

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ПРИ ОТРИМАННІ ДИСПЕРСНИХ ГРАНУЛ ГАЗОВИМ І ПЛАЗМОВО-ДУГОВИМ РОЗПИЛЕННЯМ МЕТАЛЕВИХ РОЗПЛАВІВ ТА КОМПАКТНИХ МАТЕРІАЛІВ (Огляд)

В.М. Коржик, О.С. Терещенко, Д.В. Строгонов, О.І. Дем'янов, О.В. Ганущак

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

Розглянуто технологічні особливості використання ультразвукових коливань для диспергування мікрооб'єктів металевих розплавів в таких технологіях виробництва дисперсних сферичних порошків, як: газове розпилення, ультразвукове розпилення на хвилеводі, розпилення плазмовою дугою за рахунок стоячої хвилі, розпилення електричною дугою з прикладанням ультразвуку до розпилюваного дроту, розпилення плазмовою дугою з прикладанням ультразвукових коливань до розпилюваної заготовки. Проаналізовано вплив ультразвукових коливань на процес формування та відрив краплі розплаву для згаданих методів. Встановлено, що накладання ультразвуку сприяє зменшенню розміру початкових крапель розплаву, інтенсифікує диспергування за рахунок створення додаткового тиску на краплини розплаву, та, як результат, сприяє звуженню розподілу гранулометричного складу. З'ясовано, що серед проаналізованих підходів до отримання сферичних порошків з використанням високочастотних акустичних коливань найбільш перспективною є технологія плазмово-дугового розпилення дротів та прутків за умови накладання ультразвуку безпосередньо на заготовку. Проведено аналіз ефективності та перспектив використання плазмово-дугових технологій розпилення з введенням ультразвукових коливань у розпилювані заготовки і зроблено припущення, що даний підхід дозволить збільшити вихід порошків фракції –63 мкм до 80...90 %, що є перспективним для застосування у виробництві порошків для адитивних технологій. Бібліогр. 45, рис. 6.

Ключові слова: ультразвукове розпилення, диспергування, плазмово-дугове розпилення, газове розпилення, сферичні порошки, гранулометричний склад

Вступ. Вплив акустичних коливань в ультразвуковому діапазоні широко застосовується в техніці та промисловості для вирішення завдань з неруйнівного контролю (дефектоскопія, визначення товщин покриттів, медичні дослідження), для екологічної очистки матеріалів у спеціальних ваннах з метою знежирення або галтування для активації поверхні перед нанесенням покриттів, для пайки та зварювання металів і пластиків, для розпилення рідин в аналітичному обладнанні та металевих розплавів (диспергування) у виробництві порошків, у металообробці для зниження коефіцієнта тертя та при фінішній обробці отворів після свердління та фрезерування [1]. Крім того, застосування ультразвуку в промислових технологіях включає ударну обробку зварних швів для релаксації внутрішніх напружень та нагартування поверхні, ультразвукове волочіння дроту зі зворотно-поступальним коливальним рухом волоки, гомогенізацію розчинів і формування суспензій та емульсій [2]. Особливою важливою особливістю ультразвукових коливань є інтенсифікація руху середовища, в якому вони розповсюджуються, що може бути засто-

сованим для підвищення ефективності існуючих технологій, особливо це стосується зварювальних та споріднених процесів [3].

Відомо, що у технологіях електродугового зварювання прикладання ультразвукових коливань до самих деталей, до розплавленого металу або ж до витратного електрода призводить до активного перемішування зварювальної ванни за рахунок механічних коливань, підвищення теплопровідності частинок у дузі при збільшенні коефіцієнта термічної дифузії та збільшення тиску, що створює електрична дуга [4–6]. Сама дуга під дією коливань звужується зі збільшенням щільності її енергії, що підвищує вкладення тепла в частинки металу [7]. Крім того, за рахунок високочастотних коливань іонізовані частинки знаходяться в дузі довше після проходження резонансної частоти [8]. Використання ультразвуку в технології напівавто-матичного зварювання плавким електродом демонструє більш активний перенос частинок розплаву з торця дроту: швидкість польоту крапель зростає на 10...20 % при збільшенні частоти відриву крапель у 3 рази за рахунок резонування плівки розплаву

В.М. Коржик — <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, О.С. Терещенко — <http://orcid.org/0009-0003-4021-0758>,
Д.В. Строгонов — <http://orcid.org/0000-0003-4194-764X>, О.І. Дем'янов — <https://orcid.org/0000-0001-7184-3839>,
О.В. Ганущак — <https://orcid.org/0000-0003-4392-6682>

на торці дроту і флуктуаціями його поверхні та, крім того, надаючи краплинам, що утворюються на поверхні розплаву, додаткового прискорення, що призводить до зниження зусилля необхідного для відриву та, відповідно, до інтенсифікації процесів масопереносу в електричній дузі [7–14].

Зважаючи на згаданий вище вплив ультразвукових коливань, використання даних ефектів може бути перспективним в такому застосуванні, як розпилення порошоків для адитивних технологій виробництва (AM — Additive Manufacturing), що вимагають сферичних частинок вузьких класів. Наразі проблема отримання порошоків класу –63 мкм з високим коефіцієнтом сферичності не вирішена в повній мірі технологічним втіленням. Найбільш перспективними технологіями отримання дрібних сферичних частинок з високими коефіцієнтами сферичності та чистотою і відтворваністю хімічного складу є плазмові (РА — Plasma Atomization) [15, 16]. Виходячи з того, що традиційно технології РА використовують дроти як вихідні матеріали для розпилення, накладання на них ультразвукових коливань, за рахунок впливу на електричну дугу та розплав, потенційно може бути використане для збільшення виходу дрібнодисперсної фракції класу –100 мкм, підвищення продуктивності процесу розпилення та підвищення коефіцієнта сферичності отриманих порошоків.

Відповідно, метою даної роботи є встановлення впливу ультразвукових коливань при отриманні порошоків газовим і плазмово-дуговим розпиленням металевих розплавів та компактних матеріалів на дисперсність та гранулометричний склад отриманих порошоків.

У зв'язку з тим, що даний аспект застосування височастотних акустичних коливань у технологіях розпилення розплавів потребує детального дослідження, дана робота направлена на вирішення таких задач: проведення критичного огляду існуючих технологій диспергації мікрооб'ємів металевого розплаву з використанням ультразвуку; оцінка перспектив і проведення аналізу ефективності використання ультразвуку при плазмово-дуговому розпиленні дрових та пруткових матеріалів та перспектив використання такого підходу.

