

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОЇ СФЕРОДИЗАЦІЇ СТРУМОПРОВІДНОГО ДРОТУ ІЗ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ НА ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД ОТРИМАНИХ ПОРОШКІВ

Д.В. Строгонов², В.М. Коржик^{1,2}, Цзянлун І¹, А.Ю. Тунік², О.М. Бурлаченко², А.О. Альошин³

¹China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology. 510650, Guangzhou, China. E-mail: patonjournal@gwi.gd.cn

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Експериментально підтверджена можливість отримання сферичних порошків шляхом застосування технології плазово-дугового розпилення струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі діаметром 1,6 мм. Встановлено, що при різних параметрах плазово-дугового розпилення в загальному випадку основною фракцією порошку є фракція 25...250 мкм, яка складає 95 % від загального об'єму порошку, кількість частинок фракції < 25 та 250...315 мкм при оптимальних режимах розпилення знаходиться на досить низькому рівні і не перевищує 5 %. Вибрано режим плазово-дугового розпилювання, який буде забезпечувати зміну гранулометричного складу у бік збільшення вмісту дрібних фракцій (< 80 мкм), на які є значний попит в області адитивних технологій 3D друку: струм — 280 А; швидкість подачі дроту — 12,0 м/хв; довжина дугового проміжку — 8 мм; витрата плазموутворюючого газу — 50 л/хв; витрата супутнього газу — 60 м³/год; зазор між плазموутворюючим та обтискаючим соплом — 1 мм; глибина занурення катоду — 1 мм. Досліджено форму та структуру розпилюваних частинок, більшість яких загалом має правильну сферичну форму, при цьому коефіцієнт сферичності залежить від параметрів процесу та при оптимальних режимах розпилення складає в середньому 0,7...0,9. В загальній масі отриманих сферичних порошків доля сателітів та поодиноких частинок неправильної форми складає біля 1...3 %. Бібліогр. 27, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: струмопровідний дріт; плазово-дугове розпилення; диспергування розплаву; сферодизація порошку; твердіння; сферичний порошок; параметри режиму; гранулометричний склад

Вступ. Інтенсивний розвиток порошкової металургії, адитивних технологій 3D друку металевих виробів (селективне та пряме лазерне плавлення і спікання (SLM, SLS, DMLS, гранульна металурія тощо) вимагає створення нових матеріалів у вигляді сферичних гранул і порошків із складнолегованих сплавів, тугоплавких металів та інтерметалідів з заданим гранулометричним складом і суворими вимогами до форми частинок (коефіцієнту сферичності) та наявності мінімальної кількості дефектних частинок [1].

Найбільш поширеними способами отримання таких гранул і порошків є технології газового розпилення розплаву (GA) та відцентрового плазового розпилення (PREP) [2, 3]. Проте попри наявності великої кількості переваг ці технології мають ряд недоліків, до яких слід віднести: складність отримання порошків < 100 мкм; проблеми, пов'язані з виготовленням пруткової заготовки для PREP; закриті аргонні пори та відносно низький коефіцієнт сферичності для GA та ін. [4, 5].

Сьогодні перспективним способом отримання сферичних порошків з заданим гранулометрич-

ним складом розглядається технологія плазово-дугового розпилення, яка викликає широкий практичний інтерес [6–9]. До переваг цього способу слід віднести простоту обладнання, що значно спрощує процес отримання порошку, та наявність великої кількості параметрів, завдяки яким можна регулювати гранулометричний склад у широких межах, а також можливість отримання сферичних порошків із тугоплавких матеріалів [10–12].

На сьогоднішній день проведено недостатню кількість досліджень по впливу параметрів режиму плазово-дугового розпилення на характер розподілу розпилюваних частинок по фракціям, результати досліджень носять розрізнений характер, відсутня інформація по впливу деяких конструктивних параметрів плазмотронів на зміну гранулометричного складу розпилюваних частинок. Тому метою роботи є дослідження впливу параметрів режиму плазово-дугового розпилення на процес диспергування розплаву та зміну гранулометричного складу порошку.

Методика проведення експериментів та технологічне обладнання. Сутність процесу плаз-

Д.В. Строгонов — <http://orcid.org/0000-0003-4194-764X>, В.М. Коржик — <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>,

Цзянлун І — <https://orcid.org/0000-0002-2018-713>, А.Ю. Тунік — <https://orcid.org/0000-0001-6801-6461>,

О.М. Бурлаченко — <https://orcid.org/0000-0003-2277-4202>, А.О. Альошин — <http://orcid.org/000-001-9696-6800>

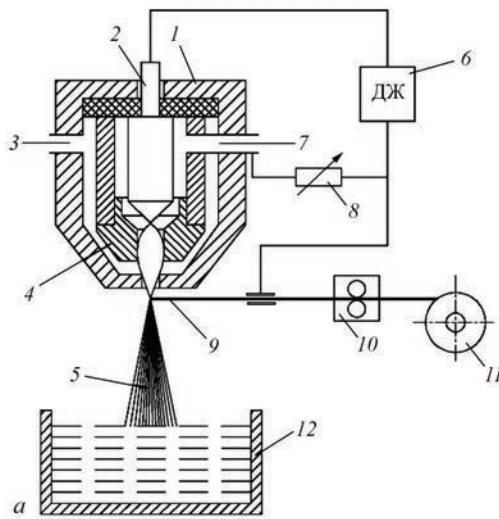


Рис. 1. Схема процесу плазмово-дугового розпилення і сферодизації струмопровідного дроту (а) та зовнішній вигляд процесу розпилення (б): 1 — робоча камера плазмотрона; 2 — стрижневий електрод (катод); 3 — канал подачі супутнього газу; 4 — плазмоутворююче сопло; 5 — струмінь розпилюваних частинок; 6 —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

