

РОЗВИТОК ПЛАЗМОВО-ДУГОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОТРИМАННЯ СФЕРИЧНИХ ГРАНУЛ ДЛЯ АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА І ГРАНУЛЬНОЇ МЕТАЛУРГІЇ

В.М. Коржик, Д.В. Строгонов, О.М. Бурлаченко, О.М. Войтенко, Д.В. Куницький

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vnkorzhyk@qq.com

Розглянуто технологічні та структурні властивості сферичних гранул і особливості процесів їх отримання з використанням промислових технологій газового розпилення розплаву, плазмового відцентрового розпилення заготовки, що обертається, та плазмово-дугового розпилення нейтральних і струмопровідних дротів і прутків. З'ясовано, що серед розглянутих способів отримання сферичних гранул найперспективнішим з точки зору продуктивності, енергоефективності та простоти обладнання, що використовується, є спосіб плазмово-дугового розпилення, який завдяки наявності великої кількості технологічних і конструктивних параметрів процесу дозволяє регулювати гранулометричний склад і технологічні властивості гранул у широких межах. Експериментальні дослідження показали, що розподіл за розмірами, фактор форми та технологічні властивості гранул із титанових сплавів і нержавіючої сталі, отриманих в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України спільно з ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР» за технологією плазмово-дугового розпилення струмопровідних дровових матеріалів, знаходяться на рівні найкращих зарубіжних аналогів. Запропоновано перспективний напрям підвищення енергоефективності та продуктивності процесу отримання сферичних гранул для адитивного виробництва та гранульної металургії з використанням технології плазмово-дугового розпилення струмопровідних прутків діаметром більше 50 мм на оберненій полярності плазмотронами з пустотілим мідним анодом. Бібліогр. 29, табл. 4, рис. 20.

Ключові слова: плазмово-дугове розпилення струмопровідних дротів та прутків, сферичні гранули, адитивне виробництво, селективне та пряме лазерне плавлення і спікання, гранульна металургія

Вступ. Тенденції розвитку сучасної промисловості в передових країнах світу показали, що подальший розвиток аерокосмічної, суднобудівної, енергетичної, хімічної та біомедичної галузей неможливий без розробки та виготовлення нових спеціальних матеріалів із заданими властивостями та технологій їх обробки, насамперед адитивними (AM – Additive Manufacturing) [1]. Серед найзастосовуваніших технологій AM можна відзначити технологію «Bed Deposition», до якої відносяться процеси селективного та прямого лазерного плавлення і спікання (SLM – Selective Laser Melting, SLS – Selective Laser Sintering, DMLS) та електронно-променевого плавлення (EBM - Electron Beam Melting); технологію «Direct Energy Deposition» – прямий енергетичний метод наплавлення, до якого відносяться процеси лазерного наплавлення (DMD - Direct Metal Deposition та LENS - Laser Engineered Net Shaping) і холодного газодинамічного напилення (CS – Cold Spraying) та технологію виготовлення точних заготовок з мінімальним припуском на механічну обробку за допомогою методів компактування у гранульній металургії – гарячого ізостатичного пресування (HIP – Hot Isostatic Pressing) та ін.

Усі ці методи в якості витратного матеріалу для формування адитивних шарів і гранульних композицій в основному використовують спеціалізовані

сферичні гранули, до яких висуваються суворі вимоги, а саме: ці гранули повинні мати високу ступінь сферичності при відсутності сателітів та ін. дефектів [2, 3], їх гранулометричний склад, який для процесів SLM та DMLS повинен лежати в діапазоні 15...63 мкм, для CS – 15...45 мкм, для SLS – 15...80 мкм, для EBM – 45...106 мкм, для LENS та DMD – 45...150 мкм, а для технології HIP фракції – 106...250 мкм. При цьому такі гранули повинні мати мінімальну пористість і стабільний хімічний і фазовий склад.

На даний час найпоширенішими технологіями отримання гранул для адитивного виробництва є газове розпилення розплаву [4]. При цьому певну долю в цих процесах займають плазмово-дугові технології, які відрізняються рядом переваг [5]. Значне розширення застосування адитивного виробництва та його переходу на новий технологічний рівень потребує нових технологій отримання витратних матеріалів, що відповідають ряду критеріїв за якістю, технологічними характеристиками, продуктивністю, собівартістю та ін. У зв'язку із цим дана робота направлена на вирішення таких задач:

- проведення критичного огляду існуючих технологій отримання сферичних гранул для адитивного виробництва та перспективних напрямів їх розвитку;

- обґрунтування ефективності та аналіз нових напрямків розвитку плазово-дугових технологій і обладнання отримання сферичних гранул для адитивного виробництва та гранульної металургії;

- опис нових результатів отримання сферичних гранул плазово-дуговим розпиленням дровових матеріалів, а також прутків і крупногабаритних зливків.

Огляд існуючих технологій отримання сферичних гранул для адитивного виробництва. До основних технологій отримання сферичних гранул для адитивного виробництва можна віднести: газове розпилення розплаву інертним газом GA – Gas Atomization (газове розпилення вільнопадаючого струменя FFGA – Free Fall Gas Atomization, газове розпилення обмеженого струменя CCGA – Close-Coupled Gas Atomization, індукційне плавлення електроду з розпиленням газом EIGA – Electrode Induction Gas Atomization) та технології плазового розпилення дровів і прутків (відцентрового плазового розпилення заготовки, що обертається, PREP – Plasma Rotating Electrode Process і плазове розпилення дровових матеріалів PA – Plasma Atomization).

У даний час GA є найрозповсюдженішим способом виготовлення сферичних гранул із різних металів і сплавів для АМ. У методі GA (рис. 1) вихідний матеріал розплавляється в захисній атмосфері (вакуумі чи інертному газі) або на повітрі (при плавленні у відкритій печі).

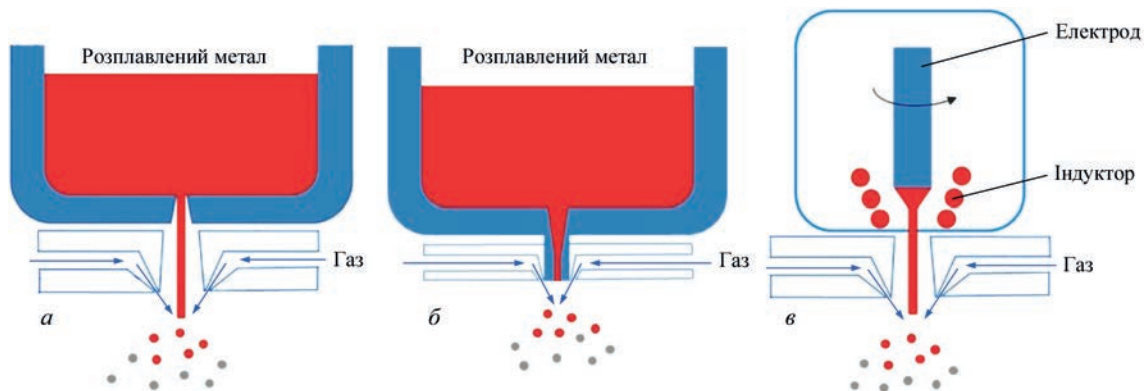
Потім отриманий розплав зливається через розпилювальний пристрій, у якому проводиться руйнування потоку розплаву струменем високошвидкісного інертного газу (азот, гелій, аргон), який розбиває розплав на дрібні краплі, які охолоджуються та твердіють, потрапляючи всередину камери розпилення та розміри яких можна визначити із наступного співвідношення [7]:

$$D_p = \frac{We \cdot \sigma}{\rho \cdot U^2}, \quad (1)$$

де D_p – середній розмір часток, мкм; σ – сила поверхневого натягу, Н/м²; ρ – щільність рідини, кг/м³;

U^2 – відносна швидкість між газом та часткою, м/с; We – критерій Вебера.

У роботі [8] показано, що EIGA розпилення при потужності індуктора у 50...70 кВт, швидкості обертання електроду 15...40 %/с та тиску розпилення 5...8 МПа дозволяє отримувати сферичні гранули із титанового сплаву Ti-6Al-4V з розмірами 1...400 мкм. При цьому гранули мали середній розмір $d_{50} = 145...190$ мкм, де до 50 мас. % складала гранули розміром 50...180 мкм. Також слід відзначити, що з підвищенням тиску до 7...8 МПа значно підвищується кількість сателітів на окремих гранулах унаслідок того, що окремі частинки різних розмірів зіштовхуються одна з одною в процесі розпилення. Подібні результати було отримано в [9], де дослідження гранулометричного складу часток із титанового сплаву Ti-45Al-2Nb-2Mn, отриманих за технологією електродугового плавлення зливка (струм дуги 475 А) та подальшого розпилення розплаву при тиску розпилення 5,5 МПа показало, що середній діаметр гранул $d_{50} = 143...168$ мкм, а менше ніж 35 % гранул мають розмір <100 мкм, бажаний для АМ. Автори [10] зазначають, що при потужності індуктора у 240 кВт і тиску розпилення 5 МПа при витраті аргону у 18 м³/хв. продуктивність зазначеного способу може досягати 10...75 кг/год. за титановим сплавом Ti-6Al-4V, а коефіцієнт сферичності в середньому складає не більше 0,83. Також при цьому має місце захоплення газу під час твердіння гранул в GA, яке призводить до утворення пор у цих гранулах. Такі захоплені пори можуть значно збільшити пористість деталей, виготовлених за АМ технологією, яка може досягати 0,63 об. % [11], де навіть подальша НІР обробка дозволяє лише зменшити розмір і кількість пор, але не повністю усунути газову пористість. Таким чином, попри велику продуктивність процесу GA, отримані гранули відрізняються відносно низьким коефіцієнтом сферичності, наявністю великої кількості сателітів, аргонною пористістю, а гранулометричний склад гранул лежить у широкому



діапазоні, де лише невелика частка знаходиться в інтервалі, придатному для використання у АМ.

До іншого виду розповсюджених технологій отримання сферичних гранул для адитивних технологій відноситься великий спектр плазмово-дугових технологій розпилення дротів і прутків, серед яких можна виділити способи PREP і PA.

У процесі PREP розпилюваний електрод розплавляється плазмовою дугою, під дією відцентрової сили розплавлений метал розлітається радіально, утворюючи дрібні краплі, та після цього твердіє в сферичні гранули завдяки силі поверхневого натягу (рис. 2, а).

Відомо, що найбільший вплив на гранулометричний склад гранул у зазначеному процесі має швидкість обертання заготовки [12], де розміри розпилюваних гранул можуть бути розраховані з наступного рівняння:

$$D_p = \frac{K}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \cdot D}}, \quad (2)$$

де D_p – середній розмір часток, мкм; σ – сила поверхневого натягу, Н/м²; ρ – щільність рідини, кг/м³; ω – швидкість обертання заготовки, об/хв; D – діаметр заготовки, м; K – поправочний коефіцієнт.