Використання ультразвукових коливань в процесах диспергації мікрооб'ємів металевого розплаву. Ультразвукові генератори широко використовують для диспергування (розпилення) рідин і отримання аерозолів у медичних застосуваннях та в аналітичній техніці для проведення досліджень хімічного складу рідин або розчинених

твердих речовин методами емісійної спектроскопії. На відміну від інших методів диспергування ультразвукове розпилення не пов'язане з формуванням високошвидкісних потоків за рахунок розбиття крапель газовими струменями та вимагає більш ніж в 100 раз менше потужності для отримання крапель необхідного діаметра. Основними механізмами розпилення тут є кавітація та резонанс. Причому, основною змінною, що визначає розмір отриманих крапель є частота коливань, яка, в свою чергу, задає амплітуду коливань [17–20].

Авторами роботи [21], що вивчали вплив елементів коливальної контури на середній розмір розпиленних частинок, була підтверджена на практиці дана гіпотеза та отримана емпірична формула (1), з якої випливає, що параметрами, які впливають на середній розмір розпиленних частинок є поверхневий натяг рідини σ , густина ρ та частота коливань f , яка є основною змінною процесу:

$$D_{\text{сеп}} = 0,73 \left(\frac{\sigma}{\rho f^2} \right)^{1/3}. \quad (1)$$

При цьому авторами [19] встановлено, що для ініціації процесу диспергування розплаву за рахунок збудження стоячих хвиль при резонансній частоті необхідно досягнути певного значення амплітуди коливань. З запропонованої моделі випливає, що мінімальна амплітуда коливань залежить від динамічної в'язкості μ , густини ρ , поверхневого натягу рідини σ та частоти коливань f :

$$A_m = \frac{2\mu}{\rho} \sqrt[3]{\frac{\rho}{\pi\sigma f}}. \quad (2)$$

Окремим застосуванням ультразвуку при розпиленні рідин є розпилювальна сушка (spray drying). Метод являє собою розпилювальну сушку, при якій в реактор, що обдувається гарячим повітрям або нагрітим газом через форсунку, до якої прикладені височастотні коливання, впорскується потік речовини, що являє собою суспензію або розчинену відповідним розчинником речовину. Під час проходження через сопло форсунки потік розбивається за рахунок кавітації на дрібні частинки, розмір яких визначається частотою коливань та характеристиками рідини, після чого розчинник випаровується за рахунок конвекції. Результатом цього є наддрібні частинки вузького гранулометричного складу, що є неможливою задачею для звичайної розпилювальної сушки, проте основними застосуваннями цього методу є харчова промисловість, фармацевтичне виробництво та отримання грануляту порошоків для порошкової

металургії. Останнє дозволяє вирішити питання отримання композиційних нанопорошків та значно підвищити технологічність субмікронних порошків, до того ж зменшивши транспортувальні втрати за рахунок унесення [22–25].

З описаних закономірностей можна зробити висновок про те, що розпилення з застосуванням ультразвукових коливань може бути використане не тільки для рідин, а й для металевих розплавів. Відповідно, ультразвукові коливання можуть розглядатися як метод покращення якості, дисперсності та збільшення виходу необхідного продукту в технологіях отримання дисперсних порошків розпиленням.

Газове розпилення металевих розплавів із застосуванням ультразвуку. Розпилення розплаву струменями холодного газу є давно відомою і дуже поширеною технологією виробництва металевих порошків. Система розпилення складається з системи нагрівання тигля, в який завантажено вихідний матеріал, проміжного ковша з спеціальним соплом для розливки, системи подачі газу на зріз цього сопла та камери, в якій відбувається процес. Першим етапом процесу розпилення газу є вилівка розплавленого металу з проміжного ковша через спеціальну форсунку. Далі рідкий метал розбивається струменями інертного газу, що сприяють розділенню розплаву на дрібні краплі та їх охолодженню, яке триває під час падіння крапель в камері у бункер-збірник [26].

Традиційна технологія газового розпилення має суттєві недосконалості: широкий діапазон гранулометричного складу порошку від 25 до 500 мкм, низький коефіцієнт сферичності до 0,7, формування сателітів на поверхні великих частинок та закрита пористість [27]. Для вирішення цих проблем велися роботи з оптимізації процесу газового розпилення з використанням ультразвукових коливань, що прикладаються до трубки розливки розплаву, що вставляється у форсунку, яка слугує хвилеводом для передачі ультразвукових коливань [28–30]. Схема такого процесу наведена на рис. 1.

Вітчизняні дослідники [31] використали підхід з передачею ультразвукових коливань на розплав через диспергуючий газ при використанні проміжного сопла, що працює за типом акустичного випромінювача. Коливання на проміжному соплі виникають за рахунок розсічення потоку газу верхньою кромкою, що сприяє збудженню коливань у газі перед зіткненням з потоком розплаву. Використовуючи штатний інжекційний вузол для газового розпилення з ультразвуковим проміжним

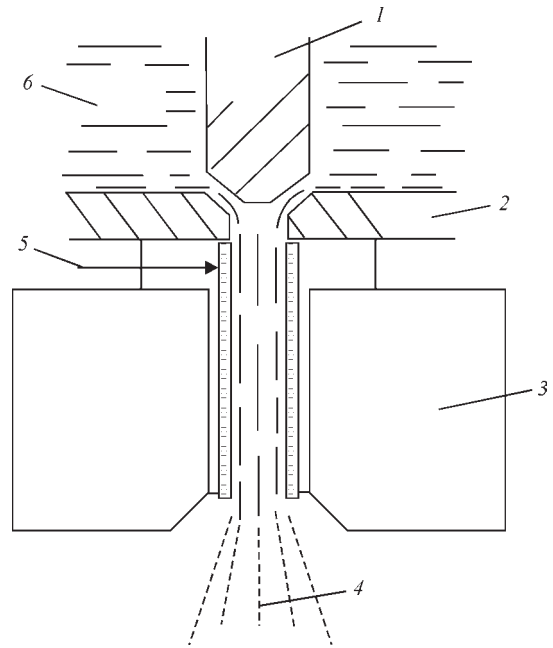


Рис. 1. Ультразвукове газове розпилення [28]: 1 — стопорний стрижень; 2 — тигель; 3 — ультразвукова форсунка; 4 — конус розпилення; 5 — керамічна трубка розливки; 6 — розплав соплом та без нього автори встановили, що при розпиленні сплаву НМ79 вихід фракції <math><80\text{ мкм}</math> становив не менше 75 % проти 58 % без використання ультразвуку.

