

УДК 621.767:531.1

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-04>

Терновий Юрій Федорович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-1078-4430

Лічконенко Наталія Володимирівна, старший викладач, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-7960-061X

ПРО ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗУ ТА РОЗПЛАВУ НА РОЗМІР МІКРОГРАНУЛ ЗА ГАЗОВИМ РОЗПИЛЕННЯМ

Розглянуто особливості процесу газового розпилення металевих розплавів за змінюванням температури газу та рідкого металу. Зростання дисперсності мікрогранул під час підвищення температури газу або перегрівання розплаву можна пояснити більш повним проходженням двохстадійного процесу дроблення. Показано, що під час використання підвищеної температури газу та розплаву відбувається зниження масової витрати газу для забезпечення однакової динаміки розпилення.

Ключові слова: газове розпилення, діаметр мікрогранули, температура газу і металу, тиск дуття, час охолодження, дисперсність, дроблення крапель, перегрівання, в'язкість рідкого металу та газу

Технологічний процес виробництва методом порошкової металургії починається з одержання металевих порошків, якісні характеристики яких значною мірою визначаються методом їх виготовлення. У промисловості застосовують різноманітні методи одержання порошків, проте процес газового розпилення рідких металів є одним з найбільш високотехнологічних і продуктивних методів [1-2].

Теоретичні й експериментальні дослідження процесів газового розпилення високо-температурних розплавів виконуються як вітчизняними вченими [3-5], так і за кордоном [6-8]. Процес газового розпилення характеризується створенням двофазних систем «газ - розплавлений метал» і «газ - тверда частка», які в цілому мають назву металогазовий факел. Газом-енергоносієм може бути аргон, азот і повітря. Правильне підбирання енергоносія є необхідною, але недостатньою умовою для одержання порошків із заданими характеристиками. У роботах [9-10] відзначається, що дисперсність порошку залежить від в'язкості, поверхневого натягу та температури розплаву, проте головними чинниками, що істотно впливають на фракційний склад одержаних порошків, є тиск і температура газу-енергоносія [11].

Гаряче дуття на практиці розпилення застосовують досить давно під час розпилювання легкоплавких металів (свинець, олово, цинк, алюміній, припої на основі свинцю тощо) [12]. Конструкції форсунок, що працюють на дутті, температура якого перевищує температуру плавлення металу, що розпилюють, на 373...473 К, описано, наприклад, у роботах [13-14].

Відомими є різноманітні конструктивні вирішення способів розпилення алюмінієвих, магнієвих сплавів підігрітим до температури 873...1073 К азотом з тиском у форсунці 5...6 МПа [15-18]. Розпилення за температури газового потоку, що співпадає з температурою розплаву, є найефективнішим, оскільки в'язкість та поверхневий натяг при цьому не змінюються під час дроблення струменя через відсутність переохолодження розплаву. Але створення таких умов під час розпилення розплавів, які мають високу температуру плавлення (1723...1923 К), ускладнюється через складнощі нагрівання газового дуття та значного дорожчання установок, що розпилюють. Тому за розпиленням, наприклад, жароміцних сплавів застосовують підігрівання газу-енергоносія до температури 673 К.

У ГП «УкрНДІспецсталь» на прикладі нікелевого жароміцного сплаву експериментально показана можливість підвищення виходу порошку фракції –100 мкм на 20% під час розпилення струменя розплаву нагрітим газоподібним аргоном.

У роботі [19] показано, що під час розпилення сплаву ЕП648-ВИ холодним газом середній діаметр часточок складає 76...66 мкм, а під час розпилення гарячим газом можливе одержання часточок із середнім діаметром 34 мкм. Розпилення гарячим газом призводить, окрім зменшення середнього розміру часточок, до зниження кількості дефектних гранул з сателітами, що пов'язано з високою початковою швидкістю газового потоку на виході з форсунки та великим діаметром факела рідкого металу, що утворюється під час який визначає більш низьку ймовірність зіткнення гранул у процесі кристалізації.

