

УДК 621.793.79:533.6.011:669.248

doi: 10.32620/akt.2021.4sup1.15

О. В. ШОРИНОВ¹, С. О. ПОЛИВЯНИЙ²¹ *Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна*² *АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна*

ВПЛИВ ДІАМЕТРУ ЧАСТИНОК ПОРОШКУ НІКЕЛЮ НА ЇХ ШВИДКІСТЬ І ТЕМПЕРАТУРУ ПРИ ХОЛОДНОМУ ГАЗОДИНАМІЧНОМУ НАПИЛЮВАННІ

При отриманні покриттів холодним газодинамічним напилюванням (ХГН) для прискорення й нагрівання частинок використовується високошвидкісний газовий потік. Тому насамперед необхідно розглянути загальні закономірності течії газу і руху частинок у даному потоці, а також натікання його на перешкоду. Оскільки процес ХГН залежить у першу чергу від швидкості частинок, важливо розуміти вплив на неї параметрів процесу (тиску й температури на вході в сопло), характеристик частинок порошку (густини матеріалу, форми й розміру) і геометрії сопла. Швидкість газу обмежує швидкість частинок яку можна досягнути за допомогою установки ХГН. Використання високого тиску газу, довгих сопел і частинок малих розмірів приводить до того, що частинки рухаються зі швидкістю близькою до швидкості газу, яку можна збільшити шляхом застосування газів з малою молекулярною масою, а також нагріванням газу. Унаслідок проведеного аналізу теоретичних та експериментальних методів вивчення процесу холодного напилювання встановлено, що для утворення покриттів швидкість частинок порошку має набутися деякого певного значення що називається критичною швидкістю, яка залежить від їх температури в момент зіткнення й густини матеріалу. Проведено числове моделювання газодинаміки двофазного потоку в соплі установки ХГН і на виході з нього для діапазону температур повітря на вході в сопло від 573 К до 873 К і постійному тиску 1,0 МПа. Досліджено вплив діаметру частинок порошку нікелю на їх температуру та швидкість у момент зіткнення з підкладкою. Моделювання виконано для діапазону діаметрів частинок від 5 до 30 мкм. В подальшому отримані результати можуть бути використані для знаходження оптимального розміру частинок порошку при певних режимах напилювання, розрахунку критичної швидкості частинки, а також для побудови вікна напилювання. Це дасть змогу обирати оптимальні параметри газового потоку на вході в сопло, а саме значення тиску та температури, що гарантовано забезпечать зчеплення частинок з поверхнею підкладки та формування покриттів. Окрім того, отримані результати можуть бути використані для прогнозування властивостей покриттів, а також досягнення максимальних значень коефіцієнту використання порошку.

Ключові слова: холодне газодинамічне напилювання; покриття; параметри напилювання; температура та швидкість частинок; критична швидкість; чисельне моделювання; двофазний потік.

Вступ

Зіткнення частинок з підкладкою може призвести до їх адгезії або відскоку, а також до ерозії поверхні залежно від значень швидкості V_p і температури T_p частинок у момент зіткнення [1]. Зміну параметрів частинок порошку в соплі, на виході з нього, а також перед зіткненням з поверхнею підкладки можна визначити шляхом моделювання, що дає змогу передбачити можливість формування покриттів певного матеріалу, певного розміру частинок і певних параметрів напилювання. Моделювання є важливим етапом розроблення технології та обладнання для ХГН, зокрема етапом проектування й оптимізації надзвукових сопел.

У роботі [2] зазначається, що значення швидкостей і температур для частинок діаметром менше

5 мкм і значення потоку є майже однаковими: різке збільшення швидкостей і різке охолодження в розширній частині сопла. Для частинок діаметром більше 5 мкм зміни швидкостей і температур залежать від часу та їх розміру. Взаємодія частинок з високошвидкісним газовим потоком дає змогу адаптувати різні процеси напилювання для формування покриттів. Так, наприклад, для процесу кінетичного напилювання використовують частинки порошку діаметром більше 50 мкм. Ці частинки мають менші швидкості й більш високі температурами порівняно з процесом холодного газодинамічного напилення, для якого характерними є високі значення швидкостей частинок і низькі температури.