мово-дугового розпилення полягає у плавленні струмопровідного дроту (анода), який вводиться у зону високошвидкісного плазмового струменя та подальшому дробленні розплаву, що зривається з торця дроту [13]. Дуга горить між неплавким вольфрамовим катодом і струмопровідним дротом (анодом), що подається за зрізом сопла плазмотрона. Робочий (плазмоутворюючий) газ, що поступає у робочу камеру нагрівається електричною дугою і витікає із сопла у вигляді плазмового струменя. Відкрита ділянка розряду поза плазмоутворюючим соплом обдувається потоком газу, що витікає з кільцевого зазору між соплами плазмотрона [14]. До особливостей даного способу слід віднести те, що плавлення та струменеве розпилення матеріалу дроту здійснює аргонова плазма, в той час як дроблення розплаву і розгін дисперсних частинок здійснює струмінь холодного супутнього газу. Це забезпечує мінімальні втрати на випаровування матеріалу дроту (до 2%), отримання оптимального фракційного складу дисперсної фази, досягнення частинками напилюваного матеріалу навколосвочної швидкості та ін. [15]. Технологічні експерименти проводили із використанням установки плазмово-дугового напилювання «PLAZER-30» [16], яка була модифікована для реалізації процесу розпилення і сферодизації сталевих дротів та отримання порошків (рис. 1).

Із застосуванням зазначеного технологічного обладнання проводили дослідження гранулометричного складу частинок при розпилюванні дроту (анода) з низьковуглецевої сталі марки ER70S-6 (Св-08Г2С) діаметром 1,6 мм (табл. 1).

Згідно раніше отриманих практичних даних, за критерієм візуальної оцінки форми плазмового струменя, при досягненні його мінімального кута розкриття та стабільності процесу було підібрано оптимальний режим та відповідно нього проводили зміни параметрів режиму для з'ясування впливу кожного з них на зміну фракційного складу частинок. Плазмоутворюючим газом служив аргон вищого сорту II згідно ISO 14175–2008 «Welding consumables — Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes», у якості супутнього газу використовували повітря, діаметр сопла складав 3 мм.

Вплив змінних параметрів розпилення досліджували в наступних межах: струм — 220...265 А, витрата плазмоутворюючого газу — 30...70 л/хв, витрата супутнього потоку — 30...60 м³/год, швидкість подачі дроту — 9,5...12,5 м/хв, відстань катод-анод — 8...12 мм, зазор між соплом та кільцевим електродом — 1...3 мм, глибина занурення катода — 0...1 мм (табл. 2).

Також було розглянуто такі конструктивні параметри плазмотрона, як зазор між внутрішнім та зовнішнім соплом 1...3 мм, через який проходить

Таблиця 1. Хімічний склад дроту діаметром 1,6 мм марки ER70S-6 (Св-08Г2С), мас. %

Сталь	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
Св-08Г2С ДСТУ 2246–70	0,05...0,11	0,70...0,95	1,80...2,10	0,03	0,025	< 0,20	< 0,25	Основа

Таблиця 2. Режими експерименту з плазово-дугового розпилення дроту зі сталі Св-08Г2С діаметром 1,6 мм

Номер режиму	Струм, А	Напруга дуги, В	Витрата		Відстань катод-анод, мм	Довжина заглиблення катоду, мм	Відстань між соплами, мм	Швидкість подачі дроту, м/хв
			аргону, л/хв	повітря, м ³ /год				
1	220	75	40	48	8	0,5	2	10,5
2	235	76	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—
3	250	80	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—
4	235	72	30	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—
5	—»—	76	40	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—
6	—»—	78	50	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—
7	—»—	69	40	36	—»—	—»—	—»—	—»—
8	—»—	76	—»—	48	—»—	—»—	—»—	—»—
9	—»—	79	—»—	60	—»—	—»—	—»—	—»—
10	—»—	76	—»—	48	8	—»—	—»—	—»—
11	—»—	82	—»—	—»—	10	—»—	—»—	—»—
12	—»—	93	—»—	—»—	12	—»—	—»—	—»—
13	—»—	72	—»—	—»—	8	0	—»—	—»—
14	—»—	76	—»—	—»—	—»—	0,5	—»—	—»—
15	—»—	77	—»—	—»—	—»—	1,0	—»—	—»—
16	—»—	84	—»—	—»—	—»—	0,5	—»—	—»—
17	—»—	76	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—
18	—»—	69	—»—	—»—	—»—	—»—	3	—»—
19	—»—	76	—»—	—»—	—»—	—»—	2	9,5
20	—»—	76	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—	10,5
21	—»—	76	—»—	—»—	—»—	—»—	—»—	11,5

супутній газ, що обтискає плазовий струмінь, та глибина занурення катода 0...1 мм (рис. 2).

Дріт розпилювали у посудину, наповнену водою, з дистанції 500 мм, час розпилення складав 200 с. Відбір проб для дослідження гранулометричного складу порошку, морфології поверхні та ін. виконували з використанням лабораторного віброгрохота «Analissette 3 Spartan» (Німеччина) з комплектом сит 25...500 мкм, маса проби становила не менше 100 г порошку. Гранулометричний склад лабораторних партій порошку проводили методом ситового аналізу згідно методики ISO 2591-1:1988 «Test sieving – Part 1: Methods using test sieves of woven wire cloth and perforated metal plate» за допомогою віброгрохота «Analissette 3 Spartan» з набором сит: 25...40, 40...63, 63...80, 80...100, 100...125, 125...160, 160...200, 200...250,

250...315, 315...400, 400...450, 450...500 мкм [17]. Величину тиску плазового струменя вимірювали на відстані 100 мм від зрізу сопла до підкладки за допомогою електронної ваги марки RADWAG PS 1000/R2 за методикою [18]. Дослідження форми частинок, їх мікроструктури проводили за допомогою методів оптичної (мікроскопи «UNITRON Versamet-2» і «Neophot-21») та аналітичної растрової електронної (мікроскоп «PHILIPS SEM-515») мікроскопії. Опис форми частинок виконували за методикою зі стандарту ISO 9276-6:2008 «Representation of results of particle size analysis — Part 6: Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology» [19].