Проте, незважаючи на значну міру довіри до результатів технологічних експериментів, незадовільними та суперечливими залишаються теоретичні уявлення про механізм впливу температури газу і розплаву на процес розпилення.

Мета роботи. Визначення основних теоретичних закономірностей процесу газового розпилення рідких металів з урахуванням впливу як температури газу, так і різниці температур газу та металу.

Основна частина досліджень. У роботі [20] на прикладах срібла, а також сплавів золота і срібла за зростанням температури газу T показано зниження середнього розміру часточок порошку d_k . Розмір часток d_k визначається як

$$d_k \sim \frac{1}{T^{0,25}} ; \quad (1)$$

$$d_k \sim (G_{Me})^{0,5} ; \quad (2)$$

$$G_{Me} \sim T^{0,5} , \quad (3)$$

де G_{Me} – масова витрата металу, кг/с.

Залежність (1) підтверджено також експериментально для випадків однакових значень температури, але різних величин питомих витрат газу. Такі результати пояснюються, по-перше, збільшенням об'ємної витрати газу-енергоносія G_{Me} за рахунок зростання його температури та, по-друге, зростанням кінетичної енергії газового потоку, що сприяє дробленню струменя розплаву на дрібні часточки. Експериментально доведено:

$$d_k \sim \frac{1}{E_{кин}} , \quad (4)$$

де $E_{кин}$ – кінетична енергія газу.

Подібні результати наведено у роботі [21].

У роботах з диспергування розплавів [12,13], на прикладі легкоплавких металів, показано, що нагрівання газу-енергоносія до температури, що перевищує температуру плавлення, призводить до одержання більш тонкодисперсного порошку. Пояснення є таким: процес диспергування розплаву відбувається якнайповніше, тобто здійснюються всі можливі геометричні метаморфози.

При цьому, враховуючи повне, можливе в гідродинамічному сенсі дроблення рідкого металу на останній стадії в цих роботах розглядають додаткове дроблення крапель діаметром d_k , що раніше утворилися, в газовому потоці, відносна швидкість якого становить W_2 . Відповідно, критична швидкість:

$$W_{kp} = \left(\frac{8\gamma_{Me}}{\rho_{Me} \cdot d_k} \right)^{0,5} , \quad (5)$$

де γ_{Me} – питома поверхнева енергія розплаву, Дж/м²; ρ_2 – щільність газу, кг/м³.

Значення відносної швидкості краплі і газу $W_{кр}$ дозволяє визначити число Вебера We . Залежно від W_2 і визначається руйнування крапель розплаву, що утворюються на першому етапі [22], або на 2...3 нові краплі, або на безліч крапель на другому етапі [12].

Причому рівняння (5) є справедливим, коли час охолодження до початку кристалізації краплі перевищує час її критичної деформації $\tau_{деф}$:

$$\tau_{охл} > \tau_{деф} . \quad (6)$$

Для сферичної краплі:

$$\tau_{охл} = \frac{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_k}{6\alpha} \cdot \ln \left(\frac{T_{Me} - T_{\Gamma}}{T_{кр} - T_{\Gamma}} \right) ; \quad (7)$$

$$\tau_{деф} = \frac{1,65 d_k}{W_{\Gamma}} \cdot \left(\frac{\rho_{Me}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,5} ; \quad (8)$$

$$\alpha = Nu \cdot \lambda_{\Gamma} \cdot d_k , \quad (9)$$

де c_{Me} , ρ_{Me} , T_{Me} – теплоємність кДж/(кг·К), щільність, кг/м³ і температура, К, розплаву; α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); Nu – критерій Нуссельта; λ_{Γ} – теплопровідність газу, Вт/(м·К).