У загальному випадку процес розпилення ведеться при надвисоких швидкостях обертання електроду (до 9000...25000 об/хв), що дає змогу регулювати гранулометричний склад у широкому діапазоні 50...500 мкм. У роботі [13] показано, що підвищення швидкості обертання заготовки з 9000 до 23000 об/хв при PREP розпиленні електроду із титанового сплаву Ti–6Al–4V діаметром 55 мм при потужності плазмотрона у 75 кВт дозволяє зменшити середній діаметр гранул з $d_{50} = 320$ до 127 мкм, проте при цьому існують значні труднощі з отриманням дрібнофракцій <75 мкм, доля якої не перевищує 10 мас. %, яка широко застосовується у галузі адитивних технологій. Тобто

основним обмеженням PREP є те, що доступна застосовувана швидкість обертання не підходить для формування гранул малих розмірів, що свідчить про те, що існує нагальна потреба у проектуванні та виготовленні обладнання зі збільшеною швидкістю обертання електрода. Також з істотними технологічними складнощами пов'язано процес виготовлення прецензійної заготовки під розпилення, найчастіше за допомогою технології вакуумно-індукційної плавки, та її подальшої механічної обробки, неможливістю виготовлення заготовок із матеріалів з високою твердістю та крихкістю (системи легування Cr–Mo–Fe, Fe–Al, Ni–Al та ін.), недостатньо ефективному використанні матеріалу заготовки (довжина огарку в середньому складає не менше 5 см), невисоку продуктивність процесу та ін.

Простішим і технологічно доступним методом такого розпилення є плазмове розпилення нейтральних дротів і прутків невеликих діаметрів (PA – Plasma Atomization), де плавлення та диспергування матеріалу цих дротів відбувається завдяки енергії та напору плазмового струменя, який генерується трьома дуговими плазмотронами (рис. 2, б). У [14] показано, що зазначений процес може мати якнайменше вісім регульованих технологічних і конструктивних параметрів процесу, завдяки яким можна регулювати гранулометричний склад гранул. При цьому розмір гранул можна розрахувати, використовуючи наступне рівняння:

$$D_p = \frac{3,35 \cdot d_c^2}{Q(1 + 0,00367 \cdot T)} \cdot \sqrt{\frac{d_{др} \cdot \sigma}{\rho}}, \quad (3)$$

де Q – витрата плазмоутворюючого газу, м³/с; d_c – діаметр сопла плазмотрону, м; T – середньомасова температура плазмового струменя на зрізі сопла, °К; $d_{др}$ – діаметр дроту, м; ρ – щільність рідини, кг/м³; σ – сила поверхневого натягу, Н/м.

Так, наприклад, змінюючи обсяг подачі плазмоутворюючого газу, можна змінювати кінетичну

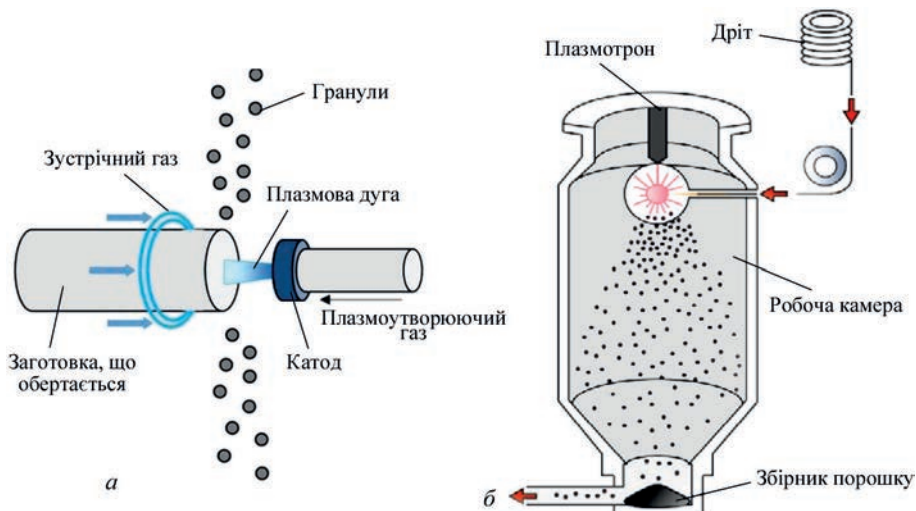


Рис. 2. Технологічні схеми процесів плазмово-дугового розпилення дротів та прутків: PREP (а) та PA (б) [16]

енергію плазмового струменя, що призводить до більшого або меншого подрібнення крапель розплаву, а змінюючи силу струму, що подається на плазмотрон, можна регулювати швидкість розплавлення розпилюваного електрода та об'єм рідини, що утворюється на його торці тощо. При цьому також необхідно враховувати, що збільшення діаметра розпилюваного електрода, з одного боку, призводить до підвищення продуктивності процесу, з іншого - до зниження кількості дрібнофракцій гранул <80 мкм, так як при використанні дротів і прутків великих діаметрів збільшується маса розплаву, що надходить до зони розпилення, зменшується інтенсивність дроблення первинних крапель. Дослідники [15, 16] показали, що використання системи, яка складається з трьох плазмотронів з сумарною потужністю у 83 кВт та витратою плазموутворюючого газу у 18...22 м³/год., дозволяє отримувати сферичні гранули із титанового дроту марки Ti Grade2 діаметром 1,6 мм у досить широкому діапазоні 10..300 мкм із середнім діаметром $d_{50} = 189$ мкм, де вміст кисню O₂ складає менше 0,055 %. При цьому гранули характеризуються мінімальною кількістю дефектних часток в обох випадках не перевищує 1 мас. %, а їх пористість не перевищує 0,08 об. %. Проте слід зазначити, що максимальна продуктивність процесу за титановими сплавами в загальному випадку не перевищує 1,5 кг/год.

Критичний аналіз структурних, технологічних і техніко-економічних характеристик сферичних гранул та існуючих технологій їх отримання показав наступне. Наявність великої кількості сателітів і часток неправильної форми, більш низький коефіцієнт сферичності для технології GA призводить до різниці в деяких технологічних характеристиках гранул порівняно з PA і PREP. Зазначені дефекти створюють умови, за яких GA гранули «чіпляються» одна за одну при взаємному переміщенні (подачі порошку), що значно погіршує показники текучості (особливо для дрібнодисперсної фракції <63 мкм) і призводить до формування дефектів у наплавлених шарах. Наявність внутрішньогранульної аргонової пористості для GA гранул, яку в деяких випадках неможливо усунути НІР, а в інших при подальшій термічній обробці деталей внаслідок нагрівання матеріалу в однофазній ділянці газ розкриває області, в яких він затиснутий, і утворюється пористість з об'ємною часткою ~0,1 %. Розкриття пір призводить до істотного зниження значень межі міцності, ударної в'язкості та ін. механічних характеристик деталей, які формуються пошаровим наплавленням. Подібний мікроструктурний дефект є неприпустимим для таких відповідальних деталей як диски турбін, деталей соплового тракту тощо. При цьому

для технологій PREP і PA характерною є практично повна відсутність газової пористості в гранулах. Також для методів PREP і PA характерною є кристалізація гранул при надвисоких швидкостях охолодження, що створює умови для формування мікрокристалічної (а в деяких випадках нанокристалічної) структури, що сприятливо впливає на механічні властивості отриманих із них виробів. Крім того, важливим є той факт, що для процесу GA показник «gas-to-metal ratio» (GMR) [17] (витрати розпилюючого газу (аргону), необхідного для отримання 1 кг порошку) може складати 26...110, а для процесів PA і GA не перевищує 8 (за титановим сплавом Ti-6Al-4V). Експлуатація обладнання PREP стикається зі значними складнощами, пов'язаними з отриманням дрібнодисперсної фракції <100 мкм. Для досягнення виходу зазначеної фракції більше 50 мас. % існує необхідність значного підвищення швидкості обертання заготовки (більше 30000 об/хв), ще більше ускладнюючи і так не просту кінематичну схему установки (для зниження рівня вібрацій, проектування складних підшипникових систем тощо). Також сюди можна віднести труднощі, пов'язані з виготовленням циліндричної заготовки з точними розмірами, яка повинна бути відшліфована з високою точністю. У даний час обсяги виробництва сферичних гранул за технологією PA через її низьку продуктивність не забезпечують потреби адитивного виробництва виробів, що веде до завищеної вартості порошків, а також затягування строків їх постачання. Тому наразі цей спосіб доцільно розглядати лише для використання у лабораторних умовах при виготовленні невеликих опитних партій порошку.

Тому на основі цього можна зробити висновок, що значний потенціал подальшого розвитку та практичного застосування при отриманні сферичних гранул має технологія плазмового розпилення, одним із різновидів якої є процес плазмово-дугового розпилення струмопровідних дрових матеріалів [14]. Зазначений процес характеризується вищим показником продуктивності [18], яка може досягати 12...16 кг/год., і простотою та мобільністю обладнання, яке дозволяє використовувати широку номенклатуру стандартних витратних матеріалів із суцільних і порошкових дротів і прутків, великою кількістю технологічних і конструктивних параметрів, завдяки яким можна регулювати гранулометричний склад у широкому діапазоні 15...315 мкм. При цьому кількість фракції <100 мкм може досягати до 90 мас. %.

Розробки ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в області плазмово-дугових технологій отримання сферичних гранул для адитивних технологій

та гранульної металургії. Нові напрямки розвитку технологій та обладнання. З метою підвищення ефективності процесів отримання сферичних гранул із заданим гранулометричним складом і параметрами сферичності в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України їх розвиток в даний час здійснюється в двох основних напрямках розробки технологій та обладнання для:

- плазово-дугового розпилення дрових матеріалів діаметром 0,8...3,5 мм (неперервного перерізу та композиційних, наприклад із металевою оболонкою та порошковим наповнювачем);
- плазово-дугового розпилення прутків і зливків діаметром до 50 мм і більше.

Основні технологічні варіанти для реалізації першої групи технологій показані на рис. 3, а, б, при яких здійснюється плавлення струмопровідного дроту-аноду, що вводиться у зону високошвидкісного плазового струменя, та подальше дробленні розплаву з торця дроту. Дуга горить між неплавким вольфрамовим катодом і струмопровідним дротом-анодом, що подається за зрізом сопла плазмотрона, а у випадку розпилення нейтрального дроту – між катодом і анодом плазмотрону. Робочий (плазموутворюючий) газ, що поступає у робочу камеру, нагрівається електричною дугою та витікає із сопла у вигляді плазового струменя.

Результати аналізу енергоефективності та продуктивності процесів плазово-дугового розпилення нейтрального та струмопровідного дротів на прикладі розпилення титанового дроту марки Ti Grade2 при потужності плазової дуги у 15 кВт підтвердили [19], що розпилення струмопровідного дроту дозволяє підвищити ККД нагріву дроту більше ніж у 4 рази ($\eta = 17$ та 4 % відповідно) по відношенню до способу розпилення нейтрального дроту, що у свою чергу дозволяє збільшити продуктивність процесу з 1,5 до 12 кг/год (за титановим дротом марки Ti Grade2), а енергоефективність – до 6 разів. Проте, незважаючи на відносно низьку продуктивність, спосіб розпилення

нейтрального дроту продовжує широко застосовуватися у технології РА для отримання високоякісних комерційних сферичних порошоків із реакційних, тугоплавких та ін. високолегованих металів і сплавів (AR&C, Pyrogenesis, Канада [20]).

Слід зауважити, що спосіб плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту без використання супутнього газу може забезпечувати високу продуктивність процесу розпилення, яка при потужності 20...25 кВт може складати 10...12 кг/год за вольфрамовим дротом. Проте значним недоліком зазначеного процесу є широкий гранулометричний склад розпилюваних часток в інтервалі значень 40...1000 мкм [21].