При напилюванні високошвидкісний газовий потік відбивається від поверхні підкладки з утворенням ударної хвилі, з якою взаємодіють частинки

порошку, що знаходяться в потоці. Частинки порошку діаметром менше 5 мкм зазвичай відбиваються ударною хвилею, у той час як для частинок великих діаметрів спостерігається зміна кута відбивання залежно від їх розміру.

У роботі [3] стверджується, що, хоча швидкість частинок є найважливішим параметром при ХГН, вона одна не визначає стану частинок до і в процесі зіткнення. З простого аналізу видно, що імпульс частинки при однакових швидкості та розмірі залежить від густини її матеріалу, а сила удару і тиск, у свою чергу, залежать від імпульсу.

У роботі [4] аналітично оцінюється оптимальний розмір частинок залежно від вхідних параметрів (типу газу, його тиску й температури, густини матеріалу частинок, геометрії сопла тощо). Під оптимальним розуміють такий розмір частинок, при якому вони зштовхуються з перешкодою при максимальній швидкості та/або максимальній температурі. Як показують експерименти, якість покриттів поліпшується зі зростанням швидкості частинок. Разом з тим, слід зазначити, що порошки характеризуються деяким розподілом за розміром, що зазвичай описується нормальним розподілом з відомим середнім розміром частинок і середньоквадратичним відхиленням. Якщо вибрати порошок так, щоб середній розмір частинок дорівнював оптимальному, то деякі з цих частинок (що мають як значно менший від оптимального розмір, так і значно більший) будуть зштовхуватися з поверхнею з дуже малими швидкостями. Тому потрібно вибирати порошки таким чином, щоб найдрібніші й найбільші частинки мали швидкість удару, вищу за критичну.

У роботі [5] автори використовують відносно простий аналіз на основі ізоентропійної газодинамічної моделі [6, 7] і програму FLUENT [8]. В обох випадках спочатку розраховуються енергетичні параметри потоку, а потім – рух частинок. На основі ізоентропійних обчислювань показано, що температура частинок майже не залежить від тиску, але їх швидкість збільшується на 15 %, якщо тиск подвоюється (від 1,5 МПа до 3,0 МПа). Зміна температури газу при постійному тиску 2,5 МПа збільшує швид-

кість частинки на 25 %, якщо подвоюється температура (від 573,15 К до 873,15 К). При високих температурах (вище 793 К) швидкість частинок збільшується слабкіше через зменшення густини газу.

У роботі [9] виконано розрахунок температурно-швидкісних параметрів частинок алюмінію при зіткненні з підкладкою з використанням метода обчислювальної газодинаміки для надзвукового сопла СК-20 установки холодного газодинамічного напилювання (ХГН) низького тиску ДИМЕТ-405. Отримані результати було використано для розрахунку критичної швидкості напилювання.

1. Постановка завдання

Визначення параметрів частинок порошку в каналі сопла, на виході з нього та перед зіткненням з підкладкою є відповідальним етапом для забезпечення якості покриттів при холодному газодинамічному напилюванні. До цих параметрів відносяться швидкість і температура частинки, що безпосередньо впливають на можливість зчеплення її з поверхнею підкладки і фізико-механічні характеристики покриття [10, 11].

У роботі було використано програмний пакет ANSYS FLUENT. Розрахунки виконано для сопла СК-20 (рис. 1) установки ХГН «ДИМЕТ-405».

Початковими даними для моделювання було задано розміри сопла, температура та тиск потоку на вході в сопло, а також матеріал частинок порошку. Дистанція напилювання від вихідного перерізу сопла до підкладки дорівнювала 15 мм. В якості робочого газу було використано повітря з тиском на вході в сопло у всіх випадках 1,0 МПа, і температурою в діапазоні від 573 К до 873 К. Моделювання виконано для частинок порошку нікелю Ni розміром від 5 до 30 мкм. Подача порошку здійснювалася перпендикулярно осі сопла через канал підводу порошку Powder Inlet (рис. 1). Швидкість порошку в точці введення було задано 20 м/с, а температура – 300 К.