Результати експериментів та їх аналіз. Дослідна перевірка розмірів диспергованих частинок показала, що при розпиленні струмоведучого

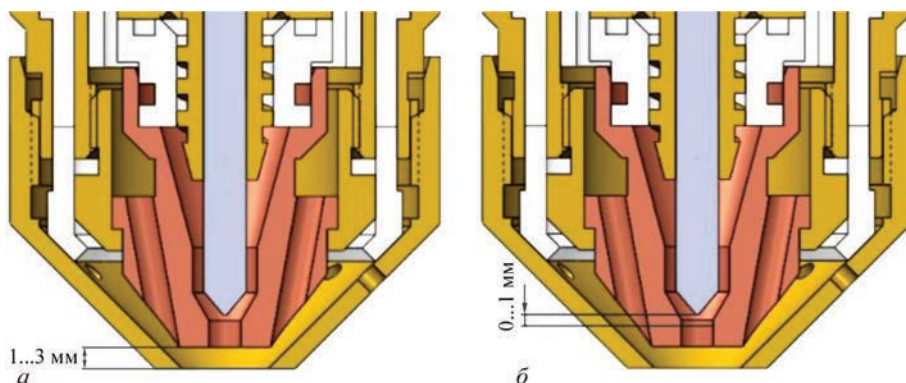


Рис. 2. Досліджувані конструктивні параметри плазмотрона: а — зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплами; б — відстань при зануренні катода відносно сопла

компактного дроту ER70S-6 основною фракцією є фракція 25...250 мкм, яка складає 95 % від загальної маси порошку, кількість частинок фракції < 25 мкм та 250...315 мкм при оптимальних режимах розпилення знаходиться на досить низькому рівні і не перевищує 5 %.

Були побудовані криві розподілу гранулометричного складу частинок в залежності від режиму розпилення (рис. 3). Для зручності опису цих показників було розраховано середній розмір діаметру частинок ($D_{\text{ср}}$).

Аналізуючи отримані дані, було встановлено, що збільшення струму від 235 до 250 А призводить до збільшення середнього розміру частинок

на 7 % з 138 до 147 мкм відповідно, а при струмі 220 А на 24 % з 138 до 171 мкм (рис. 3, а). При цьому в обох випадках доля частинок із розмірами менше 80 мкм зменшується в інтервалі значень від 39 до 30 % від загальної маси порошку ($V_{\text{заг.п}}$).

При візуальній оцінці процесу розпилення можна було побачити, що плавлення дроту відбувається переважно в периферійній частині плазмового струменя.

Цей самий ефект проявляється при збільшенні швидкості подачі дроту з 10,5 до 11,5 м/хв, що призводить до збільшення середнього розміру частинок на 33 % з 138 до 184 мкм відповідно, а при швидкості подачі дроту 9,5 м/хв на 9 % з 138