Подальшим розвитком даного способу була розробка та виготовлення серійних установок УН-126 і КТ-088 (ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України) [22] і PLAZER 30-PL-W (ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР», Україна) [23], де усування зазначених недоліків здійснювалось за рахунок використання супутнього газового струменя (рис. 3, в). Супутній потік газу, що коаксіально направлений до плазового, формує конфігурацію останнього, сприяє його обтисканню і тим самим зменшує кут розкриття факелу з розпилюваних часток, збільшує швидкість витікання та динамічний натиск плазового струменя, що в свою чергу створює умови для отримання оптимального гранулометричного і хімічного складу дисперсної фази. Дані, отримані за результатами математичного моделювання [24], показали, (рис. 4), що затоплений струмінь, що витікає в атмосферу, досить швидко розширюється, інтенсивно перемішуючись при цьому із зовнішнім газовим середовищем. Обдув плазового струменя кільцевим ламінарним потоком холодного газу того ж складу, що й плазموутворюючий, перешкоджає розширенню плазового струменя. При цьому турбулентність частково гаситься навколишнім струменем кільцевого потоку, а енергія та імпульс струменя зберігаються на більших відстанях, ніж для затопленого струменя.

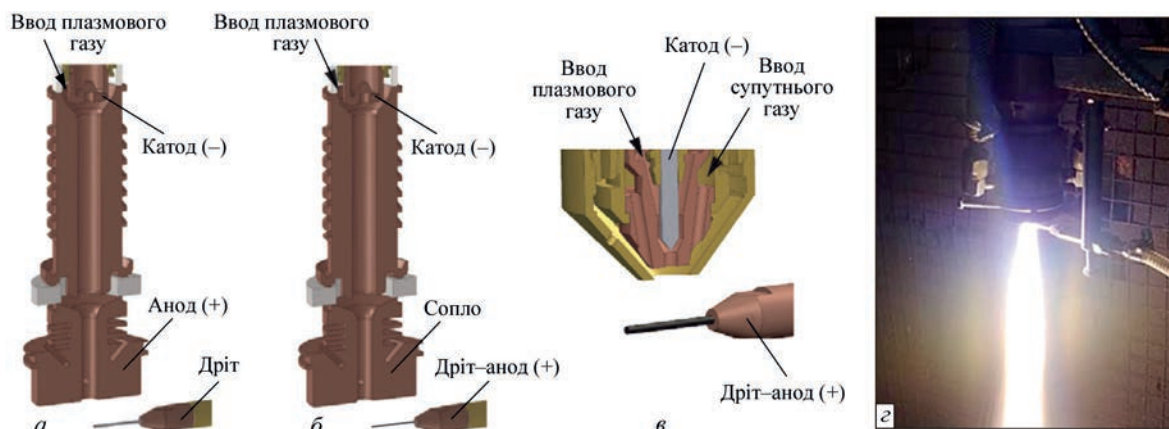


Рис. 3. Схема процесу плазово-дугового розпилення нейтрального дроту (а), струмопровідного дроту без супутнього потоку (б), струмопровідного дроту з потоком супутнього газу (в) і зовнішній вид процесу розпилення (г)

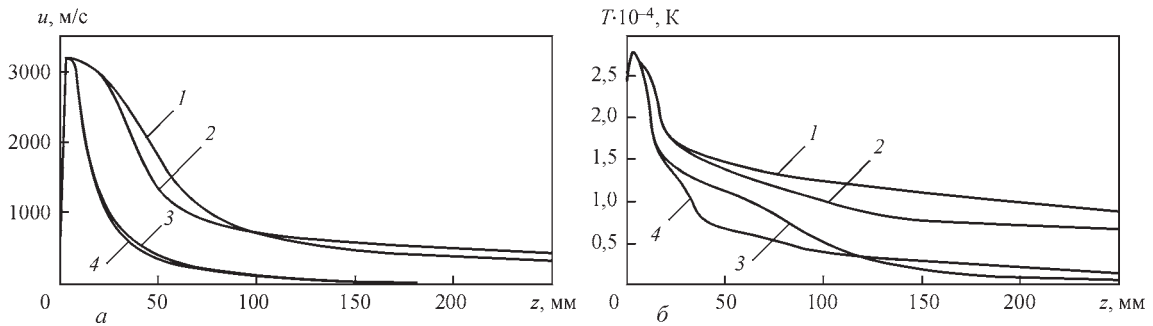


Рис. 4. Поздовжні зміни швидкості u (а) і температури T (б) аргонної плазми, що витікає в аргонне (1, 3) і повітряне (2, 4) середовище при різних режимах роботи плазматрону (струм $I = 200$ А, витрата плазмоутворюючого газу $Q_{\text{пл}} = 2$ м³/год): 1, 2 – витрата супутнього газу $Q_{\text{cy}} = 20$ м³/год відповідно аргон та повітря; 3, 4 – $Q_{\text{cy}} = 0$ м³/год [24]

Збільшення швидкості витікання плазмового струменя в зоні розташування дроту сприяє збільшенню газодинамічного напору струменя на торці дроту та переходу від вібраційного характеру дроблення (vibrational breakup, $We = 8...12$) і дроблення на кшталт «парашут» (bag breakup, $12 < We < 50$) на механізм дроблення на кшталт «парашут» із струмком (bag-and-stamen breakup, $50 < We < 100$). При цьому значно підвищується інтенсивність дроблення крапель розплаву, що формуються на торці струмопровідного дроту при його плавленні [25]:

$$We = \frac{\rho_g \cdot u_{rel}^2 \cdot d_p}{\sigma}, \quad (4)$$

де ρ_g – щільність газової фази, кг/м³; u_{rel}^2 – відносна швидкість між газовою фазою та часткою, м/с; d_p – діаметр частинки, м; σ – сила поверхневого натягу краплі, Н/м.

Експериментальні дані [14] показали, що використання супутнього потоку газу дозволяє значно зменшити максимальні розміри крапель з $d_{90} = 1000$ до 315 мкм, що дає змогу суттєво збільшити кількість фракцій, придатної для використання у технологіях АМ та гранульної металургії.

В останні роки розвиток даної технології плазмово-дугового розпилення полягав у вирішенні задач, пов'язаних в основному зі збільшенням ресурсу роботи внутрішніх деталей плазматрону, підвищенням продуктивності та ефективності нагріву і використання розпилюваних матеріалів. Для цього на підприємстві ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР» було спроектовано дослідно-промислому установку PLAZER 50-PL-W (рис. 5), у якій було закладено нову конструкцію плазматрону з водяним охолодженням та оптимізованою геометрією соплової частини зі зменшеними габаритами, що дало змогу підвищити потужність зазначеного обладнання з 30 до 50 кВт (табл. 1) [18].

Це, у свою чергу, дозволило збільшити продуктивність процесу до 16...18 кг/год. та інтенсифікувати процеси диспергування розплаву, що формується на торці дроту. Також слід відзначити, що підвищення потужності набуває особливої актуальності для випадку розпилення порошкових дротів, де збільшення діаметру порошкового дроту з 1,6 до 2,4 мм та більше дозволяє значно підвищити КЗ дроту (до 40 %) і, відповідно, ступінь легування гранул, проте потребує забезпе-

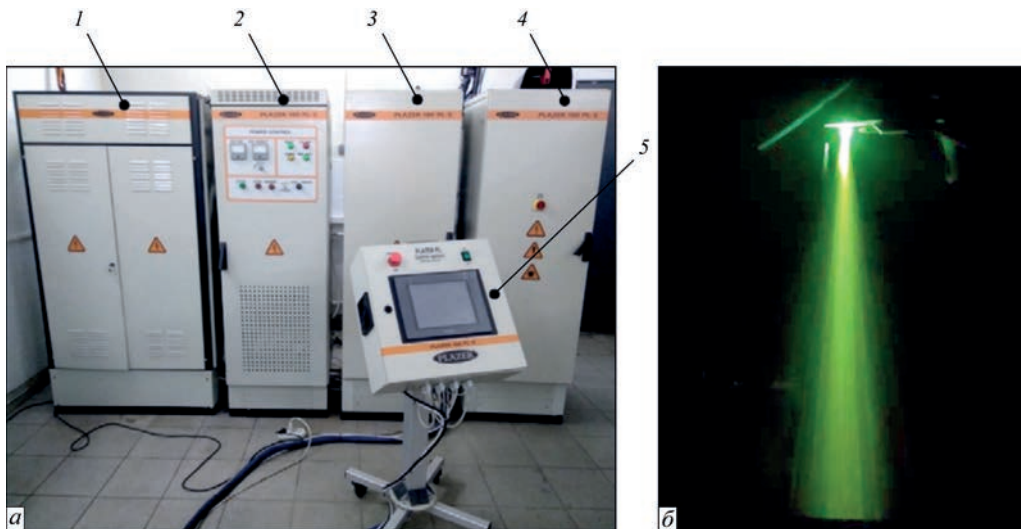


Рис. 5. Зовнішній вигляд лабораторної установки PLAZER 50-PL-W (а) і двофазного плазмового струменя (б): 1 – трансформаторне джерело живлення основної дуги; 2 – тиристорний електропривід; 3 – трансформаторне джерело живлення чергової дуги; 4 – шафа керування та газопідготовки; 5 – мобільний пульт оператора з сенсорною панеллю

Таблиця 1. Технічні характеристики установки PLAZER 50-PL-W

Параметр	Значення
Споживана потужність, кВт, не більше	50
Напруга живильної мережі трифазного змінного струму частотою 50 Гц	380 ⁺¹⁹ ₋₃₈
Напруга холостого ходу, В	160
Діапазон регулювання робочого струму, А	100...500
Діапазон регулювання робочої напруги, В	30...100
Найбільша тривалість включення, ПВ %	100
Витрати повітря при тиску 0,6 МПа, м ³ /год.	15...60
Витрати аргону або гелію при тиску 0,1 МПа, м ³ /год	1...3
Швидкість подачі дроту, м/хв	2...15
Охолодження плазмотрона	повітряне або водяне
Ресурс сопла й катоду плазмотрона, год (машинного часу)	не менше 100
Тиск води для охолодження, МПа	0,3...0,5
Витрата води на охолодження, м ³ /год	0,4...0,6
Діаметри застосовуваних дровових матеріалів, мм	1,0...2,4
Тип керування	автоматизоване
Тип контролера	ПЛК

чення належного ступеня металургійної взаємодії між компонентами, які входять до складу порошкового дроту, що обумовлює зменшення ступеня гетерогенності гранул за хімічним і фазовим складом. Розроблена установка відкриває ширші технологічні можливості процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідних дровів, оскільки для цього було створено спеціалізовану систему керування, яка включає у себе вимірювальну, пуско-регулюючу, сигнальну апаратуру, у тому числі використання сенсорної панелі, програмованого логічного контролера (ПЛК) і розробки відповідного програмного забезпечення. Програмне забезпечення установки містить у собі всі функції керування, настроювання, індикації та аварійної сигналізації режимів роботи установки. ПЛК виконує роль виконавчого обчислювального пристрою, який на основі отриманих даних від системи моніторингу відпрацьовує коригування параметрів процесу розпилення та алгоритму роботи обладнання, змінюючи силу струму, витрати газів, швидкість подачі дроту тощо.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено дослідно-промислову установку для плазмово-дугової сферодизації струмопровідних матеріалів (рис. 6), де для здійснення управління та контролю швидкісними та температурними характеристиками гранул використовується зустрічний потік газу. Це дозволяє значно зменшити габарити камери розпилення – висоту камери до 3 м, оскільки стандартні промислові камери мають висоту камери не менше 10...15 м, та регулювати швидкість охолодження часток в середині камери, у т.ч. для формування дрібнокристалічної структури.