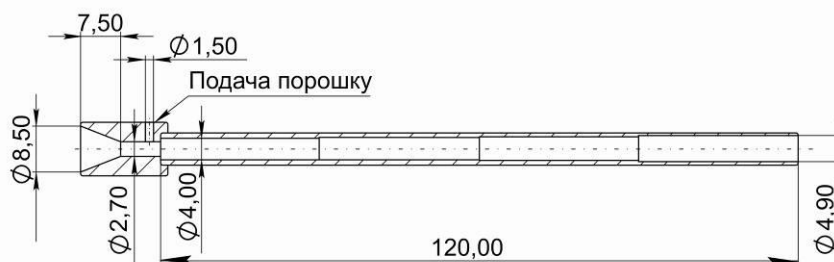


Рис. 1. Сопло СК-20, що було використано для розрахунків

Прискорення повітряно-порошкової суміші до надзвукової швидкості відбувається у розширювальній частині сопла, що складається з чотирьох послідовно розташованих циліндричних секціях (див. рис. 1), після чого потрапляє в вільну зону течії між соплом та підкладкою. Параметри навколишнього середовища взято при нормальних умовах (тиск – 1 атм, температура – 300 К).

2. Основні рівняння, що описують турбулентний потік

Газовий потік при холодному газодинамічному напиленні є стисливим, в'язким і турбулентним. Математична модель, яка є основою моделювання, ґрунтується на системі диференціальних рівнянь Нав'є – Стокса з методом усереднення за Рейнольдсом, а також стандартною (k-ε)-моделлю турбулентності. Основні рівняння для турбулентного потоку наведено нижче [12].

1) Рівняння збереження маси:

$$\frac{d}{dx_j}(\rho_g V_j) = 0, \quad (1)$$

де ρ_g – густина газу;
 V_j – вектор швидкості в j-му напрямку.

2) Рівняння збереження імпульсу:

$$\frac{d}{dx_j}(\rho_g V_i V_j) = -\frac{dp}{dx_i} + \frac{d\tau_{ij}}{dx_i} + \rho_g g_i, \quad (2)$$

де τ_{ij} – напруження;
 g_i – прискорення вільного падіння.

Напруження можна подати у такому вигляді:

$$\tau_{ij} = \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{dV_i}{dx_j} + \frac{dV_j}{dx_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu_t \frac{dV_j}{dx_i} \delta_{ij}, \quad (3)$$

де μ – молекулярна в'язкість;
 $\delta_{ij} = 1$ для $i = j$, в інших випадках $\delta_{ij} = 0$;
 μ_t – в'язкість при турбулентній течії,

$$\mu_t = \rho_g C_\mu \frac{k_t^2}{\varepsilon_t}, \quad (4)$$

де C_μ – константа, $C_\mu = 0,09$;
 k_t – кінетична енергія турбулентності;
 ε_t – розсіювання кінетичної енергії турбулентності, яке можна визначити з (k-ε)-моделі турбулентності.

Для замикання системи рівнянь (1)–(4) зазвичай використовується стандартна (k-ε)-модель турбулентності. Два додаткові рівняння стану містити кінетичну енергію k_t і її розсіювання ε_t . Згідно з FLUENT User Guide [13] запишемо рівняння:

$$\frac{d}{dx_i}(\rho_g V_i k) = \frac{d}{dx_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{dk}{dx_i} \right) + G_k + G_b - \rho_g \varepsilon_t, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx_i}(\rho_g V_i \varepsilon_t) = & \frac{d}{dx_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{d\varepsilon_t}{dx_i} \right) + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon_t}{k_t} (G_k + G_b) - \\ & - G_{2\varepsilon} \rho_g \frac{\varepsilon_t^2}{k_t}, \end{aligned} \quad (6)$$

