

УДК 621.762.2

Ю. Ф. Терновий, д-р техн. наук, зав. кафедри,
e-mail: ferrous.metals@ukr.net

А. Г. Пригунова*, д-р техн. наук, зав. відділу,
e-mail: adel_nayka@ukr.net

Н. В. Лічконенко, старший викладач, e-mail: nvlichkon75@ukr.net
Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету
(Запоріжжя, Україна)

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНОЇ НЕСТІЙКОСТІ СТРУМЕНЯ МЕТАЛУ НА ДИСПЕРСНІСТЬ ГРАНУЛ ПРИ РОЗПИЛЕННІ

Для виробництва високоякісних заготовок і виробів, призначених для машинобудування та інших галузей промисловості, використовуються металеві порошки, в тому числі з високолегованих сплавів. Існують різні методи одержання порошкових матеріалів. Провідне місце серед технологій отримання високоякісних порошків металів і сплавів належить способам розпилення розплавів, що, насамперед, зумовлено високою продуктивністю і економічністю цього процесу. Найважливішою характеристикою розпиленого порошку є гранулометричний склад і форма частинок. Відомо, що формування частинок за розмірами і геометрією визначається не тільки фізичними параметрами розплаву (в'язкість, поверхневий натяг, температура) і газу-енергоносія (температура, витрата, швидкість тощо), але й параметрами розпилення. У роботі досліджено технологічні процеси отримання металевих порошків при газовому і відцентровому розпиленні на основі встановлених закономірностей руху струменя слабов'язкого розплаву і залежності гранулометричного складу порошків-гранул від гідродинамічної нестабільності струменя. Наведено формули для розрахунку та теоретичні схеми подачі струменя слабов'язкого розплаву. Показано, що на поверхні струменя рідкого металу виникають поздовжні хвилі нестійкості, але розвиток отримує тільки одна, з максимальною амплітудою. Кіно- і фотозйомкою процесу розпилення сплаву Ni-50%Fe показано, що рух струменя розплаву нестабільний, поступово відбувається його дроблення, а потім розпад на фрагменти різної конфігурації. Проаналізовано емпіричні моделі різних авторів, які враховують велику кількість параметрів розпилення і відмінність їх впливу на розмір одержуваних частинок при газовому та відцентровому розпиленні. Встановлено, що визначальним параметром впливу на розмір гранул в обох випадках є діаметр струменя металу, який розпадається за рахунок нестійкості, $d_{Me} \sim D_C^a$. Результатами експериментальних досліджень процесів розпилення високолегованих сплавів, проведених в умовах дослідного виробництва «УкрНДІспецсталь» і ПрАТ «Дніпроспецсталь», доведено, що газове розпилення обмеженого струменя розплаву дозволяє отримати частинки з мінімальними відмінностями в їх розмірі. При відцентровому розпиленні важливу роль відіграє довжина струменя розплаву до обертального диска, зі зменшенням якої зростає вихід дрібних фракцій.

Ключові слова: газове розпилення, відцентрове розпилення, розмір частинок порошків і гранул, діаметр і нестійкість струменя, періодичність.

Вступ

Розвиток сучасної техніки вимагає створення ексклюзивних матеріалів, здатних експлуатуватися в агресивних середовищах, при високих температурах (до 300 °C і вище) і тиску, знакозмінних навантаженнях. Значною мірою це вирішується методами порошкової металургії, де одержання порошоків із заданими властивостями є важливою ланкою виробництва заготовок і виробів. Тому отримання порошоків високолегованих сплавів спеціального призначення, придатних для використання в машинобудуванні та різних галузях промисловості, є важливою науково-практичною задачею.

Властивості порошкових металів і сплавів визначаються способами їх виготовлення, які є досить різноманітними: подрібнення в кульових обертових млинах, подрібнення струменя розплаву ультразвуком, електричний вибух, відновлення хімічних сполук, електроліз, метод випаровування-конденсації та інші [1]. Провідне місце серед них належить технологіям розпилення розплавів, що, насамперед, зумовлено високою продуктивністю і економічністю цього процесу [2].

Найважливішою характеристикою порошку є гранулометричний склад і форма частинок. Визначення оптимальних параметрів розпилення розплаву для одержання порошоків необхідної якості потребує комплексного вивчення фізичної сутності явищ на всіх етапах цього процесу, а також оцінки ступеня впливу кожного з них на кінцеві характеристики порошку залежно від виду розпилення (газового, водяного, відцентрованого, плазмового тощо).

Розмір, форма, структура частинок порошоків та гранул, які залежать від особливостей процесу розпилення, визначають можливі сфери їх застосування. Залежно від технічних вимог порошок повинен бути або максимально монофракційним – для лазерного 3D-друку, виготовлення припаїв, або, навпаки, являти собою суміш декількох фракцій – для подальшого пресування. Регулюючи параметри розпилення і максимальний вихід частинок необхідного розміру, можна істотно підвищити ліквідність порошку і економічні показники виробництва. Зокрема, авторами даної роботи показано [3], що, за сталості всіх інших факторів, характер розподілу частинок за розмірами можна змінювати за рахунок вирівнювання швидкості газового потоку по перерізу сопла.