Втім промислового впровадження технологія газового розпилення з ультразвуковими коливаннями не знайшла у зв'язку з неможливістю вирішити основні недоліки процесу формування закритої газової пористості та розвинутої поверхні частинок.

Ультразвукове розпилення металевого розплаву на хвилеводі. Одним з найновіших методів до виробництва високоякісних металевих порошків є розпилення розплаву у тиглі, що є частиною ультразвукового коливального контуру.

Так, авторами роботи [32] розроблено технологічний підхід, що дозволяє отримувати сферичні порошки металів і сплавів, використовуючи вихідний матеріал у вигляді кускового матеріалу, причому матеріал розміщується у тиглі індукційної пічки, з якої краплі розплаву, витікаючи через сопло, вільно падають на хвилевід, на який подаються коливання з частотою 20 кГц, а для підтримання рідкого стану матеріалу використовується електрична дуга (рис. 2). Сама камера процесу розпилення заповнюється аргоном, а розбиті капілярними хвилями краплі, що відриваються від розплаву, здуваються потоком аргону та затвердівають. Видалення атмосферних газів перед заповненням аргоном виконується за рахунок вакуумних насосів.

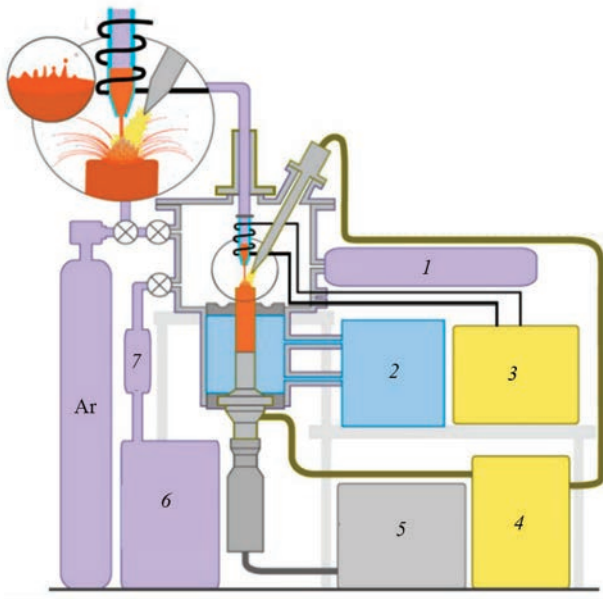


Рис. 2. Схема ультразвукового розпилення розплаву на хвилеводі з додатковим нагрівом електричною дугою [32]: 1 — датчик диску; 2 — водяне охолодження; 3 — височастотний генератор; 4 — система дугового переплаву; 5 — ультразвуковий генератор; 6 — вакуумний насос; 7 — фільтр

Дослідники в роботі [33] показали, що розпилення металевого розплаву залізних сплавів на хвилеводі дозволяє отримати розмір частинок менше 100 мкм, причому вихід фракції 32...45 та 45...63 мкм становить не менше 60 % від загального виходу порошку. У роботі [34] показано, що на титанових сплавах Ti-6Al-4V та Ti25Al12Nb дана технологія дозволяє забезпечити коефіцієнт сферичності частинок 0,9 та підвищити вихід вмісту класу -63 + 20 в порівнянні з газовим розпиленням: так, розпилення газом дає вихід фракції -63 мкм на рівні 30 % від загального об'єму, в той

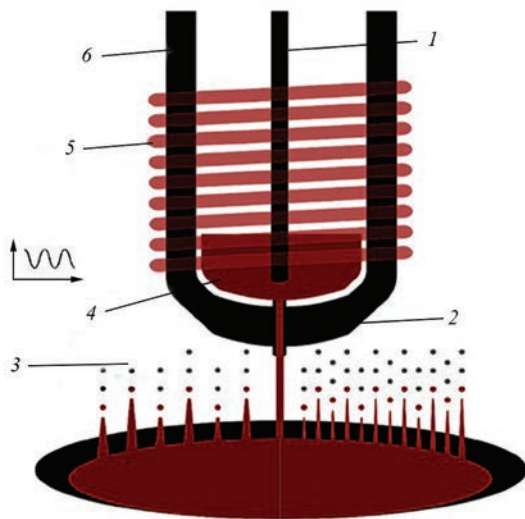


Рис. 3. Схема ультразвукового розпилення розплаву на хвилеводі [35]: 1 — запираючий графітовий стрижень; 2 — графітове сопло; 3 — алюмінієвий порошок; 4 — розплав алюмінію; 5 — індуктор; 6 — графітовий тигель

час як ультразвукове розпилення на хвилеводі має вихід порядку 80...90 % в залежності від частоти коливань.

В ході експериментів дослідники [34] встановили, що для розпилення металевих розплавів на вібруючій з високою частотою поверхні справедливим є рівняння (3), що встановлює залежність середнього розміру частинок від довжини капілярної хвилі λ та емпіричної функції f , що залежить від значення критеріїв Вебера (We), Онезорге (Oh) та інтенсивності (In). Причому в більшості процесів розпилення розплавів значення функції приймають як рівне одиниці ($f(We, Oh, In) = 1,0$):

$$D_{\text{сер}} = 0,34\lambda f(We, Oh, In). \quad (3)$$

Проте для розрахунку довжини капілярної хвилі автори роботи [34] пропонують використовувати емпіричну залежність (4), що включає поверхневий натяг σ та густину ρ розплаву при заданій температурі, частоту коливань f , а також товщину плівки розплаву h :

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma \tan h\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)}{\rho f^2}}. \quad (4)$$

Після підстановки довжини капілярної хвилі у формулу (3) та прийняття значення $f(We, Oh, In) = 1$ отримаємо формулу (5), яку можна застосовувати для визначення середнього значення частинок, використовуючи значення густини та поверхневого натягу розплаву при відомій температурі T .