де $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, σ_k , σ_ε – емпіричні сталі;
 σ_h – турбулентне число Прандтля, $\sigma_h = \mu_t C_p / k_t$;
 G_k – швидкість продукування кінетичної енергії турбулентності:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{dV_j}{dx_i} + \frac{dV_i}{dx_j} \right) \frac{dV_i}{dx_j}, \quad (7)$$

де G_b – утворення турбулентності під дією виштовхувальної сили:

$$G_b = -g_t \frac{\eta_t}{\rho_g \sigma_h} \frac{d\rho_g}{dx_i}. \quad (8)$$

Наявність твердої дисперсної фази в двофазному потоці можна описати з використанням другого рівняння переносу. Траєкторія частинки дисперсної фази визначається інтеграцією балансу сил, що діють на частинку, у лагранжевій системі координат (метод Лагранжа для відстеження траєкторії частинки).

З метою спрощення розрахунків роблять деякі припущення, наприклад: форма частинки – сферична, частинка є твердою й інертною. Розрахунки проводяться для однієї частинки в газовому потоці, взаємодією між частинками нехтують, оскільки об'ємна концентрація частинок є досить малою [14]. Також у розрахунках не враховується сила гравітації, оскільки час перебування частинки в потоці є дуже малим.

Рівняння балансу сил, що діють на частинку, можна записати в такому вигляді [15]:

$$\frac{dV_{p,i}}{dt} = f_D (V_{\infty,i} - V_{p,i}) + \frac{g_i (\rho_p - \rho_\infty)}{\rho_p} + F_i, \quad (9)$$

де $f_D (V_{\infty,i} - V_{p,i})$ – сила опору на одиницю маси частинки.

$$f_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}. \quad (10)$$

Тут Re – відносне число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho_\infty d_p |V_{p,i} - V_{\infty,i}|}{\mu}. \quad (11)$$

Коефіцієнт опору C_D є функцією від відносного числа Рейнольдса:

$$C_D = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{Re} + \frac{\alpha_3}{Re^2}, \quad (12)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – постійні, які застосовуються в деяких діапазонах числа Re .

Об'єднання рівнянь (9) і (12) дає швидкість частинки в кожній точці вздовж траєкторії, причому сама траєкторія описується таким чином:

$$\frac{dx_i}{dr} = V_{p,i}. \quad (13)$$

3. Результати числового моделювання

З полів швидкостей отриманих при моделюванні видно, що прискорення газу відбувається в області критичного перерізу сопла та початку розширної частини сопла. У звужуваній частині сопла температура газу зменшується приблизно до 80 % від початкової температури на вході в сопло. Подальше зниження температури газу в розширній частині сопла залежить від коефіцієнта розширення сопла.

Результати впливу зміни температури газу на вході в сопло на швидкість і температуру частинок Ni розміром від 5 мкм до 30 мкм, отримані з допомогою числового моделювання, зображено на рисунках 2 і 3.

Як видно з результатів експериментів, зміна значень температури газу на вході в сопло приводить до зміни температурно-швидкісних параметрів частинок порошку, що може бути пояснено за допомогою рівняння

$$V = \sqrt{\gamma RT}, \quad (14)$$

де R – газова постійна;

γ – молекулярна маса газу;

T – температура газу.

Результати показують, що температура газу на вході впливає на температуру і швидкість частинок. Збільшення швидкості газу призводить до збільшення швидкості частинок у цьому потоці. Наприклад, для частинки Ni діаметром 15 мкм збільшення температури з 573 К до 873 К призводить до збільшення швидкості удару з 357 м/с до 426,8 м/с і температури удару частинки з 388,2 К до 512 К при постійному тиску 1 МПа.

Результати, отримані методом обчислювальної газодинаміки можна порівняти з такими, що можуть бути розраховані з використанням одновимірної газодинамічної моделі [16]. Авторами встановлено, що різниця в значеннях, отриманих числовим моделюванням і шляхом розрахунків одновимірної ізое-

нтропійної моделі, становила менше 10 %. Це можна пояснити тим, що ізентропійна модель розглядає потік лише вздовж осі сопла, без урахування теплообміну з соплом і втрат на тертя об внутрішні стінки, що призводить до отримання завищених результатів розрахунків.