Мікроструктуру, фракційний склад і властивості порошоків, отриманих різними способами розпилення, вивчали в роботах [5–8]. Емпіричні і напівемпіричні формули для визначення залежності розмірів крапель від параметрів розпилення наведено в [9–12]. За літературними даними формування частинок відповідного розміру і геометрії залежить не тільки від фізичних характеристик розплаву (в'язкість, поверхневий натяг, температура) і газу-енергоносія (температура, витрата, швидкість тощо), але й режимів розпилення [13]. Разом з тим, експериментальні результати, що пов'язують параметри диспергування з властивостями отриманих порошоків, є суперечливими, неоднозначними і одержані на установках з різними технічними характеристиками, що зумовлює доцільність і обґрунтованість проведення досліджень у цьому напрямі.

Мета роботи – поглиблення уявлень про технологічні процеси отримання металевих порошоків при газовому і відцентровому розпиленні на основі дослідження закономірностей руху струменя слабов'язкого розплаву і встановлення залежності гранулометричного складу порошоків-гранул від гідродинамічної нестабільності струменя.

Матеріали і методи досліджень

Дослідження проведено на нікелевих сплавах (ЭП975 і модельному Ni–50%Fe) та інструментальній сталі Р6М5К5. Температура розплаву перед розпиленням складала не менше 1450 °C.

Порошки одержували методом газового і відцентрового розпилення розплаву. Розпилення газом здійснювали двома способами – вільно падаючого струменя і обмеженого струменя. У першому випадку розплав під дією сили тяжіння надходив у зону розпилення, де на нього впливав газ-енергоносій. При розпилюванні за схемою

обмеженого струменя використовували сталеву форсунку з кільцевими соплами, які охоплювали канал для подачі струменя розплаву. В цьому випадку зіткнення струменя розплаву і газового потоку відбувалося відразу на виході з каналу, що забезпечувало ефективне використання енергії газу. В якості газу-енергоносія використано аргон і азот, які подавали під тиском $\approx 1,2$ атм, зі швидкістю 340 м/с ($\pm 10\%$).

Відцентрове розпилення проводили на установці УРЖМВ-3Ц з діаметром диска-розпилювача (D) 0,14 м, при частоті (f) і швидкості (V) його обертання відповідно 50 с^{-1} і 6000 об/хв., з витратою розплаву (G) 0,5 кг/с.

Процес розпилення фіксували швидкісною кінозйомкою 2000 кадрів/с з використанням кінокамери СКС-1.

Результати дослідження та їх обговорення

Методи розпилення рідини базуються на втраті струменем стійкості і його розпаді в результаті впливу малих збурень. Джерелом таких збурень є шорсткість і неправильна геометрія зливного отвору, а також пульсація рідини під дією газового потоку. Характерно, що при наявності безлічі хвиль збурень, що накладаються на струмінь, розвиток отримує тільки одна гармоніка, швидкість зростання амплітуди якої має максимум [14]. Оскільки нестійкість струменя рідкого металу не викликана впливом зовнішніх факторів, на його поверхні завдяки ефекту Коанда виникають поверхневі поздовжні хвилі. Поверхня нестійка і максимальна швидкість розвитку такої хвилі описується формулою:

$$\lambda_{\max 1} = 9,02 [D_C / 2], \quad (1)$$



де D_C – діаметр струменя рідкого металу, м; $\lambda_{\max 1}$ – довжина поздовжньої хвилі нев'язкої рідини, м.

Розпад струменя рідкого металу відбувається з утворенням великих крапель, і в даному випадку вважаємо, що в'язкість металу мінімальна. Довжина частини струменя розплаву, що не розпалась, в цьому випадку:



$$L_{C1} \approx v_C \left[\frac{\rho_{Me} D_C}{4\gamma_{Me}} \right]^{0,5} \quad (2)$$

де v_C – швидкість руху струменя, м/с; ρ_{Me} – щільність рідкого металу, кг/м³; γ_{Me} – питома поверхнева енергія металу, Дж/м².

Швидкісна кінозйомка (рис. 1) газового розпилення дослідного сплаву Ni–50%Fe показала, що рух струменя розплаву нестабільний. Деформація струменя в процесі розвитку нестійкості практично симетрична щодо вісі струменя з невеликими відхиленнями. Це дозволяє припустити, що характер порушень стабільності струменя розплавленого металу такий же, як у струменя слабов'язкої рідини.