Під час нагрівання газу його щільність (за постійним тиском дуття) знижується, що призводить до необхідності збільшення критичної швидкості. Швидкість газу також зростає з підвищенням його температури T_{Γ} :

$$W_{\Gamma} \sim T_{\Gamma}^{0,5} . \quad (10)$$

Таким чином, із зростанням температури, але збереженні тиску дуття справедливим є рівняння:

$$W_{кр} \cdot \rho_{\Gamma}^{0,5} = \text{const} . \quad (11)$$

Тоді, за однаковим тиском дуття

$$E_{кін} \approx \rho_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma}^2 \neq E_{кін}(T_{\Gamma}) . \quad (12)$$

З рівняння (12) виходить, що кінетична енергія газу не залежить від його температури із збереженням постійного тиску дуття.

Проте, результати експериментів на ГП «УкрНДІспецсталь», ASL, ІПМ НАНУ показують зростання дисперсності порошку з підвищенням температури газу. Які є закономірності та в чому причини цього явища?

Вплив температури. Розглянемо випадок, коли тиск дуття не змінюється, а змінюється тільки температура газу. Тоді маємо випадок (12) – збереження кінетичної енергії та зниження витрати газу:

$$G_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} \cdot W_{\Gamma} \cdot F_c \sim \frac{1}{T} \cdot T^{0,5} , \quad (13)$$

де F_c – площа перерізу сопла, м.

Незмінність $E_{кін}$ свідчить про незалежність розміру крапель від температури за постійним тиском P з точки зору впливу її на фізичні параметри процесу. В той же час, враховуючи рівняння (13), згідно з роботою [21] повинен підвищитися розмір крапель d_k , оскільки питома витрата газу знижується. Реально, за виконанням умов $P=\text{const}$; $T=\text{var}$, спостерігається не ідентичний, а менший розмір розпилених часточок. За цих умов в экс-

перименті маємо $d_{\kappa}(T_{\max}) < d_{\kappa}(T_{\min})$, що можна пояснити тільки більш повним проходженням процесу дроблення під час тривалішого перебування фрагментів розплаву в гарячому газі.

Принцип еквівалентності. З точки зору повноти проходження процесу дроблення, можна розглянути випадок однакового часу охолодження часточок розплаву, яке реалізується за однакової різниці температур металу (T_{Me}) і газу (T_{Γ}).

Дійсно, за виконанням умови $\Delta T_1 = \Delta T_2$ час охолодження $\tau_{охл}$ є однаковим

$$\tau_{охл} = \frac{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_{\kappa}}{6\alpha} \cdot \ln \left(\frac{T_{Me} - T_{\Gamma}}{T_{кр} - T_{\Gamma}} \right) = \frac{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_{\kappa}}{6\alpha} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{T_{кр} - T_{\Gamma}} \right). \quad (14)$$

З рівняння (14) виходить, що за $\tau_{охл,1} = \tau_{охл,2}$, коли виконується умова:

$$1 + \frac{\Delta T_1}{T_{кр} - T_{\Gamma}} = 1 + \frac{\Delta T_2}{T_{кр} - T_{\Gamma}} = \text{const}. \quad (15)$$

Звідки

$$\Delta T_1 = \text{const} (T_{кр} - T_{\Gamma}). \quad (16)$$

Виходячи з рівняння (15), розглянемо як приклад випадок, коли перегрівання металу є стандартним і складає 100 К, $T_{кр} = 1300$ К, $T_{\Gamma} = 300$ К. При цьому маємо $\text{const} = 100/1000 = 0,1$.

Підвищити тривалість процесу охолодження можна двома способами: шляхом нагрівання металу або нагрівання газу (табл. 1 і 2).

Таблиця 1 – Час охолодження часток розплаву за $T_{кр} = 1300$ К, $\Delta T = 100$ К

T_{Γ} , К	300	400	500	600	700	800
$1 + \frac{\Delta T_2}{T_{кр} - T_{\Gamma}}$	1,100	1,111	1,125	1,143	1,167	1,200

Таблиця 2 – Час охолодження часток розплаву за $T_{кр} = 1300$ К, $T_{\Gamma} = 300$ К

ΔT_1 , К	100	120	140	160	180	200
$1 + \frac{\Delta T_2}{T_{кр} - T_{\Gamma}}$	1,100	1,120	1,140	1,160	1,180	1,200

З аналізу табл. 1 і 2 видно, що нагрівання газу з 300 К до 600 К збільшує час охолодження в тій же мірі, що і нагрівання металу до температури, що перевищує температуру кристалізації на 140 К замість 100 К. В цьому і полягає принцип еквівалентності диспергування.