$$D_{\text{сер}} = 0,34\sqrt[3]{\frac{8\pi\sigma_T}{\rho_T f^2}}. \quad (5)$$

Проводячи дослідження процесу розпилення порошоків технічного алюмінію у роботі [35] вчені використовували спрощене обладнання без застосування додаткового нагріву розплаву, що розливається. Схема процесу наведена на рис. 3, а методика розпилення виглядає наступним чином: графітовий тигель заповнювали гранульованим алюмінієвим порошком та поміщали в електромагнітне поле індуктора, тигель оснащували графітовим соплом для розливу, розплав алюмінію виливали на хвилевод з мідного сплаву, що коливався з частотою 60 кГц. Причому камеру процесу відкачували вакуумним насосом та заповнювали аргоном до тиску 100 мбар, в той час як піч відкачували та заповнювали аргоном до тиску 200 мбар, тобто розливка відбувалася під певним диференціальним тиском на додачу до гравітаційної складової. У даному дослідженні було вста-

новлено вплив амплітуди коливань на гранулометричний склад матеріалу і показано, що зниження амплітуди коливань звужує ширину розподілу розмірів частинок та знижує середній розмір частинок. Так, при амплітуді 9,9 мкм середній розмір частинок алюмінію становив 41,7 мкм, а при амплітуді 8,55 мкм — 31,8 мкм відповідно.

Розпилення плазмовою дугою за рахунок стоячої хвилі. Дослідження можливості розпилення металевих розплавів, використовуючи енергію акустичних високочастотних коливань, розпочалися в середині минулого століття, проте у 1987 р. дослідники Баукхейдж, Шокенберг та Веттерс у своєму патенті 39 178А зробили припущення щодо можливості інтенсифікації процесу за рахунок застосування двох коливальних контурів, хвилеводи яких знаходяться один навпроти одного та на які подаються ультразвукові коливання з незначною різницею в частоті. За такої умови між хвилеводами генерується стояча акустична хвиля близька до сферичної форми, а в проміжок між хвилеводами з тигля через сопло подається розплав металу, краплі якого розриває зсередини за рахунок кавітації, а подрібнені краплинки розлітаються радіально з наступним охолодженням.

В подальших статтях дослідники робіт [36] та [37] продемонстрували потенціал можливої технології розпилення за рахунок стоячої хвилі (Ultrasonic Standing Wave Atomization) та сформулювали теоретичні уявлення щодо процесів передачі акустичних коливань через газове середовище, передачу тепла та припущення щодо формування частинок з металевих розплавів, надаючи заключення про можливість отримання порошків з середнім розміром меншим за 15 мкм.

Проте реальних даних щодо реалізації цього підходу у розпилення металевих розплавів немає, а тільки орієнтовна схема технологічного обладнання закритого циклу, що представлена на рис. 4.

Не дивлячись на відсутність впровадження технології, цікавість має потенційне використання стоячої ультразвукової хвилі при плазмовому розпиленні пруткових та дровових матеріалів. Ми припускаємо, що акустичні коливання будуть поширюватися через газове середовище на плазму, а з неї — на розпилювану заготовку, що створить додатковий тиск відриву краплі розплаву.

З іншого боку ми припускаємо, що відповідно до досліджень [38], використання напрямлених одне на одного хвилеводів буде впливати на профіль плазмової дуги, обтискаючи її, та, відповідно, підвищуючи щільність енергії та теплоперенос, оптимізуючи чи інтенсифікуючи режим опла-

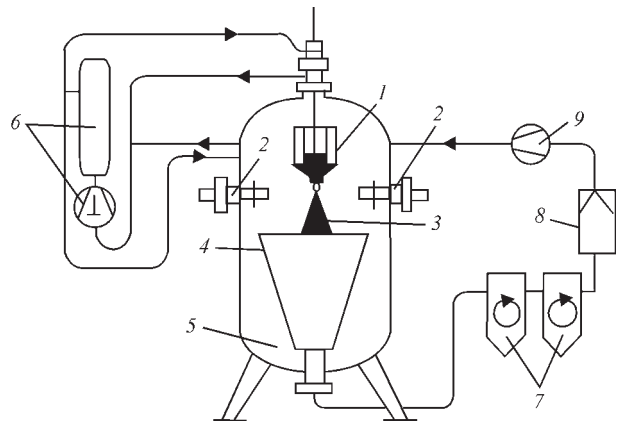


Рис. 4. Схема установки ультразвукового розпилення за рахунок стоячої хвилі [36]: 1 — тигель з розплавом; 2 — хвилеводи; 3 — конус розпилення; 4 — пристрій відведення відпрацьованих газів; 5 — бункер збірник; 6 — резервуар з робочим газом; 7 — циклон та сита; 8 — фільтр; 9 — компресор

лення заготовки. Це потенційно дозволить отримувати дрібніші порошки більш вузької фракції з вищою продуктивністю.

Розпилення електричною дугою з прикладанням коливань до розпилюваного матеріалу. Електродугове розпилення є давно відомим підходом, який традиційно використовується для наплення функціональних покриттів за технологією електродугової металізації. Вона характеризується відносною простотою та доступністю обладнання, що складається з блоку подачі дровів-електродів, системи подачі диспергуючого газу, системи живлення електричної дуги та камери розпилення. Також технологія відрізняється високою продуктивністю, яка в деяких випадках може досягати до 40 кг/год. Ця технологія забезпечує значний вихід дрібнодисперсної фракції (<63 мкм) та інші переваги. Однак, незважаючи на численні плюси, суттєвим недоліком електродугового розпилення є використання холодного газу для диспергування розплаву, що утворюється на кінці розпилюваних дровів. Це призводить до отримання порошків з високим вмістом частинок неправильної форми, сателітів та значною внутрішньою пористістю через захоплення розплавом диспергуючого газу, що ускладнює їх використання в адитивних технологіях [39, 40]. Схема процесу наведена на рис. 5.

Дослідники роботи [40] при розпиленні дровів з нержавіючої сталі AISI 630 та диспергуванні крапель розплаву аргонном у атмосфері аргону в реакторі отримали порошки з гранулометричним складом від 10 до 160 мкм при середньому розмірі частинок близько 70 мкм.