Теоретичні схеми подачі нев'язкого (рис. 2, а) і слабов'язкого струменя (рис. 2, б) наведені нижче. По висоті струменя металу при його руйнуванні можна виділити три зони. У верхній зоні спостерігається стовпчик рідкого металу, що не розпався, середня зона – зона відшаровування від струменя незначних порцій розплаву у вигляді витягнутих прядок. У нижній зоні утворюються і

Рис. 1. Кінограма руху струменя металу в процесі розпилення з утворенням поздовжніх хвиль нестійкості

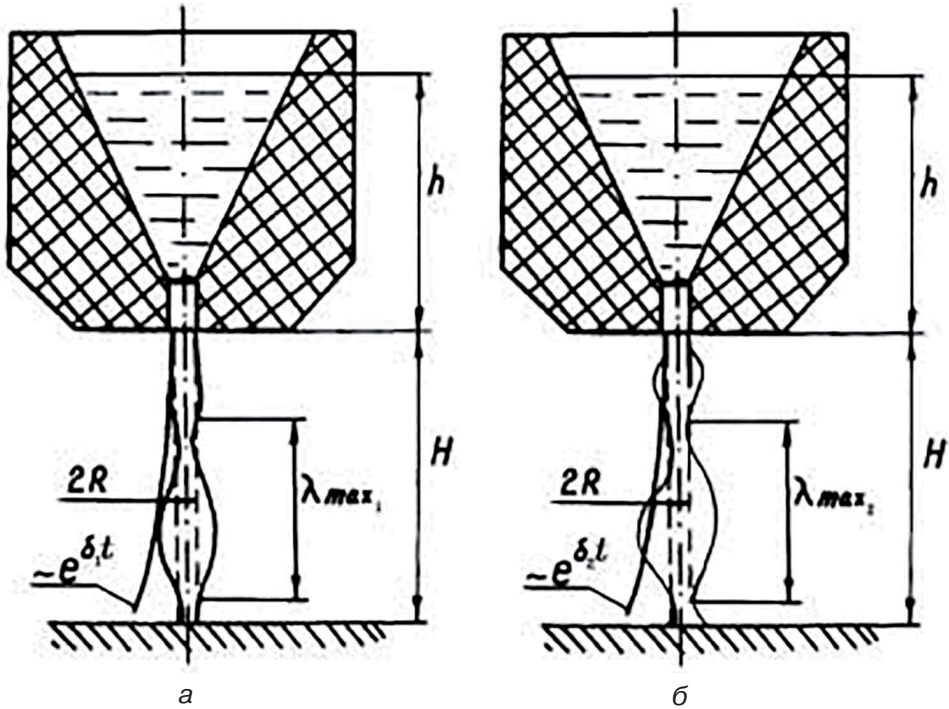


Рис. 2. Схема гідродинамічної нестійкості рідини: а – нев'язкий струмінь ($\mu_{Me} = 0$), б – слабов'язкий струмінь ($\mu_{Me} > 0$), R – радіус зливного отвору; h – висота шару розплаву; H – довжина струменя

відокремлюються від струменя деформовані еліпсоподібні краплі рідкого металу, з'єднані містками, які у подальшому під дією сил поверхневого натягу переходять у великі рідкі глобули.

Параметри слабов'язкого струменя, показаного на рис. 2, б, можна описати такими залежностями:

$$\mu_{max2} = 13 \left(\frac{\mu_{Me}^2}{\rho_{Me}} \frac{D_C^3}{8\gamma_{Me}} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

$$L_{C2} \approx \frac{5v_C D_C}{2} \frac{\mu_{Me2}}{\gamma_{Me}}, \quad (4)$$

де v_C – швидкість руху струменя, м/с; ρ_{Me} – щільність рідкого металу, кг/м³; γ_{Me} – питома поверхнева енергія металу, Дж/м²; D_C – діаметр струменя рідкого металу, м; μ_{Me} – в'язкість рідкого металу, Па·с.

За допомогою високошвидкісної кінозйомки встановлено періодичність в процесі руйнування струменя рідкого металу при газовому розпиленні. Так, при газовому розпиленні сплаву ЭП975 (рис. 3) видно, що форма струменя при вільному падінні змінюється – поступово відбувається його деформація, дроблення, а потім розпад на окремі фрагменти.

При відцентровому розпиленні (рис. 4) яскравість свічення витягнутих крапель високотемпературного розплаву на траєкторії їх руху періодично змінюється, що є наслідком нестійкого пульсуючого руху струменя. В потоці розпиленого розплаву поряд з тонкими штрихоподібними краплями помітні зони, що складаються з крапель великого розміру. Нестабільність форми і суцільності струменя приводить до миттєвої зміни витрати розплаву і відповідно величини об'ємів розпиленого металу. В подальшому це зумовлює утворення частинок різного розміру.

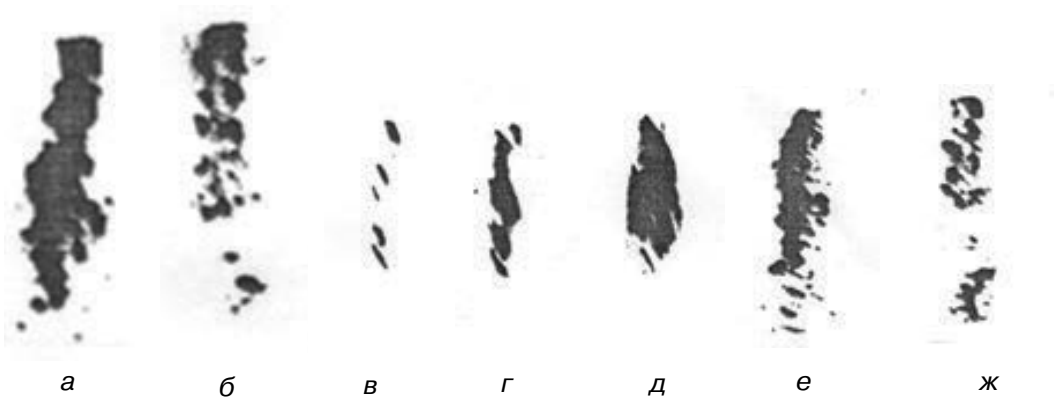


Рис. 3. Кінограма процесу газового розпилення нікелевого сплаву ЭП975 аргонном: метаморфози факела розпилення нестійкого струменя металу