Висновки

Встановлено вплив діаметру частинок порошку нікелю на їх температуру й швидкість при зіткненні з підкладкою при різних значеннях температури повітря й постійному робочому тиску.

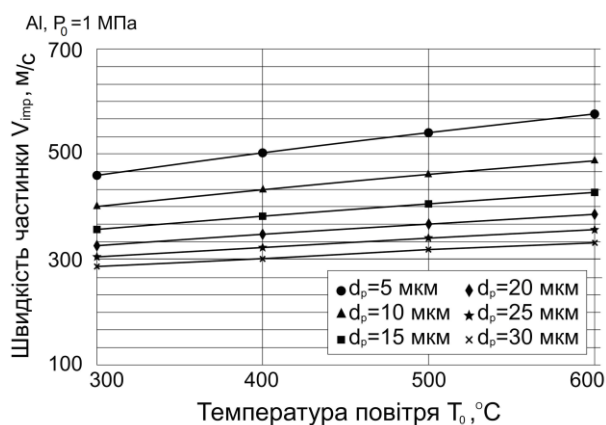


Рис. 2. Вплив діаметру частинок нікелю на їх швидкість при зіткненні з підкладкою

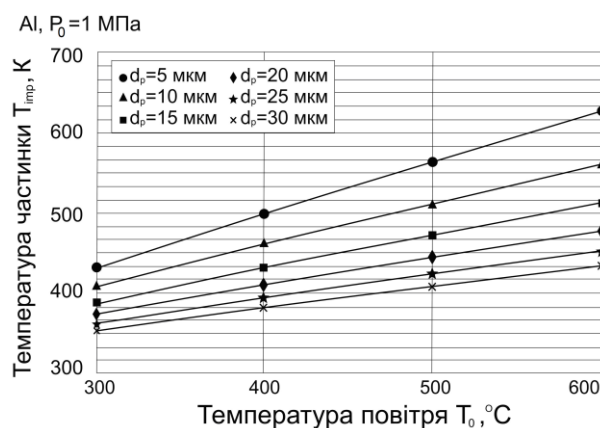


Рис. 3. Вплив діаметру частинок нікелю на їх температуру при зіткненні з підкладкою

Числове моделювання виконано для діаметрів частинок від 5 до 30 мкм. Зі збільшенням робочої температури газу на вході в сопло збільшується швидкість потоку в розширювальній частині сопла, а разом і з тим швидкість і температура частинок порошку, що знаходиться в даному потоці. Частинки меншого діаметри перед зіткненням із підкладкою мають більші значення швидкостей і температур в порівнянні з частинками більшого діаметри при однакових умовах напилування.

Отримані результати в подальшому можуть бути використані для розрахунку критичної швидкості напилювання, необхідної для утворення покриття, оптимізації процесу напилювання та розроблення технологічних рекомендацій з напилювання.