За допомогою засобів чисельного моделювання виконано розрахунки основних конструкційних параметрів цієї камери та підібрані оптимальні швидкості зустрічного потоку газу. Для цього спочатку в CFD програмному продукті було проведено моделювання процесу витікання аргонової плазми, що обдувається потоком супутнього газу, за допомогою вирішення системи МГД рівнянь (5-12) та стандартної двухпараметричної k - ϵ моделі турбулентності (13), визначено газодинамічні та температурні характеристики плазмового струменя (рис. 7):

1. Закон збереження маси:

$$\nabla \rho v \quad (5)$$

2. Закон збереження моменту:

$$\rho(\vec{V} \cdot \nabla \vec{V}) = \vec{j} \cdot \vec{B} - \nabla p + \frac{2}{3} \mu (\nabla \vec{V}) + 2 \nabla \cdot (\mu \vec{S}) \quad (6)$$

3. Закон збереження енергії:

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \vec{j} \cdot \vec{E} + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \vec{j} \cdot \nabla T \quad (7)$$

4. Рівняння Максвелла:

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (8)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (9)$$

$$\nabla^2 \vec{A} = -\mu_0 \vec{j} \quad (10)$$

$$\vec{B} = \nabla \cdot \vec{A} \quad (11)$$

5. Закон Ома:

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (12)$$

де ρ – щільність газу, кг/м³; \vec{V} – швидкість газу, м/с; $\vec{j} \cdot \vec{B}$ – сила Лоренца, обумовлена вектором електричного струму \vec{j} , А/м² та вектором електромагнітної індукції \vec{B} , Тл; p – тиск, Па; μ – динамічна в'язкість плазми, кг/м·с; \vec{S} – тензор швидкостей деформації; h – ентальпія, Дж/кг; \vec{E} – електричне поле, В/м; k_B – стала Больцмана, Дж/К⁻¹; e – елементарний заряд, Кл; σ – електропровідність газу, Вт/м·К; ϕ – електростатичний потенціал, В; \vec{A} – векторний потенціал електромагнітного поля, Тл·м.

$$\mu_t = \rho C \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (13)$$

де k – кінетична енергія турбулентності, м²/с²; ϵ – швидкість дисипації турбулентної енергії, м²/с³; ρ – щільність серед, кг/м³; $C = 0,09$; величина μ_t має розмірність кг/м·с.

На наступному етапі за допомогою моделі гідродинамічного розпаду крапель Taylor Analogue Break-up (ТАВ) та отриманих експериментальних даних було проведено моделювання процесу диспергування розплаву, що формується в процесі плазмово-дугового розпилення на торці струмопровідного дроту із нержавіючої сталі AISI 316 діаметром 1,6 мм (14–17). Модель ТАВ проводить

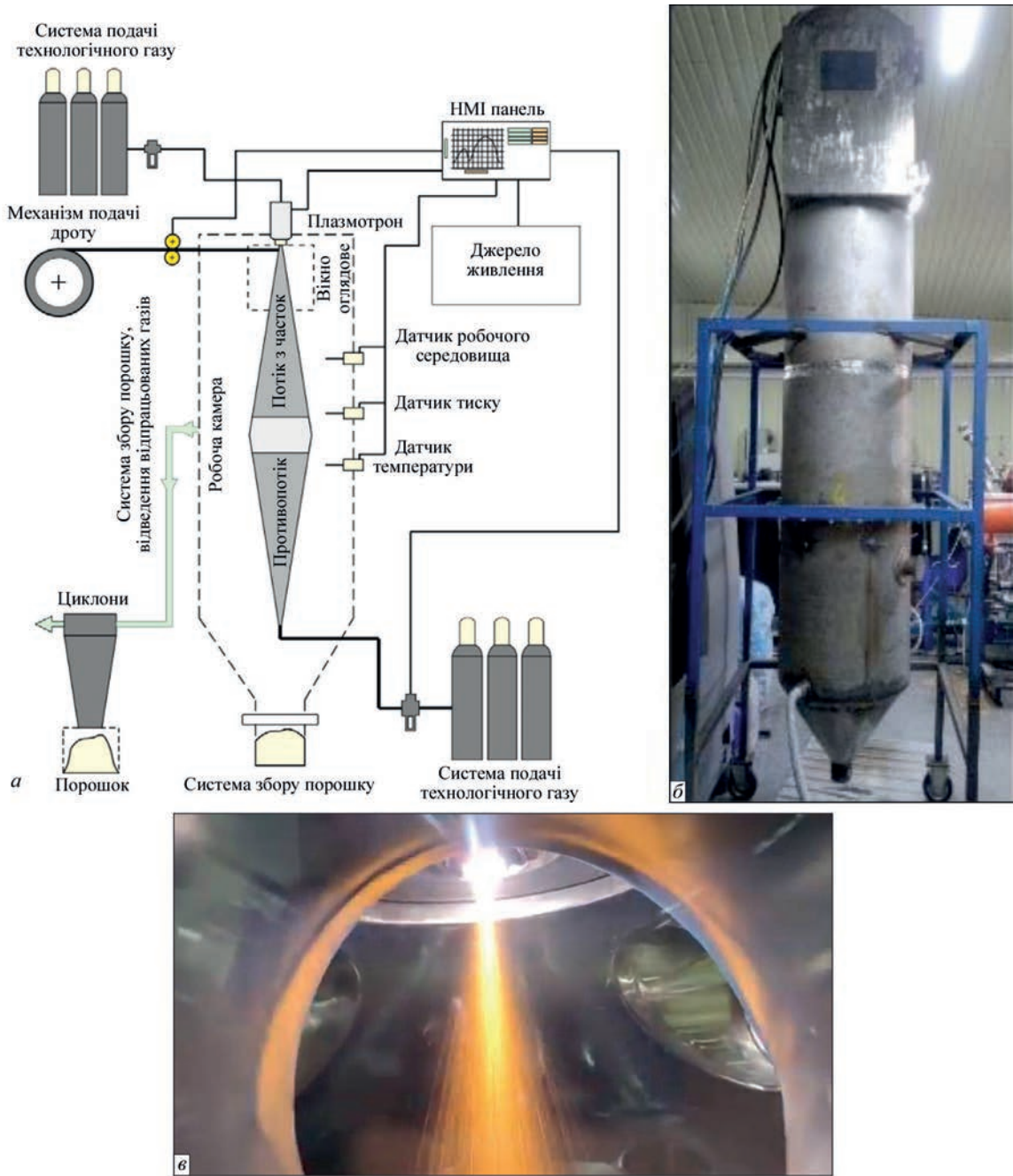


Рис. 6. Схема (а) та зовнішній вигляд (б) дослідно-промислового обладнання та візуалізація (в) процесу плазово-дугової сферидизації струмопровідних провідних матеріалів з камерою із захисною атмосферою та газовим протитечею

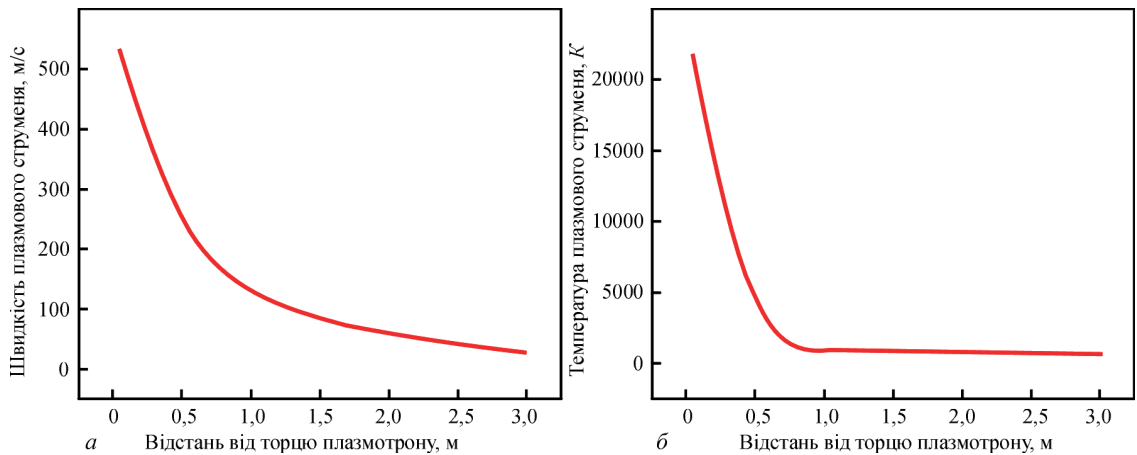


Рис. 7. Газодинамічні (а) і температурні (б) характеристики аргонної плазми, що обдуваються супутнім газом ($P = 16$ кВт)

аналогію між системою маса–пружина–демпфер і коливаннями та деформацією крапель рідини, що призводять до її подрібнення. У цій аналогії сила поверхневого натягу представлена відновлюючою або стабілізуючою силою пружини, а аеродинамічна сила газу є джерелом зовнішньої сили або сили, що дестабілізує масу, демпфуюча сила представлена характеристикою в'язкості рідини:

$$m\ddot{x} = F - kx - d\dot{x}, \quad (14)$$

де m , F , k і d – маса, сила, стала пружини та стала демпфування відповідно; x – зміщення екватора

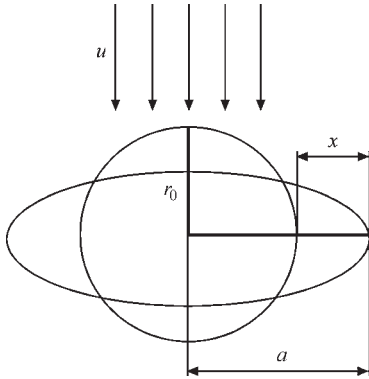


Рис. 8. Механізм деформації краплі згідно з ТАВ моделлю

краплі від положення рівноваги у формі сфери до сплющеного еліпсоїда (рис. 8).

Використовуючи коефіцієнти аналогії Тейлора, фізичні залежності коефіцієнтів у рівнянні (14) мають наступні значення:

$$\frac{F}{m} = C_f \frac{\rho_g u^2}{\rho_l r}, \quad (15)$$

$$\frac{k}{m} = C_k \frac{\sigma}{\rho_l r^3}, \quad (16)$$

$$\frac{d}{m} = C_d \frac{\mu_l}{\rho_l r^2}, \quad (17)$$

де ρ_l – щільність краплі, кг/м³; ρ_g – щільність неперервної фази, кг/м³; u – відносна швидкість краплі, м/с; r – радіус вихідної краплі, м; σ – сила поверхневого натягу краплі, Н/м; μ_l – динамічна в'язкість краплі, кг/м·с. Значення для безрозмірних констант $C_f = 0,33$, $C_d = 5$ та $C_k = 8$.