Рис. 4. Кінограма розпилення струменя модельного розплаву Ni-50%Fe відцентровим способом

У процесах газового розпилення на торці зливного каналу формується конічний нарост з хвилями на поверхні і хвилястою периферією, які мають періодичність (рис. 5).

Опосередковано це може свідчити про можливість руйнування тонких шарів струменя розплаву за рахунку розвитку поздовжніх і поперечних хвиль нестійкості.

Характер застигання кромки гарнісажу при відцентровому розпиленні (рис. 6) також підтверджує наявність поперечних і поздовжніх хвиль нестійкості при розпиленні.

В обох випадках – при газовому і відцентровому розпиленні, процес перетворення струменя рідкого металу в краплі відбувається за фізичною моделлю, підтвердженою

безліччю експериментів [14], і складається з таких стадій:

- перетворення вихідного циліндричного струменя розплаву в плоский струмінь, що тоншає, – при газовому розпиленні або в горизонтальний тонкий шар розплаву уздовж радіуса диска-розпилювача – при відцентровому розпиленні;
- утворення в плоскому струмені розплаву, що тоншає, поздовжніх і поперечних хвиль нестійкості;
- формування рідкометалевого пла-

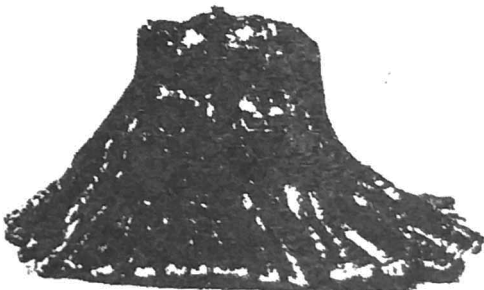


Рис. 5. Охолодей металу при газовому розпиленні: поздовжні і поперечні хвилі

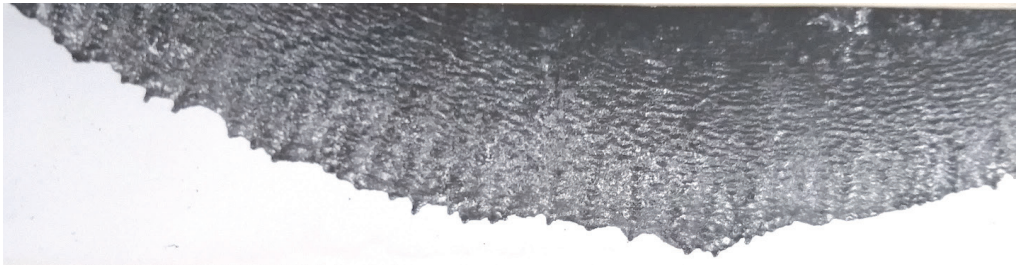


Рис. 6. Кромка гарнісажу при відцентровому розпиленні: поперечні та поздовжні хвилі в рідкому металі

ского тороїдального потовщення під дією розвитку коливань на периферії плоского струменя;

- розвиток нестійкості периферійної області струменя;
- формування та витікання мікроструменів з ділянок струменя розплаву з максимальною амплітудою нестійкості;
- розвиток хвиль нестійкості в мікроструменях, що приводить до їх розпаду на краплі.

Для визначення розміру частинок металу при газовому розпиленні можна скористатися наступною формулою:

$$d_{Me} = K_1 v_{Me}^{0.4} \rho_{Me}^{0.2} D_C^{0.63} \gamma_{Me}^{-0.026} \rho_{\Gamma}^{-0.17} V_{\Gamma}^{-0.34}, \quad (5)$$

де K_1 – коефіцієнти пропорційності; v_{Me} – кінематична в'язкість рідкого металу, m^2/c ; ρ_{Me} , ρ_{Γ} – щільність рідкого металу і газу відповідно, kg/m^3 ; D_C – діаметр струменя рідкого металу, m ; γ_{Me} – питома поверхнева енергія металу, J/m^2 ; V_{Γ} – швидкість газу, m/c .