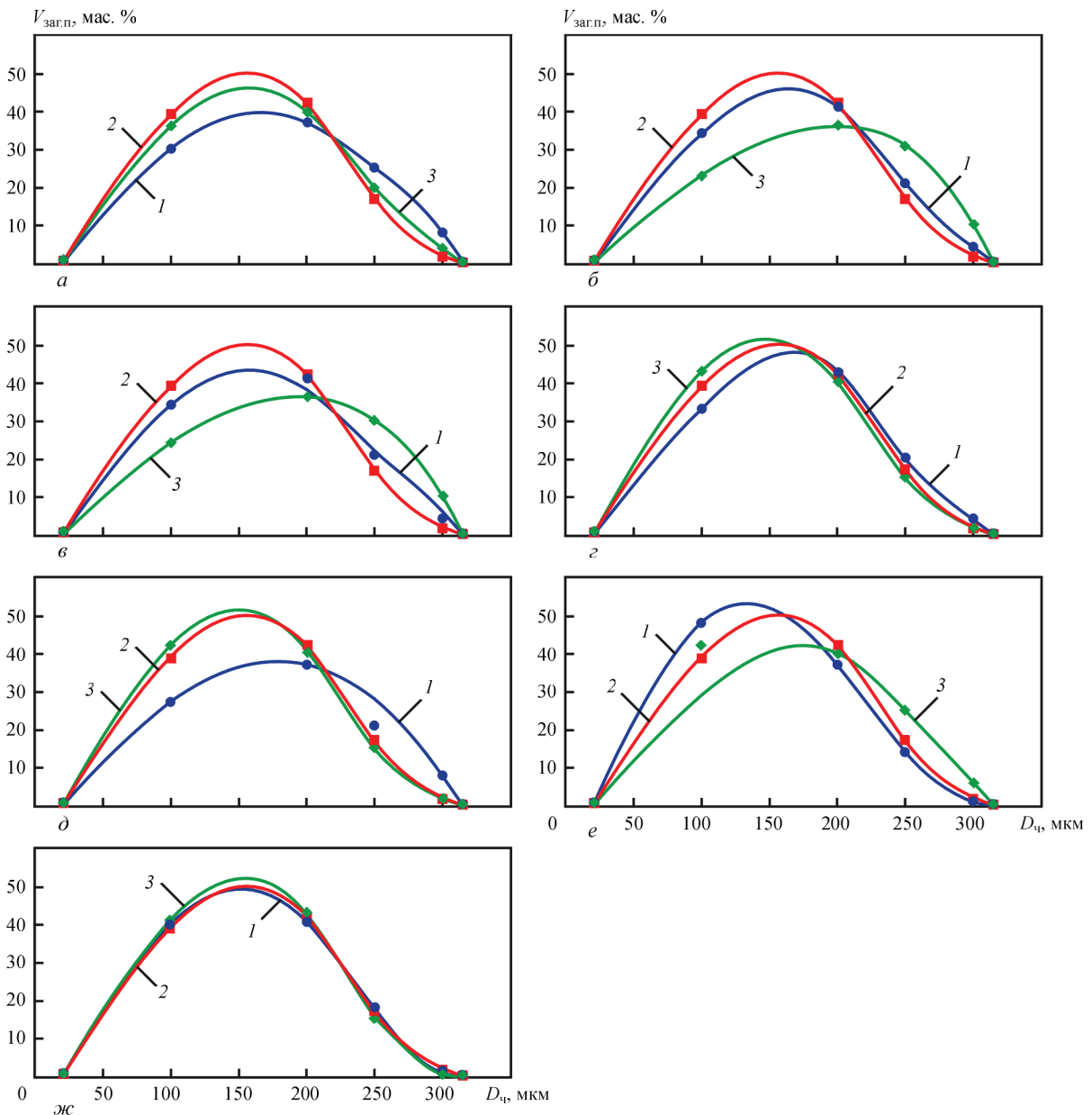


Рис. 3. Залежність гранулометричного складу порошку від показників струму (а), А: 1 — 220; 2 — 235; 3 — 250; швидкості подачі дроту (б), м/хв: 1 — 9,5; 2 — 10,5; 3 — 11,5; довжини дугового проміжку (в), мм: 1 — 8; 2 — 10; 3 — 12; витрати плазموутворюючого газу (г), л/хв: 1 — 30; 2 — 40; 3 — 50; витрати супутнього газу (д), м³/год: 1 — 36; 2 — 48; 3 — 60; довжини проміжку між плазموутворюючим та обтискаючим соплами (е), мм: 1 — 1; 2 — 2; 3 — 3; глибини занурення катода (ж), мм: 1 — 0; 2 — 0,5; 3 — 1,0

до 151 мкм (рис. 3, б). При цьому в обох випадках доля частинок із розмірами менше 80 мкм зменшується в інтервалі значень від 39 до 23 % від загальної маси порошку.

Автори робіт [20, 21] пояснюють зміну гранулометричного складу порошку у бік більш крупної фракції тим, що внаслідок зміни показників струму від певного оптимального значення плавлення дроту відбувається, переважно, в периферійній зоні струменя, де його газодинамічний натиск і ступінь концентрації енергії значно нижче ніж по осі. Це створює передумови для крапельного переносу металу.

Для дослідження цього явища було виконано розпилення при збільшенні струму до 265 А та швидкості подачі дроту до 12,5 м/хв. Цей режим забезпечує розташування торця розпилюваного дроту по осі плазмового струменя, внаслідок чого відбувається зміна гранулометричного складу частинок у бік меншої фракції, середній розмір порошку зменшується на 13 % з 138 до 120 мкм. При цьому доля частинок із розмірами менше 80 мкм збільшується від 39 до 44 % від загальної маси порошку.

Це пояснюється тим, що підвищення ефективної теплової потужності плазмового струменя сприяє зміні характеру перенесення матеріалу електрода від крапельного до струменевого (за рахунок зменшення сили поверхневого натягу при підвищенні температури перегріву рідкого металу), що значно підвищує вихід дрібної фракції порошку [22, 23].

Збільшення відстані катод–анод з 8 до 10 мм призводить до того, що середній розмір частинок збільшується на 11 % до 153 мкм попри ріст напруги з 76 до 82 В (рис. 3, б). При збільшенні відстані до 12 мм відбувається подальший ріст напруги з 82 до 100 В, що призводить до збільшення потужності, яка вкладається у дріт, з 19 до 24 кВт, тобто на 22 %, проте фракційний склад частинок зсувається в сторону більш крупних фракцій, при цьому середній розмір частинок збільшується на 34 % з 138 до 185 мкм. При збільшенні довжини дугового проміжку від 8 до 12 мм доля частинок із розмірами менше 80 мкм зменшується в інтервалі значень з 39 до 24 % від загальної маси порошку.

Це викликано зменшенням коефіцієнта нагріву анода у зв'язку з зростаючою втратою теплової енергії плазмового струменя на випромінювання і конвекцію на ділянці дугового проміжку та зменшенням швидкості струменя і, як наслідок, зменшенням його динамічного впливу на розпилюваний матеріал при збільшенні відстані від сопла плазмотрона [24, 25].

Витрата плазмоутворюючого газу має більш складний вплив на процеси диспергування розплаву матеріалу дроту ніж інші вищеперелічені параметри (рис. 3, з). Так, наприклад, збільшення витрати з 30 до 40 л/хв призводить до росту дисперсності розпилюваних частинок, при цьому середній розмір гранул зменшується на 8 % з 150 до 138 мкм, подальше зміщення фракційного складу частинок у бік більш дрібних фракцій відбувається при підвищенні витрати до 50 л/хв, середній розмір частинок зменшується на 4 % з 138 до 133 мкм. Проте подальший ріст витрати до 70 л/хв призводить до отримання більш крупної фракції, середній розмір частинок при цьому збільшується з 133 до 142 мкм. При збільшенні витрати плазмоутворюючого газу від 30 до 50 л/хв доля частинок із розмірами менше 80 мкм збільшується від 39 до 43 % від загальної маси порошку.

Збільшення витрати газу з 30 до 40 л/хв, а потім до 50 л/хв сприяє зростанню напруги на дузі з 72 до 76 і 80 В відповідно внаслідок її витягування потоком газу, при цьому величина дугового проміжку залишається незмінною. Це призводить до росту теплової потужності і ефективності нагріву дроту, дає змогу збільшити динамічний вплив струменя на торець дроту (табл. 2) і цим самим інтенсифікувати процес зриву крапель з торця дроту.

