical powders for 3D printing of high-quality products for the aerospace industry by the technologies of selective and direct laser melting and sintering and by the methods of powder (granulated) metallurgy (hot isostatic pressing with subsequent thermomechanical treatment). Ref. 21, Tabl. 2, Fig. 6.

Key words: plasma-arc atomization; current-conducting wire; spheroidizing; titanium powder; granulometric composition; sphericity

Надійшла до редакції 30.02.2023



The best international provider of certification and best practices, to ensure the highest standards for all welding projects with global scope and impact



INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING

A world of joining experience

iiwelding.org

Training and certification in welding and metal additive manufacturing • Exchange of knowledge and research • Books, recommended practices and position statements for industry • ISO standardizing body
Scientific journal *Welding in the world* • Building future leaders in welding