У роботі [41] автори проводили експерименти з розпилення алюмінієвих дровів електричною дугою при диспергуванні розплаву аргонном у атмосфері повітря та отримали частинки з коефіцієнтом

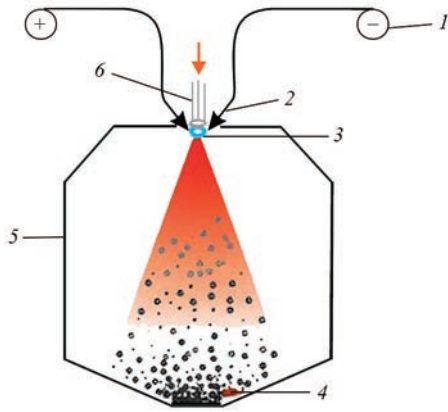


Рис. 5. Принципова схема електродугового розпилення дроту [40]: 1 — дріт; 2 — пристрій подачі дроту; 3 — електрична дуга; 4 — порошок; 5 — камера розпилення; 6 — електродуговий пальник

сферичності в діапазоні 0,71...0,81 при середньому розмірі частинок 50...80 мкм.

Повертаючись до можливості введення високочастотних коливань до дротів, що подаються в процесі електродугового розпилення, на даний момент відсутні дані щодо впровадження цього підходу, проте існує ряд досліджень процесів тепло- і масопереносу в електродугових процесах MIG/MAG при одночасній подачі ультразвукових коливань на зварювальний дріт. Ці дослідження показали активний вплив ультразвуку, прикладеного до дроту-катоду, на поверхневий натяг та прискорення, що є додатковим до прискорення вільного падіння за рахунок гравітації. Встанов-

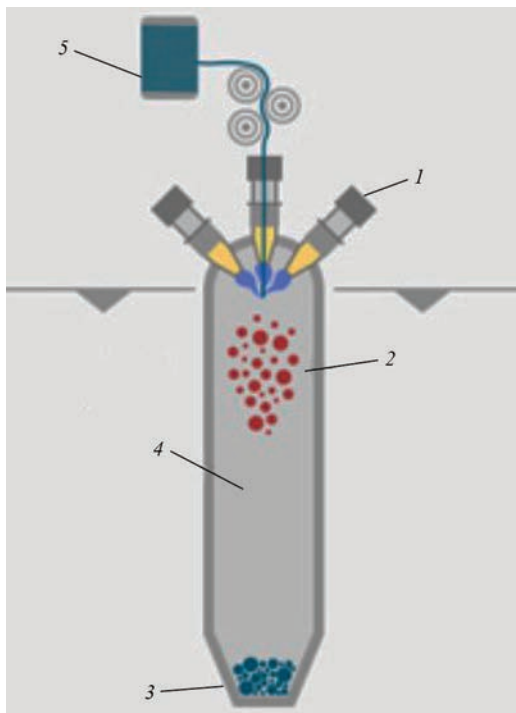


Рис. 6. Плазмове розпилення дроту за технологією PyroGenesis [44]: 1 — плазматрон; 2 — краплі розплаву; 3 — порошок; 4 — аргон; 5 — катушка дроту

лені закономірності при напівавтоматичному MIG зварюванні демонструють, що ультразвукові коливання сприяють формуванню витягнутих краплевидних частинок на протидію сферичним, що формуються при оплавленні торця дроту без коливань. Це, в свою чергу, дозволяє звужити ширину зони відриву, зменшуючи необхідну силу відриву та прискорюючи сам відрив на 20 %, що встановлено та змодельовано у роботах [11, 12].

З іншого боку, суттєвий вплив на саму електричну дугу мають ультразвукові коливання — електрична дуга звужується, а відповідно зростає щільність її енергії. В той же час, вкладення тепла в найменші складові частинки потоку металу при розплавленні дугою є значно вищими, адже за рахунок високочастотних коливань іонізовані частинки знаходяться в дузі довше після проходження резонансної частоти [7, 8]. Авторами робіт [9, 10] встановлено, що використання ультразвуку в технології напівавтоматичного зварювання плавким електродом у вигляді дроту демонструє більш активний перенос частинок розплаву з торця дроту: швидкість польоту крапель зростає на 10...20 % при збільшенні частоти відриву крапель у 3 рази. Цей ефект досягається резонансом плівки розплаву на торці дроту та флуктуаціями його поверхні, що призводить до інтенсифікації процесів масопереносу у зварювальну ванну [10].

Відповідно до цього можна зробити припущення про ймовірну активізацію процесу електродугового розпилення та зменшення енерговитрат на нього за рахунок звуження дуги зі збільшенням її питомої енергії. З іншого боку, такий процес вимагатиме використання двох окремих коливальних контурів для передачі ультразвуку на дріт-анод та дріт-катод. Цікавим може бути також вплив на процес розпилення, а саме — на формування краплі розплаву та її дезінтеграцію, кавітації та, можливо, стоячої хвилі, що формуватиметься між торцями дротів та розповсюджуватиметься через газове середовище, інтенсифікуючи розпилення та звужуючи діапазон розміру частинок.

Розпилення плазмовою дугою з ультразвуковими коливаннями, що прикладаються до розпилюваного матеріалу. Однією з найбільш перспективних технологій виробництва сферичних високоякісних порошоків є плазмове розпилення, яке не позбавлене своїх складнощів — велика кількість змінних робочих параметрів викликає складність отримання повторюваного результату та продуктивності. Так, в роботі [42] дослідили та встановили, що свій вплив на кінцевий розмір частинок порошку при розпиленні струмопровідного дроту має щонайменше вісім робочих параметрів,

при чому найбільший вплив на гранулометричний склад отриманих порошків мають струм дуги, швидкість подачі дроту, довжина дуги, витрата супутнього газу та зазор між плазмотвірним та обтискаючим соплами.

Один з комерційно реалізованих підходів до плазмового розпилення виконаний компанією «PyroGenesis». У процесі розпилення використовують три плазмотрони, між якими вводиться дріт без підведення електричного потенціалу, тобто плавлення матеріалу відбувається за рахунок тепла плазмової дуги, а розпилення — за рахунок тиску плазми [43]. Схематично такий процес наведено на рис. 6.

Не дивлячись на технологічність, продуктивність процесу плазмового розпилення порошків становить 2...3 кг/год по порошкам титанових сплавів та може бути збільшена до 5 кг/год при використанні додаткового індукційного нагріву дротового матеріалу перед подачею в робочу зону плазмотронів [43].