З'ясовано, що в процесі розпилення утворюються частки, розміри яких можуть лежати в інтервалі 20...500 мкм. Дослідження руху цих часток і теплообміну з навколишнім середовищем

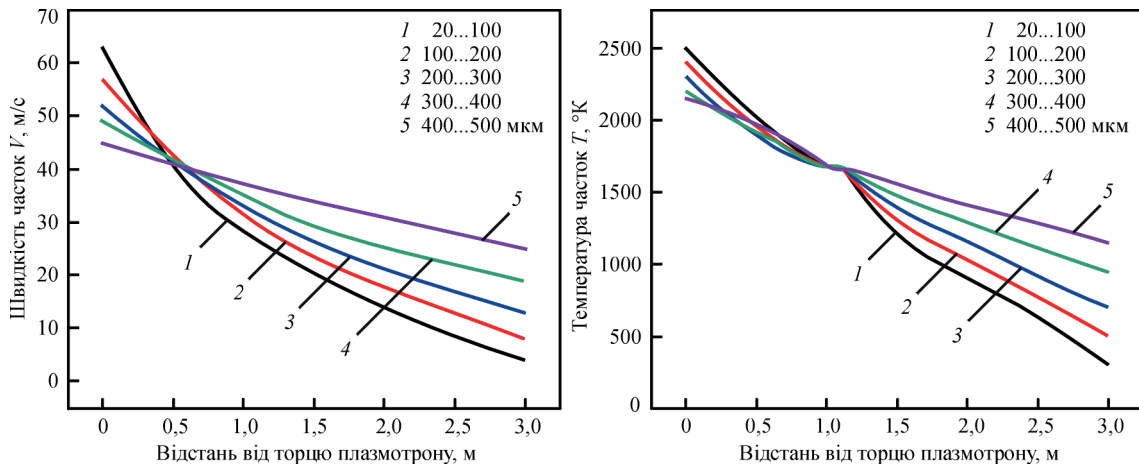


Рис. 9. Залежність зміни швидкості V (а) і температури часток T (б) на певній відстані від торцю плазматрону (без використання зустрічного потоку газу)

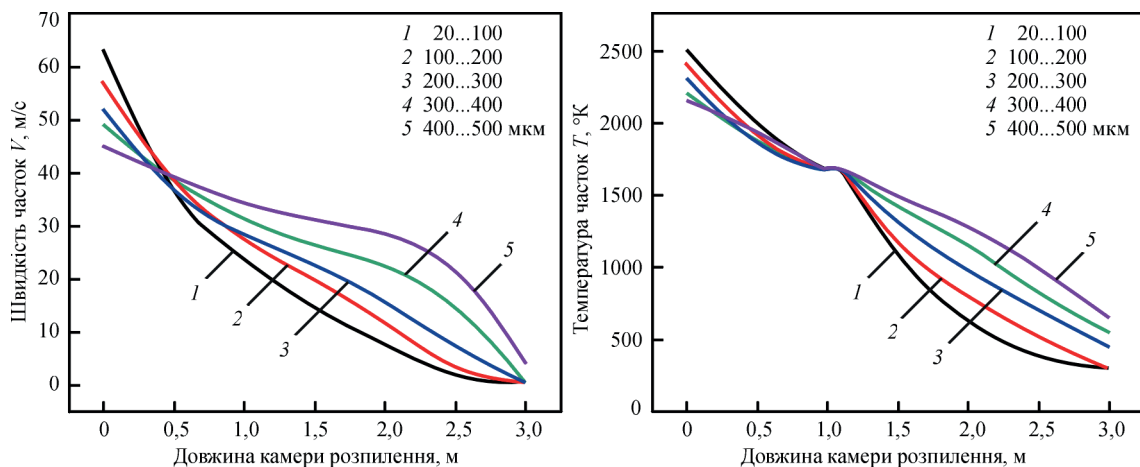


Рис. 10. Залежність зміни швидкості V (а) та температури часток T (б) на певній відстані від торцю плазматрону (з використанням зустрічного потоку газу)

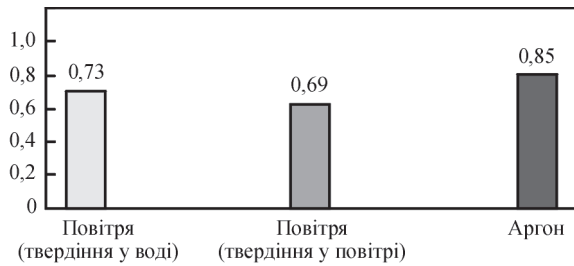


Рис. 11. Залежність параметрів сферичності розпилюваних часток із нержавіючої сталі AISI 316 фракції 20...100 мкм від типу навколишньої атмосфери ($P = 16$ кВт): 1 – повітря (твердіння у воді); 2 – повітря (твердіння у повітрі); 3 – аргон у середині камери розпилення (рис. 9) показали, що на відстані 3 м від торця плазмотрону їх швидкість у залежності від розрахованих розмірів може лежати в інтервалі 8...30 м/с., а температура – складати 400...1200 °К. Це у свою чергу призводить до деформування часток і утворення браку продукції при їх зіткненні зі стінками збиральника порошку (при розрахунковій висоті камери, яка складає 3 м).

Показано, що зустрічний потік газу дозволяє здійснювати обробку в камерах розпилення, які мають довжину не більше 3 м, за рахунок інтенсифікації процесів гальмування часток, збільшити швидкість теплообміну між середовищем та частками (рис. 10).

Експериментальні дослідження коефіцієнту сферичності гранул із нержавіючої сталі AISI 316 (рис. 11), отриманих при розпиленні у різних середовищах, показали, що порівняно з розпиленням у повітрі застосування камер із захисною аргонною атмосферою та зустрічним потоком газу

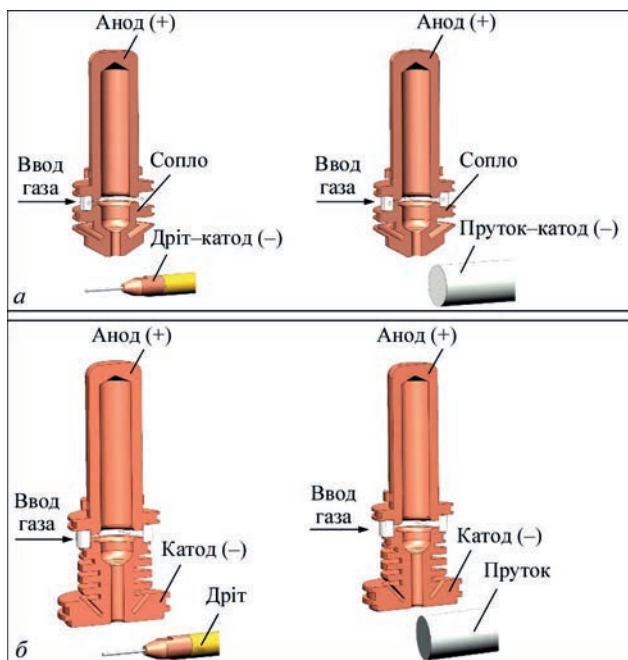


Рис. 12. Схема процесу плазмово-дугового розпилення на оберненій полярності з використанням плазмотронів з мідним пустотілим анодом: струмопровідні (а) і нейтральні (б) дроти та прутки

дозволяє підвищити коефіцієнт сферичності гранул від 0,73 до 0,85.

Також в ІЕЗ ім. Є.О. Патона виконуються роботи з дослідження процесів плазмово-дугової сферодизації нейтральних (рис. 12, а) і струмопровідних дротів (рис. 12, б) та прутків з використанням плазмотронів з мідним пустотілим анодом, які працюють на оберненій полярності.

З'ясовано, що серед існуючих технологій плазмової сферодизації спосіб плазмово-дугового розпилення на зворотній полярності (за схемою «дріт-катод» і нейтральний дріт) має ряд переваг, які викликають широкий практичний інтерес, оскільки:

- дають можливість збільшити електричну потужність (до 200 кВт) за рахунок «витягування» дуги (від 150 до 550 В) у порожниці мідного електроду за рахунок зміни газодинамічних характеристик струменя на відміну від плазмотронів, працюючих на прямій полярності, де збільшення електричної потужності відбувається за рахунок збільшення величини робочого току (від 400 до 1000 А) з використанням потужніших джерел живлення, що підвищує інтенсивність ерозії сопла та електроду, або використанням плазмотронів складної конструкції (водоохолоджувані МЕВ тощо);

- дають можливість диспергування широкої номенклатури розпилюваних матеріалів (від суцільних і порошкових дротів великих діаметрів до прутків діаметром 50 мм та більше);

- конструкція плазмотронів дозволяє формувати надзвуковий плазмовий струмінь, швидкість якого знаходиться в межах $(1,5...4,0) \cdot 10^3$ м/с, що значно інтенсифікує процеси диспергування розплаву, який формується на торці розпилюваного електроду та підвищує кількість виробленої дрібнодисперсної (<80 мкм) фракції гранул [26];

- досягається низька швидкість ерозії електроду (0,01 нг/с при 40 кВт), який не має обмежень щодо кількості його запусків у роботу, що також значно підвищує ресурс роботи плазмового обладнання;

- тепловий ККД плазмотронів з мідним пустотілим електродом знаходиться на рівні 0,80...0,85, при цьому потужність, що передається виробу плазмовим потоком $P_{п}$ при однакових режимах роботи в 1,2...1,5 рази більше, ніж на прямій полярності, внаслідок цього підвищується ефективність процесу, це дозволяє значно зменшити кількість енергії, що витрачається на плавлення одиниці об'єму дроту [27].

Дані, отримані при чисельному моделюванні зазначеного процесу (рис. 13) підтвердили, що при роботі плазмотрону на струмі зворотної полярності напруга на дузі U значно вища, ніж при роботі на струмі прямої полярності,

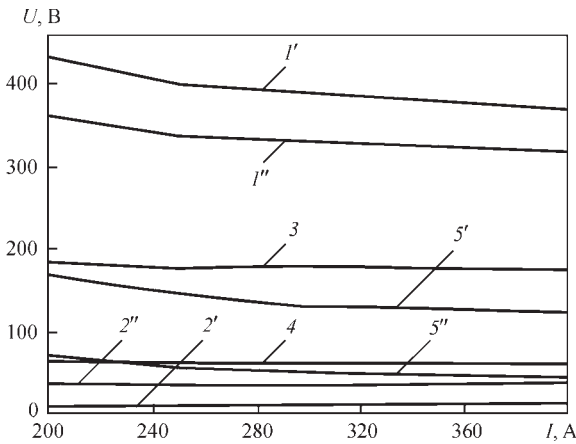


Рис. 13. Залежність напруги стиснутої дуги від струму: 1 – повна напруга на дузі; 2 – напруга всередині пустотилого електрода; 3 – напруга у плазмоформуючому каналі сопла; 4 – напруга на відкритій ділянці дуги; 5 – напруга в порожнині різку при роботі плазмотрону на зворотній (1', 5') і прямій полярностях (1'', 5'')

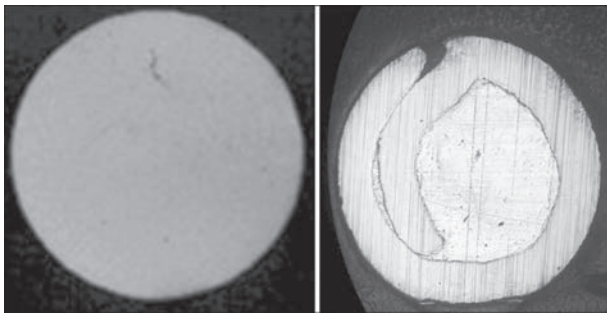


Рис. 14. СЕМ зображення поперечного перерізу компактного дроту з нержавіючої сталі AISI 316 (а) та порошкового дроту системи легування Fe-Al (86Fe + 14Al мас. %) (б)

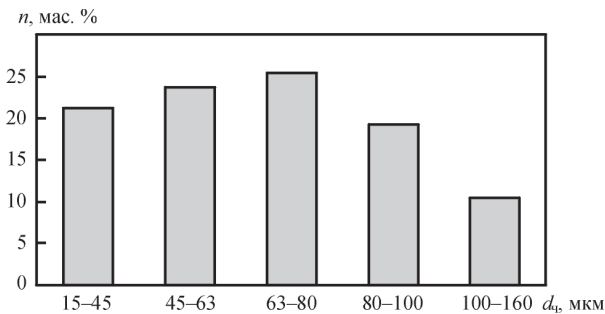


Рис. 15. Гранулометричний склад гранул, отриманих при розпиленні компактного дроту з нержавіючої сталі AISI 316