Вплив в'язкості нагрітого газу. Для рідкометалевого утворення сфероїдальної форми справедливим є вирівнювання

$$\tau_{охл} = \frac{c_{Me} \cdot \rho_{Me} \cdot d_{\kappa}}{6\alpha} \cdot \ln \left(\frac{T_{Me} - T_{\Gamma}}{T_{кр} - T_{\Gamma}} \right). \quad (17)$$

Очевидно, що $\tau_{охл} = \tau_{охл}(T_{\Gamma})$, але і $\tau_{охл} = 1/\alpha$, де коефіцієнт тепловіддачі α , за рахунок вимушеної конвекції опосередковано через число Рейнольдса Re , залежить від температури, оскільки містить коефіцієнт в'язкості ν_{Γ} , тобто

$$\alpha = \frac{\lambda_{\Gamma} \cdot Nu}{x}; \quad (18)$$

$$Nu = 2 (1 + 0,27 Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2}); \quad (19)$$

$$Pr^{1/3} = 1 ; \quad (20)$$

$$Re = \frac{W_r}{\nu_r} ; \quad (21)$$

$$\alpha \sim Nu \sim \nu_r^{-0,5} ; \quad (22)$$

$$\tau_{охл} \sim \frac{1}{\alpha} \sim \nu_r^{0,5} ; \quad (23)$$

$$\nu_r \sim T_r^{0,5} ; \quad (24)$$

$$\tau_{охл} \sim T_r^{0,25} . \quad (25)$$

З урахуванням рівняння (19) маємо:

$$\tau_{охл} \approx T_r^{0,25} \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta T}{T_{кр} - T_r} \right) . \quad (26)$$

З виразу (27) витікає, що із зростанням температури газу значення $\tau_{охл}$ збільшується, у тому числі за рахунок залежності в'язкості газу від температури. Згідно з роботою [12] $d \sim \nu_r^{0,45}$, що суперечить роботі [23]: $d \sim \nu_r^{-0,5}$, тобто $d \sim T_r^{-0,25}$.

Таким чином, розрахунки показують, що підвищення температури у два рази призводить до зниження розміру крапель приблизно на 15%.

Економія нагрітого газу під час розпилення. Витрату газу через сопло форсунки визначають за формулою:

$$G_r = \rho_r \cdot W_r \cdot F_c . \quad (27)$$

де F_c – площа перерізу сопла на виході.

За підвищенням температури газу справедливим є $W_r \sim T_r^{0,5}$. В той же час з рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot K \cdot T_r ; \quad (28)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P \cdot M}{K \cdot T_r} \sim \frac{1}{T_r} . \quad (29)$$

Звідки за незмінним тиском (P) дугтя :

$$G_r \approx \frac{F \cdot T_r^{0,5}}{T_r} \approx \frac{F}{T_r^{0,5}} . \quad (30)$$

Цим і пояснюється економія газу під час розпилення.

Для конкретного випадку (для конфузора) залежність витрати газу від температури та тиску має вигляд:

$$G_r \approx \frac{1}{T_r^{0,5}} \cdot \left(1 + \frac{P}{P_0} \right)^{\frac{0,5(k-1)}{k}} . \quad (31)$$

Тобто існує такий тиск розпилення P_i , який із зростанням температури до T_i зберігає незмінною витрату газу.