Проте подальше підвищення витрати газу до 70 л/хв призводить до зсуву фракційного складу частинок у сторону більш крупної фракції, при цьому середній розмір частинок збільшується на 12 % з 138 до 154 мкм. При подальшому збільшенні витрати з 50 до 70 л/хв доля частинок із розмірами менше 80 мкм зменшується з 43 до 36 % від загальної маси порошку.

Це може бути викликано заохолодженням струменя унаслідок великих витрат тепла на нагрів збільшеної кількості плазмоутворюючого газу. Також слід зазначити, що при витраті плазмоутворюючого газу менше 30 л/мін має місце підвищений знос вольфрамового катода.

Збільшення витрати супутнього потоку (повітря) з 36 до 48 м³/год сприяє збільшенню дисперсності розпилюваних частинок, при цьому їх серед-

Таблиця 3. Розрахунок напірного тиску плазмового струменя на дистанції розпилення 100 мм

Номер	Витрата газу, л/хв	Площа плями розпилення, мм ²	Зусилля тиску, г	Напірний тиск (σ), МПа
1	30	176	312	0,0177
2	40	181	356	0,0196
3	50	190	409	0,0215
4	70	212	514	0,0242

ній діаметр порошку зменшується на 21 % з 167 до 138 мкм (рис. 3, д). Подальше збільшення витрати супутнього потоку з 48 до 60 м³/год не викликає суттєвої зміни гранулометричного складу, середній діаметр частинок зменшується на 6 % з 138 до 129 мкм. При збільшенні витрати супутнього потоку від 36 до 60 м³/год доля частинок із розмірами менше 80 мкм збільшується з 32 до 41 % від загальної маси порошку.

Візуальна оцінка процесу розпилення дозволяє побачити, що в загальному випадку підвищення витрати супутнього газу викликає більш інтенсивне стиснення плазмового струменя, що вільно розширюється на виході з сопла, унаслідок чого підвищуються градієнти температур по осі плазмового струменя, протяжність та швидкість його витікання [26]. Проте збільшення витрати супутнього газу можливо до певних умов, що обумовлено конструкцією плазмотрона, а саме внутрішнім перетином системи отворів, через які проходить супутній газ. Також слід зазначити, що при витраті його менше 36 м³/год має місце зменшення в середньому на 30...40 % ресурсу роботи внутрішніх деталей плазмотрона, таких як плазмоутворююче та захисне сопла.

При збільшенні зазору між соплами з 3 до 2 мм відбувається зменшення фракційного складу частинок у більш мілької фракції, середній діаметр частинок зменшується на 18 % з 163 до 138 мкм, а при зазорі 1 мм на 15 % з 138 до 117 мкм (рис. 3, е). При цьому зменшення зазору між соплами з 3 до 1 мм дозволяє значно збільшити долю частинок із розмірами менше 80 мкм з 29 до 48 % від загальної маси порошку.

Зміна зазору з 3 до 2 мм, а потім до 1 мм сприяє зростанню напруги на дузі з 69 до 76 і 84 В відповідно. Це виникає унаслідок зміни кута взаємодії супутнього потоку та аргонової плазми, що призводить до більш інтенсивного локального обтиснення плазмового струменя у місці плавлення та зриву капелі розплаву дроту. Це дозволяє значно підвищити швидкість струменя та інтенсивність диспергування, при цьому значно збільшується дисперсність розпилюваних частинок. Проте, аналізуючи зовнішній вигляд розпилюваних частинок, можна побачити, що при зменшенні зазору з 3 до 1 мм має місце збільшення ступеня турбулізації плазмового струменя, що виявляється у інтенсифікації процесу коагуляції крапель при їх зіткненні між собою.

Збільшення глибини занурення з 0 до 0,5 мм дещо збільшує дисперсність розпилюваних частинок, середній їх розмір при цьому зменшується на 5 % з 145 до 138 мкм (рис. 3, ж). Подальше збільшення цієї величини до 1,0 мм призводить до не-

значного зменшення розмірів частинок у бік більш мілької фракції, зміна середнього розміру складає 2 %, тобто зменшення з 138 до 134 мкм. Але якщо розглядати зміну фракційного складу частинок менше 80 мкм, то збільшення глибини занурення катода в інтервалі значень від 0 до 1,0 мм дозволяє незначно підвищити долю цієї фракції з 39 до 41 % від загальної маси порошку.

Зміна глибини занурення з 0 до 0,5 мм, а потім до 1,0 мм сприяє зростанню напруги на дузі з 72 до 76 і 77 В відповідно внаслідок її витягування і це призводить до невеликого росту теплової потужності. Також слід відзначити, що при цьому положення дроту відносно плазмоутворюючого сопла залишається незмінним, що дає змогу зберегти початковий динамічний вплив струменя на торець дроту. Проте подальше збільшення глибини занурення катода погіршує умови стабілізації дуги у середині робочої камери плазмотрона та створює умови для подвійного дугоутворення.

Таким чином, показана можливість управління розмірами частинок отриманого порошку в певному діапазоні значень гранулометричного складу шляхом зміни основних технологічних параметрів плазово-дугового розпилювання струмопровідного дроту. На прикладі розпилювання струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі ER70S-6 (Св-08Г2С) діаметром 1,6 мм встановлено оптимальний режим, який буде забезпечувати максимальну долю (60...75 %) дрібних фракцій (< 80 мкм), на які є значний попит в області адитивних технологій 3D друку. А саме: струм — 280 А; швидкість подачі дроту — 12,0 м/хв; довжина дугового проміжку — 8 мм; витрата плазмоутворюючого газу — 50 л/хв; витрата супутнього газу — 48 м³/год; зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплами — 1 мм; глибини занурення катода — 1 мм.