Існують різні підходи до підвищення продуктивності процесу плазмового розпилення, такі як розпилення матеріалу прямою плазмовою дугою, використання супутніх газових струменів з надзвуковою плазмою, а також гібридні технології [45]. Розвитком та дослідженням цих технологій займаються групи вчених по всьому світу, проте одним з гіпотетично можливих, але не реалізованих та не впроваджених шляхів оптимізації та інтенсифікації розпилення плазмовою дугою є прикладання ультразвукових коливань в дроти або прутки, що подаються в процес.

Аналіз ефективності та перспектив використання ультразвуку при плазмово-дуговому розпиленні дротових і пруткових матеріалів. Плазмово-дугове розпилення є одним з ефективних методів отримання сферичних металевих порошків, які широко застосовуються в авіаційній, ракетній та адитивній промисловостях. Удосконалення цього процесу шляхом введення ультразвукових коливань може суттєво покращити характеристики порошків, зокрема їхній гранулометричний склад та сферичність. Плазмово-дугове розпилення базується на використанні тепла високотемпературної плазми для оплавлення торця металевих дротів або прутків, зриву крапель розплаву та їх диспергування плазмовим струменем. Основними параметрами процесу є температура плазми, швидкість потоку, електричні параметри дуги та властивості розпилюваного матеріалу. Вплив цих параметрів визначає кінцеві характеристики отриманого порошку.

Крім того перспективним є введення ще одного виду впливу, а саме — ультразвукових коливань, що при розповсюдженні через розпилюваний матеріал знижують поверхневий натяг півки розплаву, викликають інтенсифікацію тепло- та масопереносу, створюють додатковий тиск на краплю розплаву, прискорюючи її зрив, сприяють подрібненню вихідної краплі та покращенню однорідності розпилення. У відповідності до проведених у роботі [33] досліджень, в якій проводиться порівняння ультразвукового розпилення на хвилеводі з традиційним газовим розпиленням, введення високочастотних коливань в розплав металу сприяє підвищенню виходу дрібнодисперсних частинок вузького гранулометричного складу $-63 + 20$ мкм до 80...90 % за рахунок зменшення вихідного розміру краплі розплаву. Причому, відповідно до рівнянь (1) і (5), значний вплив на критичний (вихідний) розмір краплі чинить частота коливань, що прикладається до розплаву. З підвищенням частоти знижується розмір частинок.

В ході досліджень авторами роботи [4] встановлено, що використання ультразвукових коливань, накладених на зварювальний дріт, сприяє підвищенню теплопровідності частинок у плазмовій дузі при збільшенні коефіцієнта термічної дифузії та збільшення тиску, що створює дуга. Останнє було математично змодельовано та експериментально підтверджено авторами робіт [5, 6]. Запропонована математична модель (6) враховує вплив на тиск дуги наступних змінних: параметрів дуги, геометричних параметрів сопла, щільності технологічного газу та швидкості плазмового потоку, а також величини звукового тиску. Виходячи з встановлених закономірностей, амплітуда коливання торця дроту вносить значний вклад в тиск дуги, збільшуючи його на 15...31 %:

$$P(x, y, z) = \frac{\eta_v 3r_{\text{сопл}}^2 \rho_{\text{Аг}} Q_{\text{плаз}}}{A_1 S_{\text{сопл}}} \times \sqrt{\frac{P_{\text{кол}}^2}{\rho_{\text{Аг}}^2 c^2} + \frac{2\eta_v IU}{\rho_{\text{Аг}} Q_{\text{плаз}}} + \frac{Q_{\text{плаз}}^2}{S_{\text{сопл}}^2} \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 r_p^2}} \times \exp\left(-3 \frac{x^2 + y^2}{r_p^2}\right) \quad (6)$$

Колективи авторів у роботах [13, 14] провели дослідження, що узгоджуються з теорією та підтверджуються високошвидкісною відеозйомкою. Встановлено, що коливання дроту з частотою від 1 кГц і вище сприяють більш ранньому відриву краплі, а

при частоті 20 кГц досягається найефективніший режим зриву нової краплі при кожному коливанні.

Математичне моделювання, що було проведено в роботі [10], пропонує описання величини сили ультразвуку F_U , що діє на краплю розплаву (7) як таку, що залежить від густини газового середовища ρ , в якому розповсюджуються коливання, амплітуди коливань A , кількості хвиль k , радіусу частинки R та коефіцієнта λ , що враховує співвідношення між густиною середовища до густини краплі розплаву:

$$F_U = \frac{1}{3} \pi \rho A^2 (kR)^3 \sin(2k) \frac{5 - 2\lambda}{2 + \lambda}. \quad (7)$$

Відповідно до наших припущень та наведених вище результатів досліджень, досвід введення ультразвукових коливань у розплав може бути перенесений на процес плазмового розпилення компактних матеріалів. Так, накладання ультразвукових коливань при плазмово-дуговому розпиленні має перспективність підвищення інтенсифікації процесу диспергування та збільшення виходу фракції –63 мкм до 80...90 %. Причому, найбільш перспективним варто розглядати процес розпилення плазмовою дугою прутків і дротів з прикладанням до них ультразвукових коливань, що розповсюджуються по матеріалу дротів та прутків, як по хвилеводу, до торця з швидкістю, що значно перевищує швидкість розповсюдження в газовому середовищі.

Висновки

1. Обґрунтовано підхід удосконалення процесу розпилення розплавів шляхом введення ультразвукових коливань, що при розповсюдженні через розпилюваний матеріал або газове середовище, який дозволяє знизити поверхневий натяг плівки розплаву, інтенсифікувати масоперенос, подрібнення крапель і покращення однорідності розпилення. Основним механізмом такого впливу є виникнення у краплях розплаву капілярних хвиль і кавітації під час розповсюдження в них високочастотних коливань, що, в свою чергу, чинить додатковий тиск на краплю розплаву та знижує необхідне зусилля для зриву краплі. Все це суттєво покращує технологічні характеристики отриманих порошків, зокрема сприяє зменшенню розмірів часток і підвищенню параметра сферичності.