У роботі [24] подано відому залежність, що маж вигляд

$$d_k \sim G_r^{-2,3} \cdot \rho_r^{-0,17} . \quad (32)$$

З урахуванням вищесказаного отримуємо залежність дисперсності порошку від температури за постійним тиском:

$$d_k \sim T_r^{-0,15} \cdot T_r^{-0,17} \sim T_r^{-0,32} . \quad (33)$$

Висновки. Вивчення закономірностей газового розпилення у даному випадку дозволяє стверджувати, що:

– під час розпилення на першій стадії розпаду «струмінь – плівка, мікрострумені – первинні краплі» нагрівання газу не впливає на дисперсність. Після створення первинних крапель, на другій стадії залежно від числа Вебера відбувається інтенсивна тепловіддача до газу та допускається динамічна дія на краплі, що розширює факел розпилення та сприяє вторинному дробленню крапель. Для розпилення на першій стадії характерний масштаб: довжини – 0,01 м, часу – $10^{-4} \dots 10^{-5}$ с; на другій стадії довжина складає 0,1...-1,0 м, час 0,01...0,001 с;

– незважаючи на відому залежність в'язкості від температури $\nu_r = T_r^{0,5}$ і суперечливі дані про вплив в'язкості газу на розмір розпиленних крапель, можна стверджувати про слабку залежність $d_k \neq d_k(\nu_r) \neq d_k(T_r)$. У кращому разі підвищення температури газу в два рази знижує розмір часточок порошку на 15% за рівнянням роботи [24], проте впливає на дисперсність згідно з роботою [23] тільки за рахунок вторинного дроблення;

– час до початку кристалізації або час, необхідний для повного розкладання рідкокристалічних утворень, залежить як від температури газу, так і від температури перегрітого розплаву, тобто для одержання однакового часу охолодження, згідно з принципом еквівалентності, можна підвищувати або температуру розплаву, або температуру дуття;

– під час використання нагрітого газу відбувається економія масової витрати газу для забезпечення однакової динаміки розпилення.

Таким чином, розуміння механізму впливу температури газу та розплаву на розмір мікрогранул порошку сприяє встановленню оптимальних технологічних режимів газового розпилення високотемпературного розплаву та розробці надійних методів управління таким процесом.

Бібліографічний перелік

1. Газовое распыление для производства металлических порошков. *Новости порошковой металлургии*. 2008. № 3. URL: http://www.netramm.com/news_rm_3 нетрамм распыление газом.pdf (дата звернення 12.07.2020).
2. Терновой Ю. Ф., Кудиевский С. С., Пашетнева Н. И. Инженерные расчеты технологических процессов распыления расплавленных металлов. Запорожье : РИО ЗГИА, 2005. 149 с.
3. Глотка О. А., Овчинников О. В. Аналіз вітчизняних жароміцних порошків на нікелевій основі, які застосовують в адитивних технологіях. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. № 2. С. 39-42.
4. Павленко Д. В., Бондаренко С. Г. Исследование способов управления гранулометрическим составом металлических порошков при их получении методом газодинамического распыления расплавов. *Космічна наука і технологія. Додаток*. 2002. № 1. С. 132-135.
5. Педаш А. А., Клочихин В. В., Лысенко Н. А. Влияние технологий изготовления металлических порошков на структуру и свойства деталей, полученных селективным лазерным плавлением. *Вестник двигателестроения*. 2019. № 2. С. 31-39.
6. Лыков П. А., Сафонов Е. В., Броммер К. А., Шульц А. О. Получение металлических микропорошков газодинамическим распылением. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2012. № 33. Вып. 20. С. 107-112
7. Dowson A. G. Recent development in powder metallurgy. *Metall and Metall-form*. 1974. Vol. 41. No 6. P. 132-148.