В результаті досліджень морфології і мікроструктури частинок отриманого порошку показано, що у всіх досліджених зразках порошку частинки загалом мають правильну сферичну форму, при цьому коефіцієнт сферичності залежить від параметрів процесу та при оптимальних режимах розпилення складає 0,7...0,9. Характерними дефектами в отриманому порошку є сателіти, доля яких для оптимальних режимів розпилення складає в середньому не більше 1...3 %. Також зустрічаються поодинокі частинки неправильної форми та частинки із закритою пористістю.

На рис. 4 приведено порівняльний аналіз зовнішнього вигляду частинок, отриманих при оптимальних та неоптимальних режимах процесу плазово-дугової сферодизації. Можна побачити,

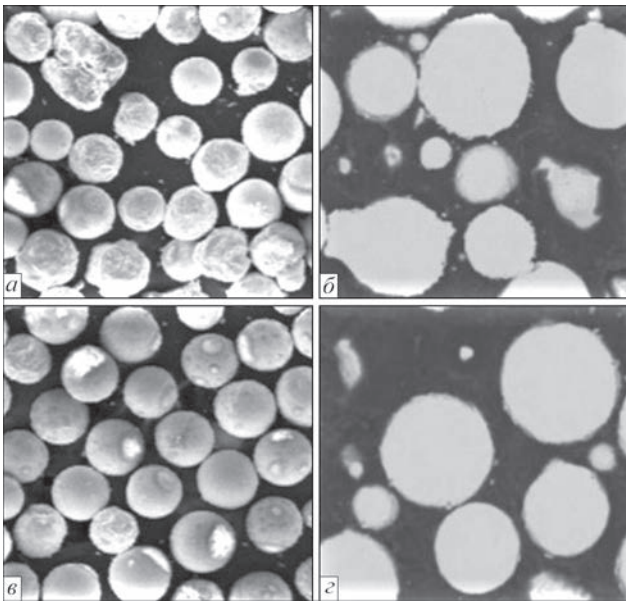


Рис. 4. Морфологія (а, в) та мікроструктура (б, г) порошоків фракції 40...80 мкм, отриманих за технологією плазмово-дугового розпилення компактного дроту ER70S-6 при невідповідних (а, б) та оптимальних (в, г) режимах: $I = 235$ А; $\omega_{\text{пл}} = 9,5$ м/хв; $l = 10$ мм; G_1 (аргон) = 30 л/хв; G_2 (повітря) = 36 м³/год (а, б); $I = 235$ А; $V_{\text{пл}} = 10,5$ м/хв; $l = 8$ мм; G_1 (аргон) = 40 л/хв; G_2 (повітря) = 48 м³/год (в, г)

що при невідповідних режимах має місце більша кількість дефектних частинок, ступінь їх сферичності є дещо меншою (0,65...0,75). Це пояснюється тим, що при оптимальних режимах плавлення та диспергування розплаву з торця дроту відбувалося переважно по осі плазмового струменя, де має місце значно більший газодинамічний натиск і ступінь концентрації енергії, ніж на периферії, що створює передумови для зміни типу переносу електродного металу з крапельного на струменевий, збільшення кількості дрібнодисперсної фракції, збільшення теплоти її перегріву і, як наслідок, більш досконалої сферичної форми частинок [27].

В цьому аспекті потрібно відмітити, що плазмово-дугове розпилювання сталевих дротів здійснювали в повітряній атмосфері. В даному процесі плавлення торця дроту та диспергування розплаву здійснюється в аргоновій плазмі, однак твердіння та формоутворення частинок порошоків відбувається в повітряній атмосфері та у воді, що може бути фактором, який впливає на утворення вказаної долі частинок із закритою пористістю і недосконалої сферичної форми.

Висновки

1. Показана можливість отримання сферичних порошоків шляхом застосування технології плазмово-дугового розпилення струмопровідного дроту із низьковуглецевої сталі діаметром 1,6 мм, в якій нагрів і плавлення електродного матеріалу (ано-

да) здійснювалось в захисній атмосфері аргону, а стиснення і прискорення аргонового плазмового струменя, його захист від перемішування струменя з повітряною атмосферою здійснювалось супутнім високошвидкісним потоком повітря, що подається крізь кільцевий зазор між плазмоутворюючим і захисним соплами плазмотрона. Подальший рух розпиленних частинок та їх твердіння здійснювалось в повітряній атмосфері та у воді.

2. З'ясовано, що в загальному випадку при плазмово-дуговій сферодизації струмопровідного дроту з низьковуглецевої сталі основною фракцією є фракція 25...250 мкм, яка складає 95 % від загальної маси порошку, кількість частинок фракції < 25 мкм та 250...315 мкм при оптимальних режимах розпилення знаходиться на досить низькому рівні і не перевищує 5 %.

3. Встановлено, що серед досліджуваних технологічних параметрів найбільший вплив на гранулометричний склад отриманих порошоків мають струм, швидкість подачі дроту, довжина дугового проміжку, витрата супутнього газу та зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплами. Шляхом зміни вказаних параметрів можна керувати гранулометричним складом отриманих порошоків у широкому діапазоні значень, а саме, отримувати фракцію порошоків менше 80 мкм до 48 % від їх загального об'єму, при цьому середній діаметр частинок може змінюватись в інтервалі 117...184 мкм.

4. Вибрано режим плазмово-дугового розпилювання, який буде забезпечувати зміну гранулометричного складу у бік збільшення вмісту дрібних фракцій (< 80 мкм), на які є значний попит в області адитивних технологій 3D друку: струм — 280 А; швидкість подачі дроту — 12,0 м/хв; довжина дугового проміжку — 8 мм; витрата плазмоутворюючого газу — 50 л/хв; витрата супутнього газу — 48 м³/год; зазор між плазмоутворюючим та обтискаючим соплами — 1 мм; глибина занурення катода — 1 мм.