Література

1. Холодное газодинамическое напыление [Текст] / А. П. Алхимов и др. ; под ред. В. М. Фомина. – Новосибирск : Физматлит. – 2010. – 536 с.
2. A Fundamental Study of Kinetic Spray Process [Text] / T. Han et al. // *Thermal Spray Solutions 2004 : Advances in Technology and Application : Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf. & Expos., Osaka, Japan, May 10–12, 2004.* Novelty, 2004. – P. 363–370.
3. Kinetic Power Compaction Applying the Cold Spray Process. A Study on Parameters [Text] / J. Vlcek et al. // *New Surfaces for a New Millennium : Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf., Novelty, OH. Novelty, 2001.* – P. 417–422.
4. Dykhuizen, R. C. Optimizing the Cold Spray Process [Text] / R. C. Dykhuizen, R. A. Nelser // *Advancing the Science and Applying the Technology : Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf., Orlando, FL, May 5–8, 2003.* Orlando, 2003. – P. 117–121.
5. Stoltenhoff, T. Cold Spraying – State of the Art and Applicability [Text] / T. Stoltenhoff, J. Voyer, H. Kreye // *ITSC'2002 : Intern. Thermal Spray Conf. : Lectures and Posters presented at the Conf., Essen, Germany, Mar. 4–6, 2002.* Dusseldorf, 2002. – P. 366–374.
6. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying [Text] / T. Schmidt, H. Assadi, F. Gärtner [et al.] // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2009. – Vol. 18, iss. 5. – P. 794–808. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7.
7. Optimization of the Cold Spray Process [Text] / T. Stoltenhoff et al. // *New Surfaces for a New Millennium : Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf., Novelty, OH. Novelty, 2001.* – P. 409–416.
8. The Cold Spray Process and its Potential for Industrial Applications [Text] / F. Gartner et al. // *Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf., Basel, Switzerland, May 2–4, 2005.* Basel, 2005. – P. 158–164.
9. Розрахунок температурно-швидкісних параметрів частинок при холодному газодинамічному напилюванні [Текст] / О. В. Шорінов та ін. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* – 2019. – № 7(159). – С. 139–144. DOI: 10.32620/akt.2019.7.20.
10. On Some Aspects of Gas Dynamics of the Cold Spray Process [Text] / V. F. Kosarev et al. // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2003. – Vol. 12, iss. 2. – P. 265–281.
11. Dykhuizen, R. Gas Dynamic Principles of Cold Spraying of Cold Spray [Text] / R. Dykhuizen, M. Smith // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 1998. – Vol. 7, Iss. 2. – P. 205–212.
12. Rajaratnam, N. Turbulent Jets [Text] / N. Rajaratnam. – Amsterdam : Elsevier, 1976. – 304 p.

13. FLUENT. 4.4.4 User Guide [Text] // *Fluent Inc., SimScale: GMBH, Munich, 1996.* – 1146 p.

14. Долматов, А. И. Моделирование распределения частиц в двухфазном потоке детонационно-плазменной установки [Текст] / А. И. Долматов, К. А. Данько, Ю. А. Невеишин // *Металлофизика и новейшие технологии.* – 2014. – Т. 36, № 11. – С. 1533–1546. DOI: 10.15407/mfint.36.11.1533.

15. Stoltenhoff, T. An analysis of the cold spray process and its coatings [Text] / T. Stoltenhoff, H. Kreye, H. J. Richter // *Journal of Thermal Spray Technology.* – 2002. – Vol. 11, Iss. 4. – P. 542–550. DOI: 10.1361/105996302770348682.

16. Моделивання двофазного потоку при холодному газодинамічному напилюванні [Текст] / А. О. Волков та ін. // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* – 2020. – № 8(168). – С. 153–159. DOI: 10.32620/Akt.2020.8.20

References

1. Alhimov, A. P., Klinkov S. V., Kosarev V. F., Fomin V. M. *Holodnoe gazodinamicheskoe napylenie [Cold Spray].* Novosibirsk, Fizmatlit Publ., 2010. 536 p. (In Russian)
2. Han, T., Zhao, Z., Gillispie, B., Smith, J. A. Fundamental Study of Kinetic Spray Process. *Thermal Spray Solutions 2004 : Advances in Technology and Application : Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf. & Expos., Osaka, Japan, May 10–12, 2004.* Novelty, 2004, pp. 363–370.
3. Vlcek, J., Huber, H., Voggenreiter, H., Fischer, A., Lugscheider, E., Hallen, H., Pache, G. Kinetic Powder Compaction Applying the Cold Spray Process. A Study on Parameters. *New Surfaces for a New Millennium : Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf., Novelty, OH. Novelty, 2001,* pp. 417–422.
4. Dykhuizen, R. C., Nelser, R. A. Optimizing the Cold Spray Process. *Advancing the Science and Applying the Technology : Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf., Orlando, FL, May 5–8, 2003.* Orlando, 2003, pp. 117–121.
5. Stoltenhoff, T., Voyer, J., Kreye, H. Cold Spraying – State of the Art and Applicability. *ITSC'2002 : Intern. Thermal Spray Conf. : Lectures and Posters presented at the Conf., Essen, Germany, Mar. 4–6, 2002.* Dusseldorf, 2002, pp. 366–374.
6. Schmidt, T., Assadi, H., Gärtner, F., Richter, H., Stoltenhoff, T., Kreye, H., Klassen, T. From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology,* 2009, vol. 18, no. 5, pp. 794–808. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7
7. Stoltenhoff, T., Kreye, H., Richter, H.J., Assadi, H. Optimization of the Cold Spray Process. *New Surfaces for a New Millennium : Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf., Novelty, OH. Novelty, 2001,* pp. 409–416.
8. Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Schmidt, T., Kreye, H. 10. The Cold Spray Process and its Potential for