2. Проведений аналіз ефективності використання ультразвуку при плазмово-дуговому розпиленні дрових і пруткових матеріалів підтвердив перспективність введення ультразвукових коливань не в газове середовище або плазмову дугу, що є малоєфективним через невисоку швидкість розповсюдження акустичних коливань у газах, а саме

до розпилюваної заготовки у вигляді дротів або прутків, що сприяє більш частому зриву крапель розплаву з торця, що оплавляється, при зменшенні розміру вихідних крапель. Відповідно до наших припущень, накладання ультразвукових коливань на дроти та прутки при розпиленні плазмовою дугою підвищить вихід дрібнодисперсних сферичних частинок класу –63 мкм з 40...50 до 80...90 %.

Список літератури/References

- Shoh, A. (1975) Industrial applications of ultrasound — A review I. High-power ultrasound. *IEEE Transact. on Sonics and Ultrasonics*, 22(2), 60–70. DOI: <https://doi.org/10.1109/t-su.1975.30780>
- Škamat, J., Valiulis, A.V. (2010) About the possibility of using ultrasound in thermal spray technologies. *Mokslas-Lietuvos Ateitis*, 2(4), 39–41. DOI: <https://doi.org/10.3846/mla.2010.066>
- Kumar, S., Wu, C.S., Padhy, G.K., Ding, W. (2017) Application of ultrasonic vibrations in welding and metal processing: A status review. *J. of Manufacturing Proc.*, 26, 295–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.027>
- Li, Y., Wu, C., Chen, M. (2020) Effects of ultrasonic vibration on the transport coefficients in plasma arc welding. *Metals*, 10(3), 312. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10030312>
- Wu, C.S., Zhao, C.Y., Zhang, C., Li, Y.F. (2017) Ultrasonic vibration assisted keyholing plasma arc welding. *Welding J.*, 96, 279–287
- Qiao, J., Wu, C.-S., Li, Y. (2020) Numerical and experimental investigation of keyholing process in ultrasonic vibration assisted plasma arc welding. *J. of Manufacturing Proc.*, 50, 603–613. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.019>
- Fan, C.L., Yang, C.L., Lin, S.B., Fan, Y.Y. (2013) Arc characteristics of ultrasonic wave-assisted GMAW. *Welding J.*, 92(12), 375–380.
- Fan, C., Zhou, L., Liu, Z. et al. (2018) Arc character and droplet transfer of pulsed ultrasonic wave-assisted GMAW. *Inter. J. Ad. Manuf. Technol.*, 95, 2219–2226. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1414-7>
- Weifeng, X., Fan, C.L., Yang, C.L., Lin (2016) Pulsed ultrasonic wave assisted GMAW of 7 A 52 aluminum alloy. *Welding J.*, 95, 239–247.
- Luo, J., He, Z., Liu, Z. et al. (2024) The influence of coaxial ultrasound on the droplet transfer of high nitrogen steel GMAW process. *Materials*, (17), 5509, 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17225509>
- Fan, Y.Y., Yang, C.L., Sanbao, L. et al. (2012) Ultrasonic wave assisted GMAW: A novel method adds ultrasonic wave to provide an additional force to detach the droplet. *Welding J.*, 91, 91–99.
- Zheng, H., Qi, B., Yang, M. (2021) Dynamic analysis of the ultrasonic-frequency pulsed GMAW metal transfer process. *J. of Manufacturing Proc.*, 62, 283–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.12.049>
- Kaiyuan, W., Jing, L., Haoran, Y. et al. (2024) Influence of high-frequency pulse on droplet transfer process and weld formation in double-wire median pulsed GMAW of aluminum alloy. *Research Square*. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4308754/v1>. <https://www.researchsquare.com/article/rs-4308754/v1>
- Ghosh Prakriti K., Lutz Dorn M.C. Hübner, Vinay K. Goyal (2007) Arc characteristics and behaviour of metal transfer in pulsed current GMA welding of aluminium alloy. *J. of Materials Proc. Technology*, 194, 163–175.