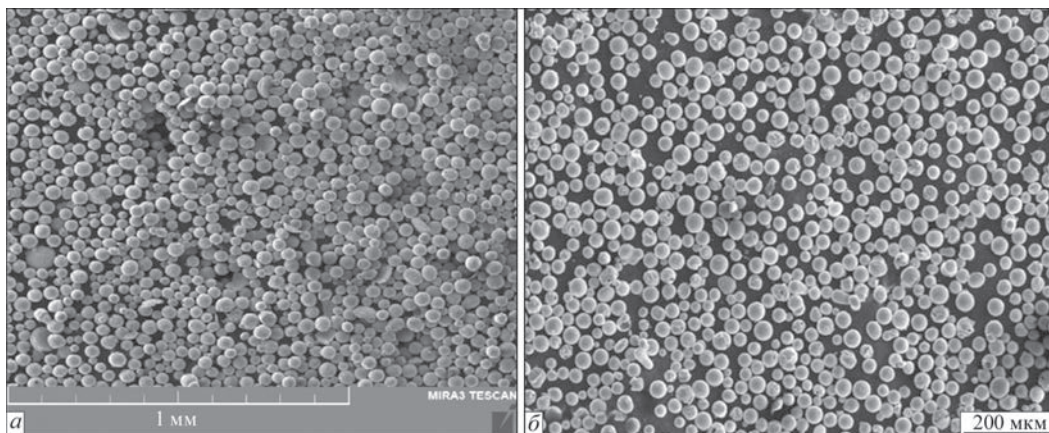


Рис. 16. СЕМ зображення гранул, отриманих при розпиленні компактного дроту з нержавіючої сталі AISI 316 (а) і титану марки Ti Grade2 (б) [31]

$U_{оп} \approx (1,1...1,5) U_{пн}$ ($U_{оп}$ – напруга на стиснутій дузі при роботі плазмотрону на зворотній полярності, $U_{пн}$ – напруга на стиснутій дузі під час роботи плазмотрону на прямій полярності), що обумовлює підвищену продуктивність плазмотрону [28].

Відповідно до цього було розроблено лінійку плазмотронів для розпилення нейтральних та струмопровідних матеріалів з використанням підходів напрацьованих при проектуванні та виготовленні плазмотронів для різання на оберненій полярності.

Отримання сферичних гранул плазово-дуговим розпиленням дровотих матеріалів. На установці PLAZER-50-PL-W виконувались експерименти по розпиленню різних типів і марок струмопровідних компактних (рис. 14, а) та порошкових дротів (рис. 14, б) з подальшим аналізом технологічних і структурних особливостей отриманих гранул.

Так, дослідження гранулометричного складу гранул (рис. 15), отриманих при розпиленні струмопровідного компактного дроту із нержавіючої сталі AISI 316, показало, що завдяки великій кількості регульованих параметрів зазначене обладнання дозволяє отримувати сферичні гранули у діапазоні розмірів 15...315 мкм. При цьому на певних режимах розпилення є можливість отримувати високу кількість дрібнодисперсної фракції, де основною фракцією є 15...100 мкм, яка складає до 90 мас. %, де доля фракції 15...45 мкм складає 21,2 мас. %, 45...63 мкм – 23,7 мас. %, 63...80 мкм – 25,4 мас. %, 80...100 мкм – 19,2 мас. %, 100...160 мкм – 10,5 мас. %, а середній діаметр $d_{50} = 63$ мкм.

Дослідження форми цих гранул показало, що загалом вони мають правильну сферичну форму (рис. 16, а) з коефіцієнтом сферичності $S = 0,83$ та більше, а доля часток неправильної форми не перевищує 1 мас. %.

Таблиця 2. Розподіл гранулометричного складу та текучість гранул різних марок із нержавіючої сталі 316 L

Марка та метод виготовлення порошку	Розмір фракції, мкм	d_{90} , мкм	d_{50} , мкм	d_{10} , мкм	Текучість, с/50 г
MetcoAdd 316-A, GA	-45; +15	46	30	19	<20
PLAZER-30, PA	-45; +15	43	28	17	18
GA [29]	-45;+15	45	22	8	29

Результати досліджень технологічних властивостей зазначених гранул показали, що їх текучість (на прикладі фракції -45; +15 мкм) лежить на одному рівні з іншим комерційним порошком марки MetcoAdd 316-A (Oerlikon AM Co. Ltd, Німеччина), який широко використовується для методами SLM та DMLS і складає 18 с/50 г.

Також слід зазначити, що продуктивність зазначеного процесу для даного режиму розпилення струмопровідного дроту із нержавіючої сталі AISI 316 (потужність плазмової дуги $P = 18$ кВт

і сумарна витрата аргону $Q = 25$ м³/год) складає 10,5 кг/год з подальшою можливістю її збільшення. У табл. 3 наведено результати аналізу гранулометричного складу гранул, отриманих при розпиленні струмопровідних компактних дротів різного хімічного складу.

Дослідження, процесу плазмово-дугового розпилення струмопровідного порошкового дроту системи легування Fe–Al показало, що зазначений процес дозволяє отримувати сферичні гранули із високолегованих сплавів (рис. 17, в), виготовлен-

Таблиця 3. Розподіл гранулометричного складу гранул, отриманих при розпиленні струмопровідних компактних дротів різного хімічного складу

Номер	Матеріал	Діаметр дроту, мм	Потужність, кВт	Середній діаметр гранул d_{50} , мкм
1	Мідь Cu-ETP	1,2	21	52
2	Нержавіюча сталь AISI 316	1,0	18	63
3	Нікелевий сплав NiCr-3	2,0	21	184
4	Нікелевий сплав Inconel 625	1,2	22	87
5	Титан Ti Grade2	1,6	14	152

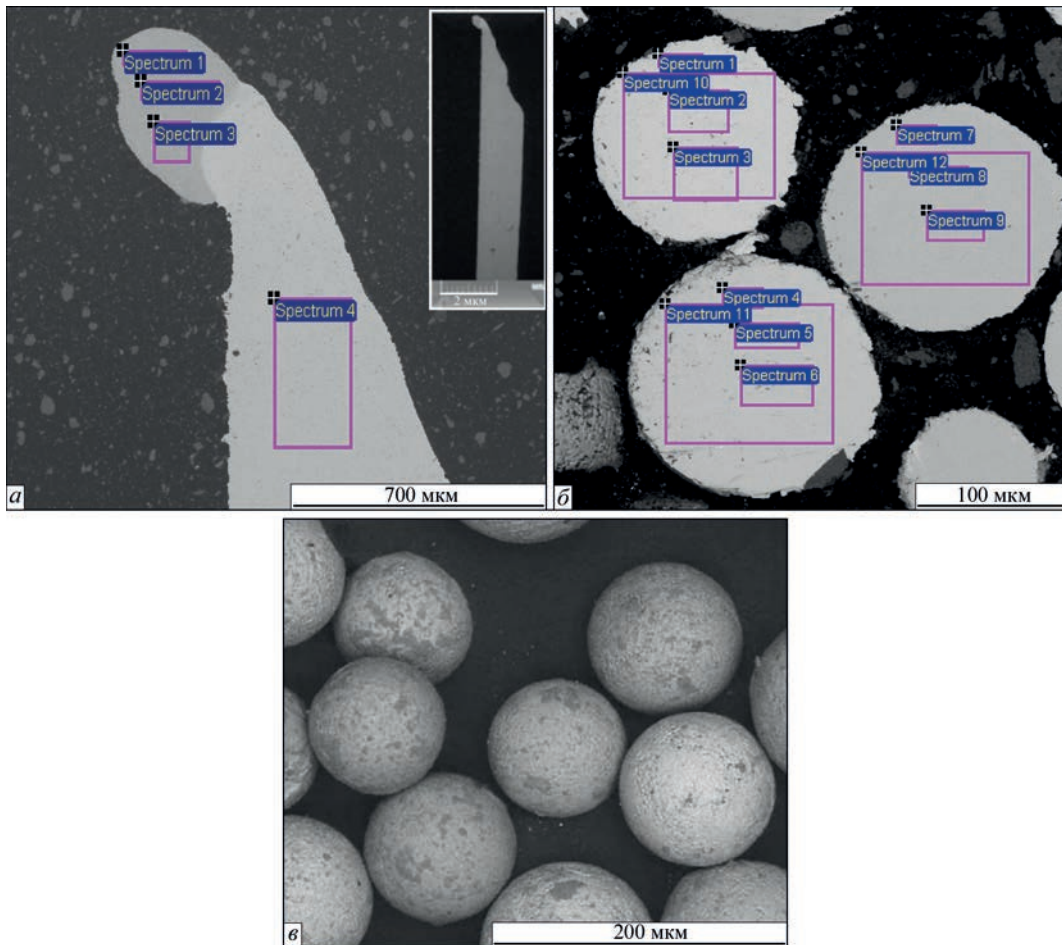


Рис. 17. СЕМ зображення торцю дроту Fe–Al після різкого обриву дуги в процесі плазмово-дугового розпилення (а), мікроструктури гранул (б) та зовнішнього виду часток (в): спектр 1, 2, 3 – зона металургійної взаємодії матеріалу дроту при його плавленні та розпиленні; спектр 4 – зона дроту, що не піддається термічному впливу; спектр 1-12 – зона з поперечним перерізом гранули

Таблиця 4. Хімічний склад локальних зон торця порошкового дроту-аноду Fe–Al після різкого обриву дуги в процесі плазово-дугового розпилення та мікроструктури гранул

Номер локальної зони (спектр)	Зображення	Хімічний склад локальних зон, атом. %			
		Fe	Al	Si	O
1	Рис. 17, а	76,49	23,51	-	-
2		75,49	24,51	-	-
3		74,15	25,85	-	-
4		99,64	-	0,36	-
1	Рис. 17, б	82,92	16,04	0,55	0,49
2		82,67	16,31	0,70	0,32
3		83,01	16,44	0,21	0,34
4		74,07	25,09	0,63	0,21
5		74,78	24,62	0,46	0,14
6		74,44	24,94	0,43	0,19
7		71,67	27,71	0,20	0,42
8		72,52	27,52	0,00	0,23
9		71,59	28,01	0,13	0,27
10		83,17	16,22	0,24	0,37
11		74,10	25,03	0,71	0,16
12		71,75	27,85	0,12	0,28

ня яких традиційними методами утруднене чи неможливе (інтерметаліди нікелю, титану, заліза та ін. сплави). Із таких гранул у подальшому можна виготовляти вироби зі складною геометрією, наприклад за технологією холодного газодинамічного напилення та подальшої ТО або ТМО. Наведено результати експериментальних досліджень процесів нагріву, плавлення та взаємодії порошкового дроту 86Fe + 14Al мас. %, який складається зі сталеві оболонки із низьковуглецевої сталі Ст-08кп і порошкового наповнювачу (алюмінію марки ПА-4) при оптимальних параметрах режиму розпилення (потужності 18 кВт) на обладнанні PLAZER–50–PL–W. Ці дослідження показали, що зазначений процес дозволяє отримувати сферичні гранули, хімічний склад яких практично не відрізняється від складу вихідного матеріалу (порошкового дроту), а доля гранул із зовнішніми та внутрішніми дефектами не перевищує 1,0...1,5 мас. % (табл. 4) при середньому діаметрі $d_{50} = 115$ мкм і долі дрібнодисперсної фракції <100 мкм до 45 мас. %.