Industrial Applications. *Proc. of the Intern. Thermal Spray Conf.*, Basel, Switzerland, May 2–4, 2005, pp. 158–164.

9. Shorinov, O., Volkov, A., Markovych, S., Dolmatov, A. Rozrakhunok temperaturno-shvydkisnykh parametriv chastynok pry kholodnomu hazodynamichnomu napylyuvanni [Calculation of particles temperature and velocity of cold spraying]. *Aviacijno-kosmichna texnika i texnologiya – Aerospace technic and technology*, 2019, vol. 7(159), pp. 139–144. DOI: 10.32620/aktt.2019.7.20 (In Ukrainian).

10. Kosarev, V. F., Klinkov, S. V., Alkhimov, A. P., Papyrin, A. N. On Some Aspects of Gas Dynamics of the Cold Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2003, vol. 12, no. 2, pp. 265–281.

11. Dykhuizen, R., Smith, M. Gas Dynamic Principles of Cold Spraying of Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, vol. 7, no. 2, pp. 205–212.

12. Rajaratnam, N. *Turbulent Jets*. Amsterdam, Elsevier, 1976. 304 p.

13. FLUENT. 4.4.4 User Guide. Fluent Inc., SimScale: GMBH, Munich, 1996. 1146 p.

14. Dolmatov, A. I., Dan'ko, K. A., Neveshkin, Ju. A. Modelirovanie raspredelenija chastic v dvufaznom potoke detonacionno-plazmennoj ustanovki [Modelling of Distribution of Particles in a Two-Phase Flow of Detonation-Plasma Device]. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 2014, vol. 36, no. 11, pp. 1533–1546. DOI: 10.15407/mfint.36.11.1533 (In Russian).

15. Stoltenhoff, T., Kreye, H., Richter, H. J. An analysis of the cold spray process and its coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2002 vol. 11, no. 4, pp. 542–550. DOI: 10.1361/105996302770348682.

16. Volkov, A., Shorinov, O., Dolmatov, A., Markovych, S. Modelyuvannya dvofaznogo potoku pry kholodnomu gazodynamichnomu napylyuvanni [Simulation of two-phase flow in cold gas-dynamic spraying]. *Aviacijno-kosmichna texnika i texnologiya – Aerospace technic and technology*, 2020, no. 8(168), pp. 153–159. DOI: 10.32620/Aktt.2020.8.20 (In Ukrainian).

Надійшла до редакції 28.06.2021, розглянута на редколегії 16.08.2021

ВЛИЯНИЕ ДИАМЕТРА ЧАСТИЦ ПОРОШКА НИКЕЛЯ НА ИХ СКОРОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРУ ПРИ ХОЛОДНОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