8. Wiggers H., Koster S., Walzel P. Experiments to liquid metal atomization with a new prefilming nozzle. Proceedings of International Conference on Spray Deposition and Melt Forming. Bremen Universitat. 2000. P. 569-578.
9. Грацианов Ю. А., Путимцев В. В., Силаев А. Ф. Металлические порошки из расплавов. Москва : Металлургия, 1970. 245 с.
10. Силаев А. Ф. О влиянии перегрева металлических расплавов при распылении газовым потоком на дисперсность и структуру порошка. Запорожье, 1965. 44 с.
11. Лыков П. А., Бромер К. А., Рошин В. Е., Брындин С. А. Определение технологических параметров получения металлических ультрадисперсных порошков. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. 2011. Вып. 14. С. 17-19.
12. Ничипоренко О. С., Найда Ю. И., Медведовский А. Б. Распыленные металлические порошки. Киев : Наукова думка, 1980. 240 с.
13. Найда Ю. И., Ничипоренко О. С., Шашмулин В. А. Усовершенствование технологии производства порошков олова на заводе «Рязцветмет». *Порошковая металлургия*. 1975. № 11. С. 94-97.
14. Форсунка для распыления жидких металлов. А. с. 500903 СССР, МКИ В 22F 9/00. В 22D 23/08. В 05B 1/00. № 2054322/22-1. Заявлено 12.08.74.
15. Способ получения высокодисперсного сферического алюминиевого порошка. Патент РФ 2022715, МПК В 22F 9/08. № 4936976/02. Заявлено 16.05.91.
16. Алюминиевый сферический порошок высокой дисперсности и способ его получения. Патент РФ 2243857, МПК В 22F 9/08. № 2002124028/02. Заявлено 09.09.02.
17. Технологическая инструкция по производству первичного, сферического, дисперсного, высокодисперсного и с присадкой титана и кремния пульверизаторов распылением расплавленного алюминия азотом в отделении 2 предприятия ООО «СУАЛПМ». ТИ 48010636110. Шелехов, 2010. 48 с.
18. Способ распыления расплавленных порошков. Патент РФ 2508964. МПК В 22F 9/08. № 2012150658/02. Заявлено 26.11.12.
19. Евгенов А. Г., Неруш С. В., Василенко С. А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке. *Труды ВИАМ*. 2014. № 3. URL : [https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-melkodispersnogo-metallichesкого-poroshka-zharoprochnogo-splava-marki-ep648-vi-primenitelno-k-lazernoy-lmd-naplavke-a-takje-otsenka-kachestva-naplavki-poroshkovogo-materiala-na-nikelevoy-osnove-na-%20\(2\).pdf](https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-melkodispersnogo-metallichesкого-poroshka-zharoprochnogo-splava-marki-ep648-vi-primenitelno-k-lazernoy-lmd-naplavke-a-takje-otsenka-kachestva-naplavki-poroshkovogo-materiala-na-nikelevoy-osnove-na-%20(2).pdf).
20. Strauss J. T., Dunkley J. J. An experimental and empirical study of clouse-coupled gas atomization. *Congress «World Powder Metallurgy»*.
21. Dunkley J. J. An analysis of the Gas Atomization Process. *Conference «Euro Powder Metallurgy»*. 2002.
22. Терновой Ю. Ф., Пашетнева Н. И., Манегин Ю. В. Физико-математическая модель процесса газового распыления струи расплава. *Порошковая металлургия*. 1992. № 3. С. 11-15.
23. Lubanska H. Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals. *Journal of Metals*. 1970. Vol. 2. № 22. P. 45-49.
24. Терновой Ю. Ф., Пашетнева Н. И. Внутренняя пористость в частицах распыленного порошка сплава на никелевой основе. *Порошковая металлургия*. 1990. № 1. С. 43-47.

References

1. Gazovoe raspylenie dlya proizvodstva metallicheskih poroshkov *Novosti poroshkovoy metallurgii*. 2008. No 3. URL: http://www.netramm.com/news_pm_3_netramm_taspylenie_gazom.pdf распыление газом.pdf (data zvernennya 12.07.2020).
2. Ternovoy Yu. F., Kudievskiy S. S., Pashetneva N. N. Inzhenernye raschety tehnologicheskikh protsessov raspylenia rasplavlennykh metallov [Engineering calculations of technological processes of atomization of melted melts] : monograph. Zaporozh'e : RIO ZGIA, 2005. 149 p.
3. Glotka O. A., Ovchinnikov O. V. Analiz vichyznyanykh zharomitsnykh poroshkiv na nikelvii osnovi, yaki zastosovuyutsya v adytyvnykh tekhnologiyakh. *Novi materially i tekhnologii v metallurgii ta mashinobuduvanni*. 2016. no. 2. pp. 39-42.