Деякі автори в запропонованих ними емпіричних моделях вказують на інший характер впливу неврівноваженості вихідного струменя на розмір частинок порошку $d_{Me} = f(D_C)$. Так, за даними Lubanska [15] $d_{Me} \sim D_C^{0.5}$, а за даними Dombrowski [16]

$$d_{Me} \sim D_C^1.$$

Відповідно до моделі відцентрового розпилення [17], розмір частинок визначається за такою теоретичною залежністю:

$$d_{Me} = K_2 D_{disc}^{-0.65} f^{-0.38} v_{Me}^{0.32} \rho_{Me}^{-0.49} \gamma_{Me}^{0.03} V_R^{-0.46} D_C^{0.92}, \quad (6)$$

де K_2 – коефіцієнти пропорційності; D_{disc} – діаметр диска, m ; f – частота обертання диска, c^{-1} ; v_{Me} – кінематична в'язкість рідкого металу, m^2/c ; ρ_{Me} – щільність рідкого металу, kg/m^3 ; γ_{Me} – питома поверхнева енергія металу, J/m^2 ; V_R – радіальна швидкість шару розплаву по периметру диска, m^2/c ; D_C – діаметр струменя рідкого металу, m .

У багатьох роботах також відзначена залежність розміру розпиленних відцентровим методом гранул від діаметра струменя: Kishidaka [18] вважає, що $d_{Me} \sim D_C^{0.5}$, а за даними Сох [19] і Merrington [20] – $d_{Me} \sim D_C^{0.6}$.

Таким чином, отримані залежності (5) і (6) враховують велику кількість параметрів розпилення і відмінність у їх впливі на розмір одержуваних частинок. Параметром визначального впливу на розподіл гранул в обох випадках є діаметр струменя металу, який розпадається за рахунок нестійкості, $d_{Me} \sim D_C^{\alpha}$.

Порівняння гранулометричного складу частинок при розпиленні рідкої інструментальної сталі Р6М5К5 обмеженим струменем (дослідний завод «УкрНДІспецсталь») і вільно падаючим струменем (ПрАТ «Дніпроспецсталь») за однакових умов розпилення: газ-енергоносій – азот, витрати газу – $0,5 m^3$ на $1 kg$ металу, діаметр струменя – $8 mm$, наведено на рис. 7. З рисунку видно, що розпилення розплаву обмеженим струменем дозволяє отримати частинки, розмір яких змінюється в досить вузькому інтервалі: вихід фракції $< 100 \mu m$ становить 22% , що на 10% більше порівняно зі схемою «вільного зливу», а фракції $< 200 \mu m$ – 80% , що більше на 42% .

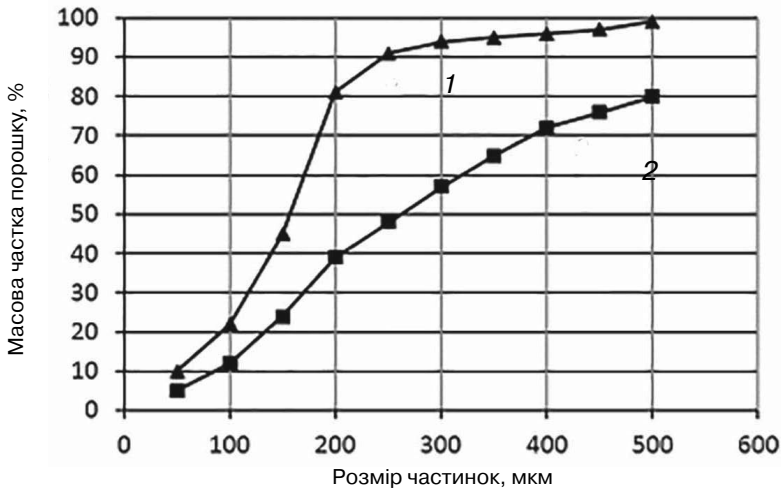


Рис. 7. Гранулометричний склад порошку інструментальної сталі Р6М5К5, одержаного розпиленням в умовах «обмеженого струменя» і «вільно падаючого струменя»: 1 – надзвукова форсунка з соплом Лавалю, «обмежений злив» («УкрНДІспецсталь»); 2 – двощілинна форсунка вільного зливу конструкції фірми ASEA, (ПрАТ «Дніпроспецсталь»)

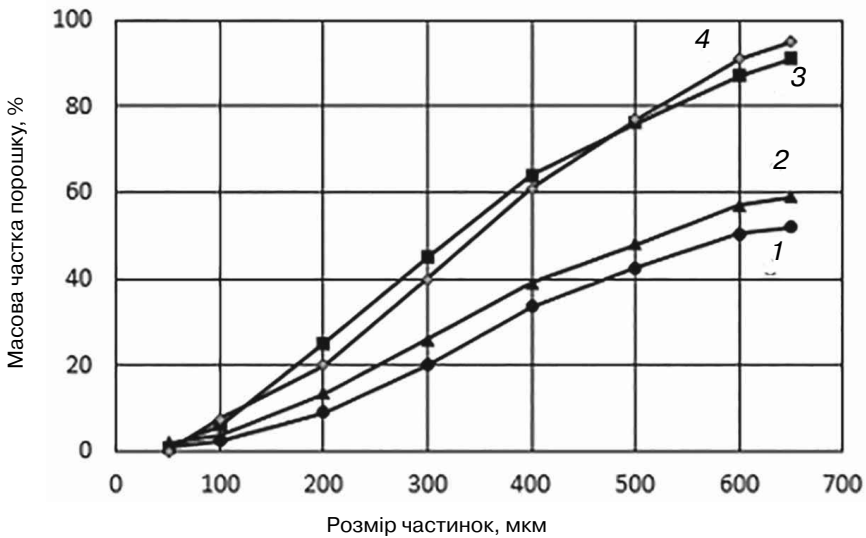


Рис. 8. Гранулометричний склад порошку модельного сплаву Ni-50%Fe при відцентровому розпиленні ($D = 0,14$ м; $f = 50$ с⁻¹; $G = 0,5$ кг/с): 1, 2 – відстань від проміжної ємності до диска 350 мм; 3, 4 – відстань до диска 90 мм