Дослідження оплавленого торця порошкового дроту після різкого обриву дуги за допомогою методу рентгеноспектрального мікроаналізу (Tescan MIRA 3 LMU) показало, що на торці дроту має місце металургійна взаємодія розплавленої металеві оболонки та алюмінієвого наповнювача, що призводить до утворення розплаву, інтегральний хімічний склад якого відповідає інтерметаліду типу Fe₃Al (рис. 17, а, табл. 4). Дослідження гетерогенності хімічного складу інтерметалідних гранул різних фракцій (табл. 4) показало, що має місце незначна неоднорідність хімічного складу отриманих гранул. Так, доля Al може варіювати

від 16 до 28 атом. %. Але при цьому дослідження фазового складу гранул методом дифракційного рентгенофазового аналізу (ДРОН-3М, CuK α -випромінювання) показало, що доля інтерметалідної фази Fe₃Al може складати до 85 мас. %.

Отримання сферичних гранул плазово-дуговим розпиленням прутків і зливків. На установці PLAZER–50–PL–W, модернізованій під процес плазового розпилення, на оберненій полярності виконувались експерименти з розпилення компактного струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі марки ER70S-6 діаметром 1,6 мм та нерухомого прутка діаметром 50 мм із низьковуглецевої сталі Q235 при потужності плазової дуги у 120 кВт.

Аналіз гранулометричного складу гранул (рис. 18), отриманих при розпиленні струмопровідного дроту, показав, що в процесі розпилення утворюються сферичні гранули у діапазоні розмірів 15...630 мкм, де доля фракції 15...100 мкм складає 15,8 мас. %, 100...160 мкм – 20,2 мас. %, 160...200 мкм – 24,7 мас. %, 200...250 мкм – 23,2 мас. %, 250...315 мкм – 16,1 мас. %, а середній діаметр складає $d_{50} = 183$ мкм.

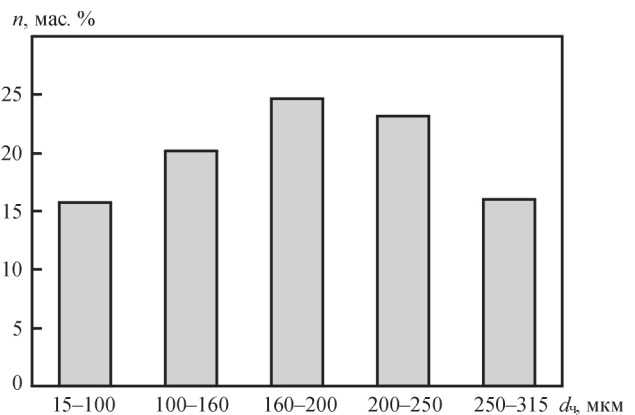


Рис. 18. Гранулометричний склад гранул, отриманих при розпиленні струмопровідного компактного дроту ER70S-6 діаметром 1,6 мм плазмотроном на оберненій полярності при потужності у 120 кВт

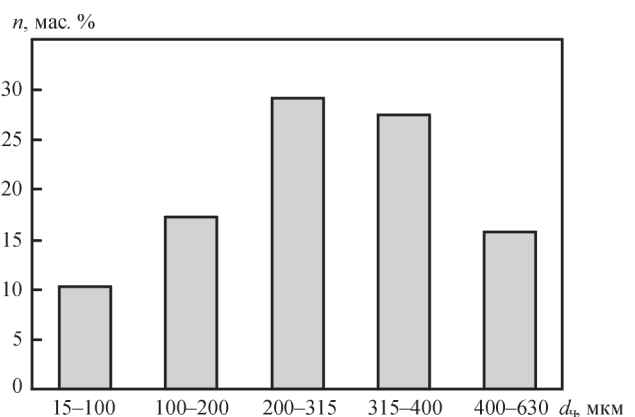


Рис. 19. Гранулометричний склад гранул, отриманих при розпиленні струмопровідного нерухомого прутка із низьковуглецевої сталі Q235 діаметром 50 мм плазмотроном на оберненій полярності при потужності у 120 кВт

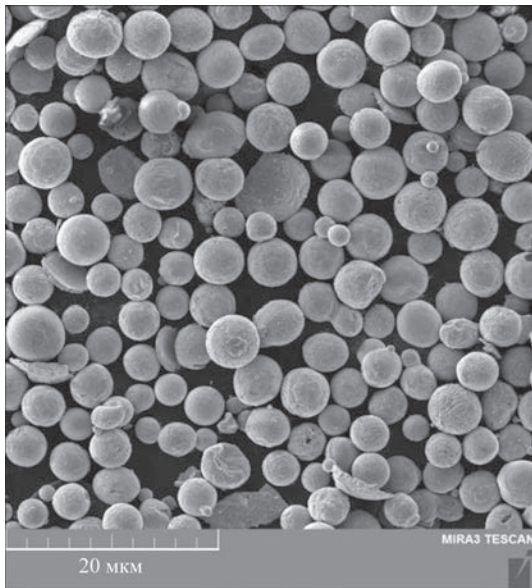


Рис. 20. СЕМ зображення гранул, отриманих при розпиленні на повітрі струмопровідного нерухомого прутка із низьковуглецевої сталі Q235 діаметром 50 мм

Аналіз гранулометричного складу гранул (рис. 19), отриманих при розпиленні струмопровідного дроту, показав, що в процесі розпилення утворюються сферичні гранули у діапазоні розмірів 15...630 мкм, де доля фракції 15...100 мкм складає 10,3 мас. %, 100...200 мкм – 17,2 мас. %, 200...315 мкм – 29,2 мас. %, 315...400 мкм – 27,5 мас. %, 400...630 мкм – 15,8 мас. %, а середній діаметр складає $d_{50} = 282$ мкм.

Дослідження форми отриманих гранул (рис. 20) показало, що загалом вони мають правильну сферичну форму (рис. 20, а) з коефіцієнтом сферичності $S = 0,75$ та більше, а доля часток неправильної форми не перевищує 5 мас. %. При цьому продуктивність процесу розпилення при потужності у 120 кВт за струмопровідним компактним дротом із низьковуглецевої сталі ER70S-6 діаметром 1,6 мм може досягати 16 кг/год., а для випадку розпилення нерухомого прутка із низьковуглецевої сталі Q235 діаметром 50 мм – 20 кг/год. Також при цьому спостерігається подальша тенденція до збільшення продуктивності при підвищенні потужності плазмової дуги до 200 кВт.

Таким чином, попри високу продуктивність зазначений процесу потребує подальшого вивчення та розробки додаткових технологічних прийомів, які дозволять суттєво збільшити кількість фракції, придатної для використання у технологіях АМ та гранульної металургії.

Висновки

1. Критичний аналіз сучасних технологій отримання сферичних гранул показав, що в загальному випадку для технологій газового розпилення розплаву характерною є наявність великої кількості сателітів і часток неправильної форми, більш низь-

кий коефіцієнт сферичності та внутригранульна аргонова пористість, що призводить до формування дефектів у нанесених шарах і викликає істотне зниження значень межі міцності, ударної в'язкості та інших механічних характеристик готових виробів. Технологія відцентрового плазмового розпилення заготовки, що обертається (PREP – Plasma Rotating Electrode Process), дозволяє уникнути більшості цих недоліків, однак експлуатація обладнання PREP пов'язана зі значними складнощами отримання дрібнодисперсної фракції <100 мкм. Для досягнення виходу зазначеної фракції більше 50 мас. % існує необхідність істотного підвищення швидкості обертання заготовки (більше 30000 об/хв), що значно ускладнює і так не просту кінематичну схему установки (зниження рівня вібрацій, проектування складних підшипникових систем та ін.). Також існують труднощі, пов'язані з виготовленням циліндричної заготовки з точними розмірами, яка повинна бути відшліфована з високою точністю тощо.

2. З'ясовано, що значний потенціал подальшого розвитку і практичного застосування при отриманні сферичних гранул має технологія плазмового розпилення, одним із різновидів якої є процес плазмово-дугового розпилення струмопровідних і нейтральних дротів, прутків і крупногабаритних зливків діаметром до 50 мм і вище. Зазначений процес характеризується вищими показниками енергоефективності та продуктивності, яка може досягати до 20 кг/год., і відносною простотою обладнання та дозволяє отримувати сферичні гранули у широкому діапазоні розмірів 15...315 мкм, при цьому кількість фракції <100 мкм може досягати до 90 мас. %. Розроблено установку нового покоління PLAZER-50-PL-W для плазмово-дугової сферодизації нейтральних і струмопровідних дротів і прутків, особливістю якої є використання плазмотрону із підвищеними струмовим навантаженням і інтелектуальною системою автоматичного керування та контролю розширеної кількості технологічних параметрів у режимі реального часу. Спроектвана камера розпилення з захисною атмосферою із газовою протитечею дозволяє значно зменшити габарити обладнання, а саме висоту камери з 10...15 до 3 м і дає змогу керувати процесами охолодження часток для формування дрібнодисперсної структури та сприяє отриманню сферичних гранул в інтервалі розмірів 20...315 мкм з коефіцієнтом сферичності 0,75...0,85.

3. Плазмово-дугові технології, розроблені в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, дозволяють отримувати сферичні гранули із всього спектру матеріалів, які широко використовуються в галузі 3D друку високоякісних виробів методами селективного і прямого лазерного плавлення та спікання, електронно-променевого плавлення, холодного газодинамічного напилення та технологій гранульної металургії для одержан-

ня високоякісних конструкційних металевих матеріалів шляхом компактування часток (гранул) із мікрокристалічною структурою, що закристалізувалися із розплаву з високою швидкістю.