4. Pavlenko D. V., Bondarenko S. G. Issledovanie sposobov upravleniya granulometricheskim sostavom metallicheskih poroshkov pti ikh poluchenii metodom gazodinamochneskogo paspyleniya pasplavov. *Kosmichna nauka I tekhnologiya. Dodatok*. 2002. no. 1. pp. 132-135.
5. Pedash A. A., Klochkhin V. V., Lysenko N. A. Vliyanie tekhnologii izgotovleniya metallicheskih poroshkov na strukturu i svoistva detaley, poluchennykh selektivnym lazernym plavleniem. *Vestnik mashinostroeniya*. 2019. no. 2. pp. 31-39.
6. Lykov P. A., Safonov E. V., Bromer R.A., Shul'ts A. O. Poluchenie metallicheskih mikroporoshkov gazodinamicheskim raspyleniem. *Vestnik YuUrFU. Seriya «Mashinostroenie»*. 2012. vol. 20. no. 33. pp. 107-112.
7. Dowson A. G. Recent development in powder metallurgy. *Metall and Metall-form*. 1974. vol. 41. no. 6. pp. 132-148.
8. Wiggers H., Koster S., Walzel P. Experiments to liquid metal atomization with a new prefilming nozzle. Proceedings of International Conference on Spray Deposition and Melt Forming. Bremen Universitat. 2000. pp. 569-578.
9. Gratsianov Yu. A., Putimtsev V.V., Silaev A. F. Metallicheskie poroshki iz rasplavov. Moskva. Metallurgiya, 1970. 245 p.
10. Silaev A. F. O vliyanii peregreva metallicheskykh rasplavov pri raspylenii gazovym potokom na dispersnost' I strukturu poroshka. Zaporozh'e, 1965. 44 p.
11. Lykov P. A., Bromer K. A., Roshchin V. E. Bryndin S. A. Opredelenie tekhnologicheskikh parametrov polucheniya metallicheskih ul'tradispersnykh poroshkov. *Vestnik YuUrFU. Seriya «Mashinostroenie»*. 2011. vol. 14. no. 32. pp. 17-19.
12. Nichiporenko O. S., Naida Yu. I., Medbedovskii A. B. Paspylennye mmetallicheskie poroshki. Kiev : Naukova dumka, 1980. 240 p.
13. Naida Yu. I., Nichiporenko O. S., Shamshurin V. A. Usonershenstvovanie tekhnologii proizvodstva poroshkov olova na zabode «Ryaztvetmet». *Poroshkovaya metallurgiya*. 1975. no. 11. pp. 94-97.
14. Forsunka dlya raspyleniya zhidkikh metallov. A.I. 500903 USSR, MKI B 22F 9/00. B 22D 23/08. B 05B 1/00. No 2054322/22-1. Zayavleno 12.08.74.
15. Sposob polucheniya vysokodispersnogo sfericheskogo alyuminievogo poroshka. Pat. RF 2022715, MPK 22F 9/08. no. 4936976/02. Zayavleno 16.05.91.
16. Alyuminievy sfericheskiy poroshok dysokoy dispersnosti i sposob ego polucheniya. Pat. RF 2243857, MPK B 22F 9/08. No 2002124028/02. Zayavleno 09.09.02.
17. Tekhnologicheskaya instruktsiya po proizvodstvu pervichnogo sfericheskogo dispersnogo, vysokodispersnogo i s prisadkoy titana i kremniya pul'verzizatorov raspyleniya rasplavlennogo alyuminiya azotom v otdelenii 2 predpriyatiya OOO «SUALPM». TI 48010636110. Shelekhov, 2010. 48 p.
18. Sposob raspyleniya rasplavlennykh poroshkov. Pat RF 2508964. MPK B 22F 9/08. n.o. 2012150658/02. Zayavleno 26.11.12.
19. Evgenov A. G., Nerush S. V., Vasilenko S. A. Polychenie i oprobovanie melkodispersnogo metallicheskogo poroshka vsokokhromistogo splava na nikelvoy osnove primenitel'no k lazernoy LMD-naplavke. *Trudy VIAM*. 2014. No 3. URL: [https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-melkodispersnogo-metallicheskogo-poroshka-zharoprochnogo-splava-marki-ep648-vi-primenitelno-k-lazernoy-lmd-naplavke-a-takje-otsenka-kachestva-naplavki-poroshkovogo-materiala-na-nikelvoyo-osnove-na-%20\(2\).pdf](https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-melkodispersnogo-metallicheskogo-poroshka-zharoprochnogo-splava-marki-ep648-vi-primenitelno-k-lazernoy-lmd-naplavke-a-takje-otsenka-kachestva-naplavki-poroshkovogo-materiala-na-nikelvoyo-osnove-na-%20(2).pdf).
20. Strauss J. T., Dunkley J. J. An experimental and empirical study of clouse-coupled gas atomization. *Congress «World Powder Metallurgy»*.
21. Dunkley J. J. An analysis of the Gas Atomization Process. *Conference «Euro Powder Metallurgy»*. 2002.
22. Ternovoy Yu. F., Pashetneva N. I., Manegin Yu. V. Fiziko-matematicheskaya model' protsessa gazovogo raspyleniya stryi rasplava. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1992. no. 3. pp. 11-15.
23. Lubanska H. Correlation of Spray Ring Data for Gas Atomization of Liquid Metals. *Journal of Metals*. 1970. vol. 2. no. 22. pp. 45-49.