При відцентровому розпиленні важливу роль відіграє висота вільного падіння струменя розплаву на обертний диск. Характер розподілу частинок за розмірами та залежність гранулометричного складу гранул від відстані між проміжною ємністю з розплавом і диском показано на рис. 8. Так, при довжині струменя розплаву $H = 350$ мм вихід фракції < 200 мкм становить не більше 13,5 %, а розпилення при $H = 90$ мм дозволяє підвищити вихід цієї ж фракції до 20–24 %. Сумарний вихід частинок розміром $d_{Me} < 400$ мкм при більш «короткому» струмені становить ≈ 62 %, що на 26 % більше, ніж при $H = 350$ мм.

Таким чином, експериментально доведено, що розмір порошкових частинок залежить від способу розпилення розплаву. Газове розпилення розплаву методом обмеженого струменя дозволяє отримати частинки з мінімальними розбіжностями в їх розмірі. При відцентровому розпиленні важливу роль відіграє довжина струменя розплаву до диска-розпилювача, зі зменшенням якої зростає вихід дрібних фракцій.

Висновки

У роботі наведено результати досліджень впливу гідродинамічної нестійкості струменя металевого розплаву на гранулометричний склад розпилених порошків-гранул. Встановлено, що:

- при газовому і відцентровому розпиленні рідких металів процес перетворення струменя в краплі проходить стадії: «суцільний струмінь циліндричної форми – плаский тонкий струмінь – мікрострумені – краплі», що зумовлено втратою струменем стійкості внаслідок розвитку в ньому поздовжніх і поперечних коливань;
- нерівномірна подача розплаву в зону розпилення, зумовлена нестійким рухом струменя, є причиною розширення діапазону утворення частинок різного розміру;
- діаметр струменя металу і його довжина, на відміну від інших чинників (в'язкість, питома поверхнева енергія, щільність розплаву, швидкість і щільність газового потоку), має істотний вплив на розмір частинок і їх розподіл за розмірами, що підтверджується, як розрахунками за рівняннями (5) і (6) – D_C^{α} , так і результатами експериментів, проведених в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь» і «УкрНДІспецсталь»;
- розподіл частинок порошку за розміром залежить від довжини струменя розплаву та параметрів газового потоку, для одержання порошків дрібної фракції найбільш ефективним є розпилювання розплаву «коротким» струменем;
- розпилення розплаву газовим потоком треба проводити обмеженим струменем з використанням спеціальних форсунок, які забезпечують мінімально можливий проміжок між потоком газу і струменем металу, при відцентровому розпиленні довжина струменя не повинна бути більшою, ніж 90 мм, що дозволяє отримувати «монодисперсні» якісні порошки.

Список літератури

1. Гиршов В. Л., Котов С. А., Цеменко В. Н. Современные технологии в порошковой металлургии. Санкт-Петербург: Изд-во Политехн. Ун-та, 2010. 385 с.
2. Газовое распыление для производства металлических порошков. *Новости порошковой металлургии*. 2008. № 3. URL: http://www.netramm.com/news_pm_3.
3. Терновой Ю. Ф., Личконенко Н. В. Особенности получения микрослитков для 3D-принтеров. Металлургия: наукові праці Інженерного інституту Запорізького національного університету. 2019. Вип. 1 (41). С. 42–45.
4. Глотка О. А., Овчинников О. В. Анализ вітчизняних жароміцних порошків на нікелевій основі, які застосовуються в адитивних технологіях. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. № 2. С. 39–42.
5. Каблов Е. Н., Евгенов А. Г., Рыльников В. С., Афанасьев-Ходыкин А. Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев для диффузионной вакуумной пайки, полученных методом атомизации расплава. Вестник Московского Государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Спец. выпуск. 2011. С. 3–16.
6. Оспенникова О. Г., Евгенов А. Г., Неруш С. В., Афанасьев-Ходыкин А. Н. Исследование мелкодисперсных порошков припоев на никелевой основе применительно к получению высокотехнологичного полуфабриката в виде самоклеющейся ленты на органическом связующем. *Вестник УГАТУ. Серия Машиностроение*. 2012. Т. 16, № 5 (50). С. 137–144.
7. Зленко М. А., Нагайцев М. В., Довбыш В. М. Аддитивные технологии в машиностроении. М.: Центр. науч.-исслед. автомоб. и автототорн. ин-т «НАМИ», 2015. 220 с.
8. Силаев А. Ф., Фишман Б. Д. Диспергирование жидких металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1983. 144 с.
9. Порошки цветных металлов: справочное издание. под ред. Набойченко С.С. М.: Металлургия, 1997. 542 с.
10. Окмянский Ю. А. Влияние параметров центробежного распыления расплава на размер гранул титановых и никелевых сплавов. *Металлургия гранул*. Сб. статей ВИЛС. 1983. Вып. 1. С. 49–53.