А. В. Шоринов, С. А. Полювяный

При получении покрытий холодным газодинамическим напылением (ХГН) для ускорения и нагрева частиц используется высокоскоростной газовый поток. Поэтому прежде всего необходимо рассмотреть общие закономерности течения газа и движения частиц в данном потоке, а также натекание его на преграду. Поскольку процесс ХГН зависит в первую очередь от скорости частиц, важно понимать влияние на нее параметров процесса (давления и температуры на входе в сопло), характеристик частиц порошка (плотности материала, формы и размера) и геометрии сопла. Скорость газа ограничивает скорость частиц, которую можно достичь с помощью установки ХГН. Использование высокого давления газа, длинных сопел и частиц малых размеров приводит к тому, что частицы движутся со скоростью, близкой к скорости газа, которую можно увеличить путем применения газов с малой молекулярной массой, а также его нагревом. В результате проведенного анализа теоретических и экспериментальных методов изучения процесса холодного напыления установлено, что для образования покрытий скорость частиц порошка должна достичь некоторого определенного значения, которая называется критической скоростью, и зависит от их температуры в момент столкновения с преградой, а также плотности материала частиц. Проведено численное моделирование газодинамики двухфазного потока в сопле установки ХГН и на выходе из него для диапазона температур воздуха на входе в сопло от 573 К до 873 К и постоянном давлении 1,0 МПа. Исследовано влияние диаметра частиц порошка никеля на их температуру и скорость в момент столкновения с подложкой. Моделирование выполнено для диапазона диаметров частиц от 5 до 30 мкм. В дальнейшем полученные результаты могут быть использованы для нахождения оптимального размера частиц порошка при определенных режимах напыления, расчета критической скорости частиц, а также для построения окна напыления. Это позволит выбирать оптимальные параметры газового потока на входе в сопло, а именно значения давления и температуры, которые гарантированно обеспечат сцепление частиц с поверхностью подложки и формирование покрытий. Также полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования свойств покрытий, а также достижения максимальных значений коэффициента использования порошка.

Ключевые слова: холодное газодинамическое напыление; покрытия; параметры напыления; температура и скорость частиц; критическая скорость; численное моделирование; двухфазный поток.

INFLUENCE OF PARTICLE SIZE OF NICKEL POWDER ON THEIR VELOCITY AND TEMPERATURE IN COLD SPRAYING

O. Shorinov, S. Polyvanyi

To deposit coatings in cold gas-dynamic spraying (CS), a high-speed gas flow is used to accelerate and heat particles. Therefore, first of all, it is necessary to consider the general laws of the gas flow and the movement of

particles in the flow, as well as its interaction with the substrate. Due to the CS process depends primarily on the particle velocity, it is important to understand the effect of the process parameters (pressure and temperature at the nozzle inlet), the characteristics of the powder particles (material density, shape, and size), and the geometry of the nozzle. The gas velocity limits the particle velocity that can be achieved with the CS process. Utilization of high gas pressure, long nozzles, and small particles lead to the fact that the particles move at a velocity close to the velocity of the gas, which can be increased by using gases with low molecular weight, as well as heating it. As a result of the analysis of theoretical and experimental methods for studying the cold spraying process, it was found that for coating formation velocity of powder particles needs to obtain a certain value (critical velocity), which depends on particle temperature at the impact, and density of the particle material. Numerical simulation of gas dynamics of a two-phase flow in CS nozzle and at the outlet from it for the range of air temperatures from 573 K to 873 K and constant pressure of 1,0 MPa has been carried out. The influence of the diameter of nickel powder particles on their temperature and velocity at impact was investigated. Numerical simulations were performed for a range of particle diameters from 5 to 30 μm . In the future, the results obtained can be used to find the optimal size of the powder particles under certain spraying conditions, to calculate the critical particle velocity, and also to develop the window of deposition. This will make it possible to select the optimal parameters of the gas flow at the nozzle inlet (pressure and temperature), which are guaranteed to ensure the adhesion of particles to the substrate and the formation of coatings. Also, the results obtained can be used to predict the properties of coatings, as well as to achieve maximum deposition efficiency of the CS process.

Keywords: cold gas-dynamic spraying; coating; spraying parameters; temperature and particle velocity; critical velocity; numerical simulation; two-phase flow.

Шорінов Олександр Володимирович – канд. техн. наук, старший викладач кафедри технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Поливняний Сергій Олександрович – начальник цеху АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

Oleksandr Shorinov – PhD, Senior Lecturer of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: shorinov1@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5057-6679.

Serhii Polyvianyi – Workshop chief at JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: sergeypolyvanij@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0558-1353.