24. Ternovoy Yu. F., Pashetneva N. I. Vnutrnnnyaya poristost' v chastitsakh raspylennogo splava na nikelvovoy osnove. *Poroshkovaya metallurgiya*. 1990. no. 1. pp. 43-47.

Ternovoy Yurii, professor, doctor technical sciences, Zaporozhe national university.

Lichkonenko Natalya, senior teacher, Zaporozhe national university.

ABOUT INFLUENCE OF TEMPERATURE GAS AND FUSION ON SIZE OF MICROGRANULES AT GAS DISPERSION

Spraying liquid metals today is one of the most high-tech and productive methods for producing high-quality metal powders. Earlier theoretical and experimental studies have established that the dispersion of a powder depends on the viscosity, surface tension and temperature of the melt; however, the main factors affecting the fractional composition of the resulting powders are the pressure and temperature of the energy carrier gas. When non-ferrous metals and alloys sprayed, designs of nozzles operating on a blast, the temperature of which exceeds the melting temperature of the sprayed metal by 100-200 °C, have long been used. And when spraying, for example, heat-resistant alloys, heating of the energy carrier gas up to 400 °C is used. In this case, there is an increase in the dispersion of the obtained microgranules; however, the theoretical prerequisites for this phenomenon are not fully understood. Therefore, the aim of this work was to refine the theoretical concepts of the mechanism of the influence of the temperature of the gas and melt on the size of the particles obtained. It was found that the dependence of the particle size on the gas viscosity is rather weak. Calculations show that a two-fold increase in temperature leads to a decrease in droplet size by about 15%. Therefore, the increase in the dispersion of microgranules with an increase in the gas temperature or overheating of the melt can only be explained by a more complete passage of the process of secondary crushing of drops, which is realized due to a longer stay of the fragments of the melt in hot gas. According to the principle of equivalence, the duration of cooling can be increased in two ways: by heating the metal or by heating the gas. It is shown that when using elevated gas and melt temperatures, the gas mass flow rate decreases to ensure the same sputtering dynamics.

Стаття надійшла: 31.07.2020 р.