11. Козлов В. А., Голубков В. Г. Распыление расплава вращающимся диском с гарнисажем. *Порошковая металлургия*. 1981. № 3. С. 1–5.
12. Оглезнева С. А., Сметкин А. А., Митин В. И., Калинин К. В. Влияние параметров автоматизации расплава на технологические характеристики порошка марки 12Х18Н10Т. *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2017. Т. 19. № 4. С. 122–138.
13. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Государственное издательство физ.-мат. литературы, 1959. 699 с.
14. Терновой Ю. Ф., Пашетнева Н. И., Манегин Ю. В. Физико-математическая модель процесса газового распыления струи расплава. *Порошковая металлургия*. 1992. № 3. С. 11–15.
15. Lubanska H. Correlation of Spray Ring Date for Gas atomization of Liquid Metals. *Journal of Metals*. 1970. Vol. 2, pp. 45–49.
16. Dombrowski N., Johns V. R. Effect of disintegration on gas atomization. *Chem. Eng. Sci.* 1963. Vol. 18. P. 203.
17. Ципунов А. Г., Терновой Ю. Ф. Процесс центробежного распыления струи расплава. Теория, эксперимент, инженерные расчеты, технология и оборудование. *Металлургия гранул*. Сб. статей ВИЛС. 1983. Вып. 3. С. 296–300.
18. А. с. 183266 СССР, МКИ2 ВС5В1/02/ Сопловой узел для распыления расплавленного металла газом / Салеский Ф., Славичек К.
19. Cox A. R., Moore J. B., Van Reuth E. C. On the Rapid Solidification of superalloys. *Metallurgy and Manufacture: Proceeding of the Third International Symposium, Pennsylvania*, 1976. pp. 4557.
20. Merrington A. S., Richardson E. G. The break-up of Liquid Jets. *Proc. Phys. Soc. London*. 1947. Vol. 59, № 1. pp. 18–21.

Надійшла 29.06.2020

References

1. Girshov, V. L., Kotov, S. A., Tsemenko, V. N. (2010) Modern technologies in powder metallurgy. St. Petersburg: Polytechnic Publishing House. Univ. [in Russian].
2. Gas spraying for the production of metal powders (2008). *Powder Metallurgy News*, no. 3. URL: http://www.netramm.com/news_pm_3 [in Russian].
3. Ternovoi, Yu. F., Lichkonenko, N. V. (2019) Features of obtaining micro-ingots for 3D-printers. *Metallurgy: science and technology Institute of the Zaporizhzhya National University*, Vol. 1 (41), pp. 42–45 [in Russian].
4. Glotka, O. A., Ovchinnikov, O. V. (2016) Analysis of instant hot powders on a nickel basis, so that they are closed in additive technologies. *New materials and technologies in metallurgy and machine-building*, no. 2, pp. 39–42 [in Ukrainian].
5. Kablov, E. N., Evgenov, A. G., Rylnikov, V. S., Afanasyev-Khodykin, A. N. (2011) Study of fine-dispersed solder powders for diffusion vacuum brazing obtained by melt atomization. *Bulletin of the Moscow State Technical University. N.E. Bauman. Specialist. release*, pp. 3–16 [in Russian].
6. Ospennikova, O. G., Evgenov, A. G., Nerush, S. V., Afanasyev-Khodykin, A. N. (2012) Study of fine powders of solders based on nickel as applied to the production of a high-tech semifinished product in the form of a self-adhesive tape with an organic binder. *Bulletin of USATU. Series Engineering*. Vol. 16, no. 5 (50), pp. 137–144 [in Russian].
7. Zlenko, M. A., Nagaytsev, M. V., Dovbysh, V. M. (2015) Additive technologies in mechanical engineering: a manual for engineers. Moscow: Center scientific researcher car and motor. Institute «NAMI» [in Russian].
8. Silaev, A. F., Fishman, B. D. (1983) Dispersion of liquid metals and alloys. Moscow: Metallurgy [in Russian].
9. Naboychenko, S. S. (1997) Powders of non-ferrous metals. Moscow: Metallurgy [in Russian].
10. Okmyansky, Yu. A. (1983) Effect of centrifugal melt sputtering parameters on the granule size of titanium and nickel alloys. *Metallurgy of granules. Sat VILS articles*, issue 1, pp. 49–53 [in Russian].
11. Kozlov, V. A., Golubkov, V. G. (1981) Spraying the melt with a rotating disk with a skull. *Powder metallurgy*, no. 3, pp. 1–5 [in Russian].
12. Oglezneva, S. A., Smetkin, A. A., Mitin, V. I., Kalinin, K. V. (2017) The influence of the parameters