Список літератури/References

- Ilyushchenko A.F., Savich V.V. (2017) История и современное состояние аддитивных технологий в Беларуси, порошки металлов и сплавов для них. *Космічна наука і технологія*, 23(4), 33–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.033>
- Ilyushchenko A.F., Savich V.V. (2017) History and state-of-the-art of additive technologies in Belarus, powders of metals and alloys for them. *Kosmichna Nauka i Tekhnologiya*, 23(4), 33–45. [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2017.04.033>
- Singh, D.D., Mahender, T., Reddy, A.R. (2021) Powder bed fusion process: A brief review. *Materials Today: Proceedings*, 46(1), 350–355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.415>
- Ahn, D.G. (2021) Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf. – Green Tech.*, 8, 703–742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>
- Anderson, I.E. et al. (2018) Feedstock powder processing research needs for additive manufacturing development. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.*, 22(1), 8–15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2018.01.002>
- Chen, G., Zhao, S.Y., Tan, P. et al. (2018) A comparative study of Ti–6Al–4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization. *Powder Technology*, 333, 38–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.013>
- Sun, P., Fang, Z., Zhang, Y. et al. (2017) Review of the methods for the production of spherical Ti and Ti alloy powder. *JOM*, 69, 1853–1860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837017-2513-5>
- Heidloff, A.J., Rieken, J.R., Anderson, I.E. et al. (2010) Advanced gas atomization processing for Ti and Ti alloy powder manufacturing. *JOM*, 62, 35–41. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-010-0075-x>
- Guo, K., Liu, C., Chen, S. et al. (2020) High pressure EIGA preparation and 3D printing capability of Ti–6Al–4V powder. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(1), 147–159. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65187-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65187-3)
- Martín, A., Cepeda-Jiménez, C.M., Pérez-Prado, M.T. (2020) Gas atomization of γ -TiAl alloy powder for additive manufacturing. *Adv. Eng. Mater.*, 22, 1900594. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.201900594>
- Drawin, S., Deborde, A., Thomas, M. et al. (2020) Atomization of Ti-64 alloy using the EIGA process: comparison of the characteristics of powders produced in lab-scale and industrial-scale facilities. *MATEC Web Conf.*, 321, 07013. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032107013>
- Zhong, C., Chen, J., Linnenbrink, S. et al. (2016) A comparative study of Inconel 718 formed by high deposition rate laser metal deposition with GA powder and PREP powder. *Materials & Design*, 107, 386–392. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.037>
- Zhao, Y., Cui, Y., Numata, H. et al. (2020) Centrifugal granulation behavior in metallic powder fabrication by plasma rotating electrode process. *Sci. Rep.*, 10, 18446. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75503-w>
- Yang Liu, Xiao-hao Zhao, Yun-jin Lai et al. (2020) A brief introduction to the selective laser melting of Ti6Al4V powders by supreme-speed plasma rotating electrode process. *Progress in Natural Science: Materials International*, 30(1), 94–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2019.12.004>
- Строгонов Д.В., Коржик В.М., Цзянлун І. та ін. (2022) Вплив параметрів процесу плазмово-дугової сферидизації струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі на гранулометричний отриманих порошків. *Сучасна електротехнологія*, 3, 29–38. DOI: <https://doi.org/10.1037434/sem2022.03.05>
- Strogonov, D.V., Korzhyk, V.M., Jianglong Ti, 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 Elektrometal.*, 3, 29–38 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.1037434/sem2022.03.05>
- Yurtkuran, E., Ünal, R. (2022) Theoretical and experimental investigation of Ti alloy powder production using low-power plasma torches. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(1), 175–191. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65786-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65786-2)
- Tsantrizos, P.G., Allaire, F., Entezarian, M. (1998) *Method of production of metal and ceramic powders by plasma atomization*. US patent, 5707419 [P], 1998–01–13.
- Cacace, S., Boccadoro, M., Semeraro, Q. (2023) Investigation on the effect of the gas-to-metal ratio on powder properties and PBF-LB/M processability. *Prog. Addit. Manuf.* DOI: <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00490-z>
- Коржик В.М., Строгонов Д.В., Бурлаченко О.М. та ін. (2023) Установка нового покоління для плазмово-дугового нанесення покриттів і розпилення струмопровідних дрових матеріалів. *Сучасна електротехнологія*, 3, 19–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.03>
- Korzhyk, V.M., Strogonov, D.V., Burlachenko, O.M. et al. (2023) New generation unit for plasma-arc deposition of coatings and spraying of current-conducting wire materials. *Suchasna Elektrometal.*, 3, 19–27 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.03>
- Коржик В.М., Строгонов Д.В., Бурлаченко О.М. та ін. (2023) Ефективність процесу плазмово-дугової сферидизації струмопровідного титанового дроту. *Сучасна електротехнологія*, 1, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.01.05>
- Korzhyk, V.M., Strogonov, D.V., Burlachenko, O.M. et al. (2023) Effectiveness of the process of plasma-arc spheroidization of current-conducting titanium wire. *Suchasna Elektrometal.*, 1, 1–9 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.01.05>
- Capus, J. (2017) AP&C: moving fast with the rise of AM. *Metal Powder Report*, 72(1), 22–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2016.12.001>
- Петруничев В.А., Кудинов В.В., Кулагин И.Д. (1965) Получение сфероидизированного металлического порошка распылением проволоки. *Известия АН СССР. Металлы*, 2, 68–94.
- Petrunichev, V.A., Kudinov, V.V., Kulagin, I.D. (1965) Production of spheroidized metal powder by wire spraying. *Metally*, 2, 68–94 [in Russian].
- Зеленин В.И., Кавуненко П.М., Тисенков В.В. и др. (2009) Применение плазменно-дуговой металлизации для восстановления колесных пар грузовых вагонов. *Автоматическая сварка*, 12, 36–40.
- Zelenin, V.I., Kavunenko, P.M., Tisenkov, V.V. et al. (2009) Application of plasma-arc metallization for restoration of wheel pairs. *The Paton Welding J.*, 12, 28–31.
- Коржик В.Н., Короб М.Ф. (2012) Механизированная линия PLAZER 30PL-W для плазменно-дугового проволочного напыления покрытий на крупногабаритные детали типа «вал». *Сварщик*, 4, 13–15.
- Korzhyk, V.N., Korob, M.F. (2012) Mechanized line PLAZER 30PL-W for plasma-arc wire spraying of coatings on large-sized parts of “shaft” type. *Svarshchik*, 4, 13–15 [in Russian].
- Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н. и др. (2008) Влияние рода газа спутного потока на характеристики дуговой плазмы, создаваемой плазмотроном с проволокой-анодом. *Автоматическая сварка*, 6, 19–24.
- Kharlamov, M.Yu., Krivtsun, I.V., Korzhik, V.N. et al. (2008) Effect of the type of concurrent gas flow on characteristics of the arc plasma generated by plasmatron with anode wire. *The Paton Welding J.*, 6, 14–18.
- Kharlamov, M., Krivtsun, I., Korzhyk, V., Demyanov, O. (2015) Simulation of motion, heating and breakup of molten metal droplets in the plasma jet at plasma-arc spraying. *J. of Thermal Spray Technology*, 24, 659–670. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0216-4>
- Liu, F., Yu, D., Zhang, Q. et al. (2023) Experimental and numerical analysis of a novel reverse-polarity plasma torch with transferred arc hot-wall nozzle for atmospheric plasma spraying of YSZ coatings. *Surface and Coatings Technology*, 459, 129413. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129413>
- Shechitsyn, V.Yu., Yazovskikh, V.M. (2009) Effect of polarity on the heat input into the nozzle of a plasma torch. *Welding International*, 16(6), 485–487. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507110209549563>

28. Харламов М.Ю., Кривцун И.В., Коржик В.Н. и др. (2015) Моделирование характеристик плазмы сжатой дуги при воздушно-плазменной резке на прямой и обратной полярностях. *Автоматическая сварка*, **10**, 11-19. Kharlamov, M. Yu., Krivtsun, I. V., Korzhik, V. N. et al. (2015) Modelling the characteristics of constricted-arc plasma in straight and reverse polarity air-plasma cutting. *The Paton Welding J.*, **10**, 10-18.
29. Bouabbou, A., Vaudreuil, S. (2023) Numerical modelling of SS316L powder flowability for laser powderbed fusion. *Archives of Materials Science and Engineering*, **120(1)**, 22–29. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.6014>

DEVELOPMENT OF PLASMA-ARC TECHNOLOGIES OF SPHERICAL GRANULES PRODUCTION FOR ADDITIVE MANUFACTURING AND POWDER METALLURGY

Korzhyk V.M., Strohonov D.V., Burlachenko O.M., Voitenko O.M., Kunitskyi D.V.

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

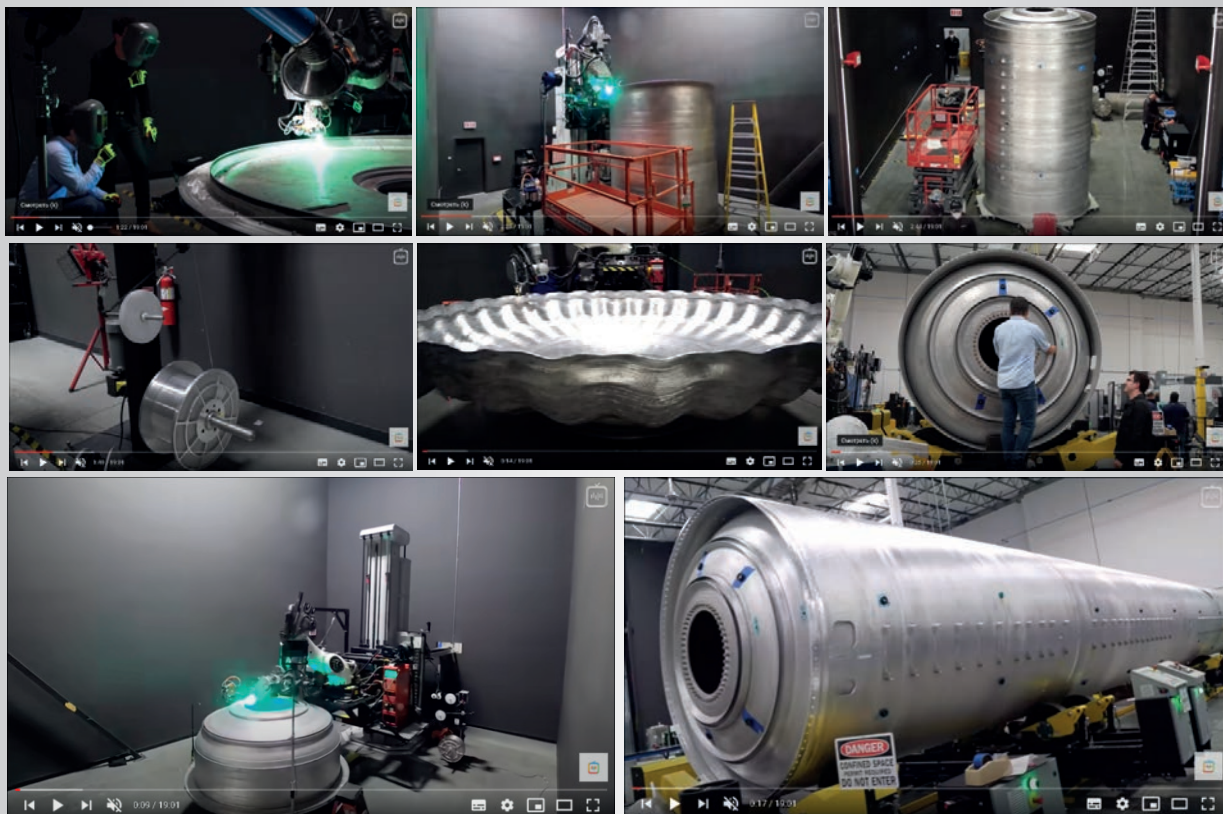
The technological and structural properties of spherical granules and the peculiarities of their production processes using industrial technologies of gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma-arc atomization of neutral and current-carrying wires and rods are considered. It was found that among the considered methods of obtaining spherical granules, the most promising in terms of productivity, energy efficiency and simplicity of the equipment used is the method of plasma-arc atomization, which, due to the presence of a large number of technological and structural parameters of the process, allows adjusting the particles size distribution and technological properties of the granules in a wide range. Experimental studies have shown that the particles size distribution, shape factor and technological properties of granules made of titanium alloys and stainless steel obtained by plasma-arc atomization of current-carrying wire materials at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, together with LLC «R&D PLAZER center», are at the level of the best foreign analogues. A promising direction of increasing the energy efficiency and productivity of the process of obtaining spherical granules for additive manufacturing and granule metallurgy using the technology of plasma-arc atomization of current-carrying rods with a diameter of more than 50 mm at reversed polarity by plasma torches with a hollow copper anode is proposed. Ref. 29, Tabl. 4, Fig. 20.

Keywords: plasma-arc atomization of current-carrying wires and rods, spherical granules, additive manufacturing, selective and direct laser melting, granule metallurgy

Надійшла до редакції 19.10.2023

3D ДРУК КОСМІЧНИХ РАКЕТ

Компанія «Relativity Space» (США) розробила технологію та обладнання для 3D друку корпусу та паливних баків космічних ракет. Ракета висотою 30 м друкується за 60 днів. Використовується гібридна зварювальна технологія «дуга + лазер», швидкість друку 25,4 см/с, матеріал для друку – алюміній. Всі розміри при друці витримуються з точністю за волосину людини (до 0,1 мм). Шорсткість збільшує масу на 5...10 %, але вона не впливає на аеродинамічні властивості корпусу ракети.



<https://www.youtube.com/watch?v=kz165f1g8-E>