5. Показано, що більшість частинок загалом має правильну сферичну форму, коефіцієнт сферичності порошоків складає у середньому 0,7...0,9. В загальній масі отриманих сферичних порошоків доля сателітів та поодиноких частинок неправильної форми складає біля 1...3 %.

Робота виконувалась при підтримці проектів:

1. GDAS'Project of Science and Technology Development 2021GDASYL-20210302006;

2. Strategic project of the Academy of Sciences of Guangdong Province, (GDAS'Project of Science and Technology Development, 2020GDASYL-20200301001), China;

3. *The National Key Research and Development Program of China — in the framework of the strategy «One Belt — One Road» (grant number 2020YFE0205300).*

Список літератури

- 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. <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>
- Brika S., Letenneur M., Alex-Dion C., Brailovski V. (2020) Influence of particle morphology and size distribution on the powder flowability and laser bed fusion manufacturability of Ti–6Al–4V alloy. *Additive Manufacturing*, **31**, 732–748. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100929>
- Yim S., Bian H., Aoyagi K., Yamanaka K. (2021) Spreading behavior of Ti–48Al–2Cr–2Nb powders in powder bed fusion additive manufacturing process: Experimental and discrete element method study. *Ibid.*, **73**, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102489>
- Nie Y., Tang J., Teng J., Ye X. et al. (2020) Particle defects and related properties of metallic powders produced by plasma rotating electrode process (PREP). *Advanced Powder Technology*, **31**, 2912–2920. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.018>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.013>
- Advanced plasma atomization (APA) process.* <https://www.advancedpowders.com/powders-every-technology>
- Advanced plasma atomization process.* <https://www.ge.com/additive/plasma-atomization-technology>
- Entezarian M., Allaire F., Tsantrizos P. et al. (1996) Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders. *JOM*, **48**, 53–55. <https://doi.org/10.1007/BF03222969>
- Петруничев В.А., Кудинов В.В., Кулагин И.Д. (1965) Получение сфероидизированного металлического порошка распылением проволоки. *Известия АН СССР. Металлы*, **2**, 68–94.
- Струков Н.Н., Шицын Ю.Д., Белинин Д.С. (2011) Регулирование размера частиц порошков при плазменном распылении пруткового материала. *Вестник ПИТУ*, **3**, 117–121.
- Vykovskiy O.G., Lapteva A.N., Mischenko S.P., Pasko N.N. (2015) Heat content and structure of particles in plasma spraying with a current-conducting wire. *Welding Inter.*, **30**(5), 383–388. <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1090168>
- Rusev G.M., Rusev A.G., Ovsyannikov V.V. et al. (2013) Effect of mode parameters of plasma spraying using current-carrying wire on fractional composition of sprayed particles. *The Paton Welding J.*, **1**, 44–46. <https://doi.org/10.15407/trwj2013.01.02>
- Кудинов В.В. (1966) Нагрев токоведущей проволоки сжатой дугой. *Сварочное производство*, **4**, 11–13.
- Коржик В.М., Хаскин В.Ю., Харламов М.Ю. та ін. (2022) Вплив супутнього обтікаючого потоку повітря на структуру і властивості покриття при плазмово-дуговому напилюванні плавким струмопровідним дротом. *Автоматичне зварювання*, **2**, 3–10.
- 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. *Там же*, **6**, 19–24.

- Коржик В.Н., Короб М.Ф. (2012) Механизированная линия PLAZER 30PL-W для плазменно-дугового проволочного напилювання покриттів на крупногабаритні деталі типу «вал». *Сварщик*, **4**, 13–15.
- ISO 2591-1:1988: Test sieving — Pt 1: *Methods using test sieves of woven wire cloth and perforated metal plate.*
- Быковский О.Г., Лаптева А.Н., Фоменко А.В. и др. (2014) Влияние вида материала и технологии распыления на строение плазменной струи и ее давления на подложку. *Сварщик*, **3**, 39–41.
- ISO 9276-6:2008: Representation of results of particle size analysis — Pt 6: *Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology.*
- Сытников Н.Н. (1987) Влияние скорости подачи стальной проволоки на характер распыления металла плазменной струей. *Автоматическая сварка*, **8**, 63–64.
- Карп И.Н., Рудой А.В. (1991) Влияние скорости подачи стальной проволоки на диспергирование металла воздушной струей. *Там же*, **10**, 36–38.
- Кудинов В.В. (1966) Нагрев токоведущей проволоки сжатой дугой. *Сварочное производство*, **4**, 11–13.
- Бобров Г.В., Привезенцев В.И., Умнова Л.В. (1965) Образование частиц при плавлении проволоки в плазменном потоке. *Порошковая металлургия*, **1**, 79–86.
- Краснов А.Н. (1965) Плазменное распыление вольфрама. *Там же*, **3**, 1–5.
- Краснов А.Н. (1965) Плазменное распыление молибдена. *Там же*, **1**, 1–5.
- Gulyaev I.P., Gulyaev P.Yu., Korzhyk V.N. et al. (2015) Experimental investigation of process of plasma-arc wire spraying. *The Paton Welding J.*, **3–4**, 36–41. <https://doi.org/10.15407/trwj2015.03.04>
- Петруничев В.А., Титков В.В. (1977) К механизму плазменного распыления проволоки. *Физика и химия обработки материалов*, **1**, 14–16.