- of melt atomization on the technological characteristics of powder grade 12X18H10T. Bulletin of PNIPU. *Engineering, materials science*, vol. 19, no. 4, pp. 122–138 [in Russian].
13. Levich, V. G. (1959) Physicochemical hydrodynamics. Moscow: State Publishing House of Physics and Mathematics [in Russian].
 14. Ternovoi, Yu. F., Pashetneva, N.I., Manegin, Yu. V. (1992) Physicomathematical model of the process of gas spraying of a melt jet. *Powder metallurgy*, no. 3, pp. 11–15 [in Russian].
 15. Lubanska, H. (1970) Correlation of Spray Ring Date for Gas atomization of Liquid Metals. *Journal of Metals*, vol. 2, pp. 45–49 [in English].
 16. Dombrowski, N., Johns, V. R. (1963) Effect of disintegration on gas atomization. *Chem. Eng. Sci.*, vol. 18, p. 203 [in English].
 17. Tsipunov, A. G., Ternovoi, Yu. F. (1983) The process of centrifugal spraying of a melt jet. Theory, experiment, engineering calculations, technology and equipment. *Metallurgy of granules*. Sat VILS articles, issue 3, pp. 296–300 [in Russian].
 18. Salesky, F., Slavichek, K. Nozzle assembly for spraying molten metal with gas: A. p. Czechoslovakia 183266, MKI2 BC5B1/02 [in English].
 19. Cox, A. R., Moore, J. B., Van Reuth, E. C. (1976) On the Rapid Solidification of superalloys. *Metallurgy and Manufacture: Proceeding of the Third International Symposium*, Pennsylvania, pp. 45–57 [in English].
 20. Merrington, A. S., Richardson, E. G. (1947) The break-up of Liquid Jets. *Proc. Phys. Soc. London*, vol. 59, no. 1, pp. 18–21 [in English].

Received 29.06.2020

Yu. F. Ternovoy, *Dr. Sci. (Engin)*, the Head of the Department,
e-mail: ferrous.metals@ukr.net

A. G. Prigunova*, *Dr. Sci. (Engin)*, the Head of the Department,
e-mail: adel_nayka@ukr.net

N. V. Lichkonenko, *Senior Lecturer*, e-mail: nvlichkon75@ukr.net

Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhya National University (Zaporizhzhia, Ukraine)

*Physicotechnological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyev, Ukraine)

INFLUENCE OF HYDRODYNAMIC INSTABILITY OF THE JET METAL ON DISPERSION OF GRANULES AT SPRAYING

For the production of high-quality billets and products intended for mechanical engineering and other industries, metal powders are used, including those from highly alloyed alloys. Various methods for producing powder materials are known. The leading place among the technologies for producing high-quality powders of metals and alloys belongs to the methods of spraying melts, which is primarily due to the high productivity and efficiency of this process. The most important characteristic of the sprayed powder is the particle size distribution and particle shape. It is known that the formation of particles in size and geometry is determined not only by the physical parameters of the melt (viscosity, surface tension, temperature) and energy carrier gas (temperature, flow rate, speed, etc), but also by spray parameters. The work the technological processes of producing metal powders during gas and centrifugal spraying based on the study of the laws of motion of a jet of a low-viscosity melt and establishing the dependence of the particle size distribution of powder granules on the hydrodynamic instability of the jet are investigated. Formulas for calculation and theoretical flow patterns of a low-viscosity melt jet are presented. It is shown that longitudinal instability waves arise on the surface of a liquid metal jet, but only one develops, with a maximum amplitude. Using the film and photographs of the process of atomization of the Ni – 50 % Fe alloy, it was shown that the motion of the melt jet is unstable, the jet is gradually crushed, and then decay into fragments of different configurations. Empirical models of various authors are analyzed, taking into account a large number of spraying parameters and the difference in their effect on the size of the resulting particles during gas and centrifugal spraying. It has been established that in both cases the determining parameter of the effect on the size of powders and granules is the diameter

Гідродинаміка процесів лиття

of the metal jet, which decomposes due to instability,.The results of experimental studies of the highly alloyed alloys, carried out under the conditions of the pilot production of UkrNIISpetsstal and OJSC Dneprospetsstal, proved that gas spraying of the melt by the limited-jet method allows particles to be obtained with minimal differences in their size. In centrifugal spraying, the length of the melt stream to the disk plays an important role, with a decrease in which the yield of fine fractions increases.

Keywords: *gas spraying, centrifugal spraying, particle size of powders and granules, diameter and instability of the jet, periodicity.*

До уваги авторів!

Статті, що надходять в редакцію, повинні мати анотації і ключові слова на українській та англійській мовах. Об'єм статті - не більше 12 стор., малюнків - не більше 5.

Статті подаються як на папері, так і в електронному форматі. Для текстових матеріалів бажано використати формат doc. Для графічних матеріалів - jpeg. Графічні матеріали необхідно зберігати в окремих файлах. Фотографії, малюнки, графіки і креслення мають бути чорно-білими, чіткими і контрастними.