15. Shanthar, R., Chen, K., Abeykoon, C. (2023) Powder-based additive manufacturing: A critical review of materials, methods, opportunities, and challenges. *Advanced Eng. Materials*, (25), 2300375, 43. DOI: <https://doi.org/10.1002/adem.202300375>
16. Fatemeh, A.T., Zobaideh, H., Kahrizsangi, S. et al. (2024) Spreadability of powders for additive manufacturing: A critical review of metrics and characterisation methods. *Particology*, 93, 211–234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2024.06.013>
17. Barreras, F., Amaveda, H., Lozano, A. (2002) Transient high-frequency ultrasonic water atomization. *Experiments in Fluids*, 33, 405–413. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-002-0456-1>
18. Lozano, A., García, J., Alconchel, J. et al. (2017) Influence of liquid properties on ultrasonic atomization. In: *Proc. of 28th European Conf. on Liquid Atomization and Spray Systems (ILASS2017)*. DOI: <https://doi.org/10.4995/ILASS2017.2017.4588>
19. Rajan, R., Pandit, A.B. (2001) Correlations to predict droplet size in ultrasonic atomisation. *Ultrasonics*, 39(4), 235–255. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0041-624x\(01\)00054-3](https://doi.org/10.1016/s0041-624x(01)00054-3)
20. Camacho-Lie, M., Antonio-Gutiérrez, O., López-Díaz, A.S. et al. (2023) Factors influencing droplet size in pneumatic and ultrasonic atomization and its application in food processing. *Discover Food*, 3(23). DOI: <https://doi.org/10.1007/s44187-023-00065-5>
21. Dobre, M., Bolle, L. (2002) Practical design of ultrasonic spray devices: Experimental testing of several atomizer geometries. *Experimental Thermal and Fluid Sci.*, 26, 205–211. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(02\)00128-0](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(02)00128-0)
22. Patil, M.N., Pandit, A.B., Thorat, B.N. (2007) Ultrasonic atomisation assisted spray drying. In: *Proc. of the 5th Asia-Pacific Drying Conf.*, 255–261. DOI: https://doi.org/10.1142/9789812771957_0036
23. Khaire, R., Gogate, P. (2020) Novel approaches based on ultrasound for spray drying of food and bioactive compounds. *Drying Technology*, 39(12), 1832–1853. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.180492639>
24. Marie, A., Tourbin, M., Robisson, A.C. et al. (2021) Wet size measurements for the evaluation of the deagglomeration behaviour of spray-dried alumina powders in suspension. *Ceramics Inter.*, 48(6), 7926–7936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.11.340>
25. Nandiyanto, A., Okuyama, K. (2011) Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to submicrometer size ranges. *Advanced Powder Technology*, 22 (1), 1–19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2010.09.011>
26. Zhou, K., Han, C. (2023) Metal powder-based additive manufacturing. 319. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527822249>
27. Chen, G., Zhao, S., 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>
28. Rai, G., Lavernia, E., Grant, N. J. (1985) Powder size and distribution in ultrasonic gas atomization. *JOM*, 37(8), 22–26. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf03257674>
29. Baram, J. (1988) Pressure characteristics at the pour-tube orifice in ultrasonic gas atomization. *Materials Sci. and Eng.*, 98, 65–69. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(88\)90128-0](https://doi.org/10.1016/0025-5416(88)90128-0)
30. Anand, V., Kaufman, A.J., Grant, N. (1978) Rapid solidification of a modified 7075 aluminum alloy by ultrasonic gas atomization. *Rapid Solidification Processing, Principles and Technologies, II*, Claitor, Baton Rouge, LA, 273–286.
31. Orlov, Y., Mamedov, B. (1983) Ultrasonic atomization of liquid metals. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 22(4), 254–255. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf00795594>
32. Żrodowski, Ł., Wróblewski, R., Choma, T. et al. (2021) Novel cold crucible ultrasonic atomization powder production method for 3D printing. *Materials*, 14(10), 2541, 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14102541>
33. Halapi, D., Varga, L. (2023) Ultrasonic powder atomization for additive manufacturing. *Inter. J. of Eng. and Management Sci.*, 8(2), 69–75. DOI: <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2023.2.8>
34. Bałasz, B., Bielecki, M., Gulbiński, W., Słoboda, Ł. (2023) Comparison of ultrasonic and other atomization methods in metal powder production. *J. of Achievements in Materials and Manufacturing Eng.*, 116(1), 11–24. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.3393>
35. Priyadarshi, A., Shahrani, S., Choma T. et al. (2024). New insights into the mechanism of ultrasonic atomization for the production of metal powders in additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 83(1), 104033, 20. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104033>
36. Bauckhage, K., Andersen, O., Hansmann, S. et al. (1996) Production of fine powders by ultrasonic standing wave atomization. *Powder Technology*, 86(1), 77–86. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)03040-9](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)03040-9)
37. Andersen, O., Hansmann, S., Bauckhage, K. (1996) Production of fine particles from melts of metals or highly viscous fluids by ultrasonic standing wave atomization. *Particle & Particle Systems Characterization*, 13(3), 217–223. DOI: <https://doi.org/10.1002/ppsc.19960130308>
38. Irisarri, J., Ezcurdia, I., Iriarte, N. et al. (2025) Electric plasma guided with ultrasonic fields. *Sci. Advances*, 11(6): eadp0686. 6. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adp0686>
39. Korzhyk, V.M., Strogonov, D.V., Burlachenko, O.M. et al. (2024) Development of hybrid technology of producing spherical powders from wire materials using high-speed plasma jets and electric arc. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 3, 36–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2024.03.05>
40. Chen, D., Daoud, H., Scherm, F. et al. (2020) Stainless steel powder produced by a novel arc spray process. *J. of Materials Research and Technology*, 9, 8314–8322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.076>
41. Dietrich, S., Zaeh, M.F. (2019) Arc-based powder production of AlSi7Mg0.6. *Procedia Manufacturing*, 40, 27–31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.006>
42. 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. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.03.05>
43. Dion, C., Carabin, P., Kreklewitz, W. (2021) *Plasma apparatus for the production of high quality spherical powders at high capacity*. European Pat. EP3302855B1. <https://pyrogenesisadditive.com/#plasmaAtomization>
45. Korzhyk, V.M., Strohonov, D.V., Burlachenko, O.M. et al. (2023) Development of plasma-arc technologies of spherical granule production for additive manufacturing and granule metallurgy. *The Paton Welding J.*, 12, 3–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.12.01>

PROSPECTS OF ULTRASOUND APPLICATION IN THE PRODUCTION OF DISPERSED GRANULES BY GAS AND PLASMA-ARC ATOMIZATION OF METAL MELTS AND COMPACT MATERIALS (Review)

V.M. Korzhyk, O.S. Tereshchenko, D.V. Strohonov, O.I. Demianov, O.V. Ganushchak
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

The technological features of using the ultrasonic vibrations for atomization of micro-volumes of metal melts in the following technologies of dispersed spherical powder production are considered: gas atomization, ultrasonic atomization on sonotrode, plasma arc atomization by means of ultrasonic standing wave, electric arc atomization with the application of ultrasound to the atomized wire, and plasma arc atomization with the application of ultrasonic vibrations to the atomized feedstock. The influence of ultrasonic vibrations on the process of melt droplet formation and detachment for the aforementioned methods is analyzed. It is established that the application of ultrasound promotes a reduction in the size of initial melt droplets, intensifies dispersion due to the creation of additional pressure on the melt droplets, and, as a result, contributes to the narrowing of the particle size distribution. It was found that among the analyzed approaches for obtaining spherical powders using high-frequency acoustic vibrations, the most promising is the technology of plasma arc atomization of wires and rods under the condition of applying ultrasound directly to the feedstock. An analysis of the efficiency and prospects of using plasma-arc atomization technologies with introduction of ultrasonic vibrations into the atomized feedstock is conducted, and it is assumed that this approach will allow increasing the yield of ~63 μm fraction powders up to 80..90 %, which is promising for application in the production of powders for additive manufacturing technologies. 45 Ref., 6 Fig.

Keywords: ultrasonic atomization, dispersion, plasma-arc atomization, gas atomization, spherical powders, particle size distribution

Отримано 23.04.2025

Отримано у переглянутому вигляді 28.04.2025

Прийнято 22.07.2025

ПЕРЕДПЛАТА 2026

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 3041-234X (Online). ISSN 3041-2374 (Print). Передплатний індекс 70031	–	–	1260	2520
«Сучасна електрометалургія», видається з 1975 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2331 (Online). ISSN 3041-238 (Print). Передплатний індекс 70693	–	420	840	1680
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 3041-2358 (Online). ISSN 3041-2366 (Print). Передплатний індекс 74475	–	420	840	1680
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 3041-2293 (Online). ISSN 0957-798X (Print). Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогам передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>

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

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>

<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2026 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2024 рр.