References

- Sun, P., Fang, Z., Zhang, Y. et al. (2017) Review of the methods for the production of spherical Ti and Ti alloy powder. *JOM*, **69**, 1853–1860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>
- Brika, S., Letenneur, M., Alex-Dion, C., Brailovski, V. (2020) Influence of particle morphology and size distribution on the powder flowability and laser bed fusion manufacturability of Ti–6Al–4V alloy. *Additive Manufacturing*, **31**, 732–748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100929>
- Yim, S., Bian, H., Aoyagi, K., Yamanaka, K. (2021) Spreading behavior of Ti–48Al–2Cr–2Nb powders in powder bed fusion additive manufacturing process: Experimental and discrete element method study. *Ibid.*, **73**, 337–353. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102489>
- Nie, Y., Tang, J., Teng, J., Ye, X. et al. (2020) Particle defects and related properties of metallic powders produced by plasma rotating electrode process (PREP). *Advanced Powder Technology*, **31**, 2912–2920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2020.05.018>
- 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>
- Advanced plasma atomization (APA) process.* <https://www.advancedpowders.com/powders-every-technology>
- Advanced plasma atomization process.* <https://www.ge.com/additive/plasma-atomization-technology>

8. Entezarian, M., Allaire, F., Tsantrizos, P. et al. (1996) Plasma atomization: A new process for the production of fine, spherical powders. *JOM*, **48**, 53–55. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03222969>
9. Petrunichev, V.A., Kudinov, V.V., Kulagin, I.D. (1965) Producing of spheroidized metallic powder by wire spraying. *Izvestiya AN SSSR. Metally*, **2**, 68–94 [in Russian].
10. Strukov, N.N., Shitsyn, Yu.D., Belinin, D.S. (2011) Controlling of powder particle size in plasma spraying of bar material. *Vestnik PGU*, **3**, 117–121 [in Russian].
11. Bykovskiy, O.G., Lapteva, A.N., Mischenko, S.P., Pasko, N.N. (2015) Heat content and structure of particles in plasma spraying with a current-conducting wire. *Welding Inter.*, **30(5)**, 383–388. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1090168>
12. Rusev, G.M., Rusev, A.G., Ovsyannikov, V.V. et al. (2013) Effect of mode parameters of plasma spraying using current-carrying wire on fractional composition of sprayed particles. *The Paton Welding J.*, **1**, 44–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2013.01.02>
13. Kudinov, V.V. (1966) Heating of current-conducting wire by constricted arc. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 11–13 [in Russian].
14. Korzhik, V.M., Khaskin, V.Yu., Yao Yuhui et al. (2022) Influence of accompanying compressing air flow on the coating structure and properties in plasma-arc spraying by consumable current-conducting wire. *The Paton Welding J.*, **2**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.02.01>
15. Kharlamov, M.Yu., Krivtsov, 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. *Ibid.*, **6**, 14–18.
16. Korzhik, 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].
17. ISO 2591-1:1988: Test sieving — Pt 1: *Methods using test sieves of woven wire cloth and perforated metal plate*.
18. Bykovsky, O.G., Lapteva, A.N., Fomenko, A.V. et al. (2014) Influence of material kind and technology of spraying on plasma jet structure and its pressure on substrate. *Svarshchik*, **3**, 39–41 [in Russian].
19. ISO 9276-6:2008: Representation of results of particle size analysis — Pt 6: *Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology*.
20. Sytnikov, N.N. (1987) Influence of steel wire feed speed on nature of metal spraying with plasma jet. *Avtomatich. Svarka*, **8**, 63–64 [in Russian].
21. Karp, I.N., Rudoj, A.V. (1991) Influence of steel wire feed speed on dispersion of metal by air jet. *Ibid.*, **10**, 36–38 [in Russian].
22. Kudinov, V.V. (1966) Heating of current-conducting wire by constricted arc. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 11–13 [in Russian].
23. Bobrov, G.V., Privezentsev, V.I., Umnova, L.V. (1965) Formation of particles in melting of wire in plasma jet. *Poroshk. Metallurgiya*, **1**, 79–86 [in Russian].
24. Krasnov, A.N. (1965) Plasma spraying of tungsten. *Ibid.*, **3**, 1–5 [in Russian].
25. Krasnov, A.N. (1965) Plasma spraying of molybdenum. *Ibid.*, **1**, 1–5 [in Russian].
26. Gulyaev, I.P., Gulyaev P.Yu., Korzhik V.N. et al. (2015) Experimental investigation of process of plasma-arc wire spraying. *The Paton Welding J.*, **3–4**, 36–41. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.03.04>
27. Petrunichev, V.A., Titkov, V.V. (1977) To mechanism of wire plasma spraying. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, **1**, 14–16 [in Russian].

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

D.V. Strogonov², V.M. Korzhik^{1,2}, Yi Jianglong², A.Yu. Tunik², O.M. Burlachenko², A.O. Alyoshyn³

¹China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology. 510650, Guangzhou, China. E-mail: patonjournal@gwi.gd.cn

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevykh Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The possibility of producing spherical powders by application of the technology of plasma-arc sputtering of current-conducting wire of 1.6 mm dia. from low-carbon steel was experimentally confirmed. It was found that at different parameters of plasma arc sputtering in the general case the main fraction of the powder is 25...250 μm fraction, which amounts to 95 % of the powder overall volume, quantity of particles of < 25 and 250...315 μm fractions in optimum sputtering modes is at a rather low level and is not more than 5 %. The plasma-arc sputtering mode was selected, which will ensure a change of the granulometric composition towards increase of the content of fine fractions (< 80 μm), which are in great demand in the field of additive 3D printing technologies: current — 280 A; wire feed rate — 12.0 m/min; arc gap length — 8 mm; plasma gas flow rate — 50 l/min; concurrent gas flow rate — 60 m³/h; gap between plasma-forming and compression nozzle — 1 mm; cathode immersion depth — 1 mm. The shape and structure of the atomized particles was studied, most of which generally have a regular spherical shape. Here, the sphericity coefficient depends on process parameters and is equal to 0.7...0.9 on average at optimal sputtering modes. In the total mass of the obtained spherical powders the share of satellites and isolated particles of an irregular shape is close to 1...3 %. Ref. 27, Tabl. 3, Fig. 4.

Key words; current-conducting wire; plasma-arc sputtering; melt dispersion; powder spheroidization; solidification; spherical powder; mode parameters; granulometric composition

Надійшла до редакції 17.06.2022