

УДК 621.452.32.03: 669.721.5: 621.793.7

doi: 10.32620/akt.2020.8.20

А. О. ВОЛКОВ, О. В. ШОРИНОВ, А. І. ДОЛМАТОВ, С. Є. МАКРОВИЧ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ ПРИ ХОЛОДНОМУ ГАЗОДИНАМІЧНОМУ НАПИЛЮВАННІ

Допрацьовано одновимірну газодинамічну модель процесу розгону і підігріву частинок з урахуванням затопленого простору. Один цикл прискорення частинок газовим потоком можна розділити на три періоди: змішування потоку газу і порошку; рух і прискорення частинок в частини сопла, що розширюється; рух струменя з частинками в затопленому просторі (в тому числі відскок від підкладки). Відомо, що формування покриття при ХГН залежить від нормальної складової швидкості частинок порошку відносно поверхні на яку проводиться напилення. Для кожного матеріалу існує своє значення критичної швидкості, при якій починається процес формування покриттів. При швидкостях частинок вище критичної відбувається їх зчеплення з підкладкою й утворення покриття, зумовлене пластичною деформацією частинок, а при швидкостях нижче критичної спостерігається ерозія поверхні або напилювання з низькою ефективністю за певних умов. Зважаючи на те, що однією з особливостей процесу холодного газодинамічного напилення (ХГН) є вельми малі дистанції між сопловим апаратом і підкладкою, що призводить до виникнення зворотного течії газового потоку (ударної хвилі), відбитого від підкладки. Виникнення ударної хвилі змінює кут напилення, відхиляє траєкторію частинок напилюваного порошку та значно гальмує їх швидкість, що призводить до необхідності більш детального аналізу затопленого простору. Виконано розрахунок температурно-швидкісних параметрів частинок алюмінію і нікелю розміром 25 мкм при зіткненні з підкладкою для надзвукового сопла СК-20 установки ХГН низького тиску ДИМЕТ-405. Незважаючи на те, що одновимірною ізоентропійною газодинамічною моделлю, яка зазвичай використовується для розрахунку параметрів потоку, описує його лише вздовж осі сопла, без урахування теплообміну з соплом і втрат на тертя об внутрішні стінки, що призводить до отримання завищених результатів розрахунків, її використання дає змогу попередньо оптимізувати геометрію каналу сопла та технологічний процес напилення. Математичне моделювання динаміки двофазного потоку процесу холодного напилювання виконано з використанням програмного пакета MATLAB.

Ключові слова: холодне газодинамічне напилювання; покриття; параметри напилювання; температура та швидкість частинок; критична швидкість.

Вступ

Стаття присвячена одному з основних напрямів досліджень холодного газодинамічного напилювання (ХГН) – моделюванню динаміки двофазного потоку.

Серед усіх методів газотермічного напилювання покриттів технологія ХГН має низку переваг, а саме відсутність окиснення, високих температур, фазових перетворень матеріалів покриття й підкладки, і може бути успішно застосована для формування захисних та відновлювальних покриттів на деталях. Метод полягає в прискоренні надзвуковим газовим потоком частинок напилюваного порошку, що перебувають у твердій фазі, подальшому їх зіткненні з поверхнею підкладки й утворенні покриття з властивостями близькими або перевищуючими властивості підкладки. Основним фізичним механізмом ХГН є високошвидкісна деформація частинок, що напилюються, при ударі, що спричиняє інтенсивну

зсувну плинність матеріалу по межах контакту й утворення адгезійно-когезійних зв'язків [1].

Унаслідок проведеного аналізу теоретичних та експериментальних методів вивчення процесу холодного газодинамічного напилювання встановлено, що для утворення покриттів швидкість частинок напилюваного порошку має набути деякого певного значення, а саме критичної швидкості, що залежить від їх температури в момент зіткнення й густини матеріалу [2].

Розроблення моделей для розрахунку температур та швидкостей частинок при напилюванні є важливим і необхідним етапом оптимізації процесу холодного газодинамічного напилювання та розроблення технологічних процесів нанесення покриттів.

1. Постановка завдання

Один цикл прискорення частинок газовим потоком можна розділити на три періоди: змішування

поток газу і порошку; рух і прискорення частинок в частині сопла, що розширюється; рух струменя з частинками в затопленому просторі (в тому числі відскок від підкладки).

Кожен із цих процесів має свої особливості, і може бути охарактеризований кількома основними параметрами. Аналіз цих характеристик за допомогою фізичного та чисельного моделювання дозволяє їх оптимізувати.

Швидкість газу і частинок змінюються в кожному періоді прискорення. Можна також бачити, що існує значна різниця між швидкостями газу і частинок через зміни сили лобового опору.

Об'ємний вміст твердої фракції в газопорошковому струмені в процесі холодного газодинамічного наплення високого тиску знаходиться в діапазоні від 10^{-5} до 10^{-6} , в той час як для систем холодного газодинамічного наплення низького тиску знаходиться в діапазоні від 10^{-4} до 10^{-5} . З цієї причини параметри газопорошкового струменя значно змінюються і в значній мірі залежать від конкретної системи для процесу холодного газодинамічного наплення. Наприклад, в системах низького тиску тертя між частинками грає все більш важливу роль. Разом з тим, відсутність моделювання та експериментальних даних не дозволяє точно оцінити такі специфічні залежності параметрів.

Дослідники традиційно розраховують прискорення в соплі без урахування тертя частинок [3]. Насправді це може бути виправданим, якщо вміст твердої речовини є низьким, і відношення довжини сопла до його діаметру відносно мале. В роботі [4] детально описані дві фрикційні моделі течії двофазного потоку в соплі, які можуть бути застосовані для розрахунків прискорення частинок в разі великого об'ємного вмісту твердої фракції. У першій моделі використовуються коефіцієнти тертя для твердих частинок. Використовуваний метод часто застосовується в інженерних розрахунках пневмотранспорту, припускаючи поведінку фази частинок подібно рідини. На жаль, застосування цього методу призводить до розбіжностей між розрахунковими і вимірюваними градієнтами тиску, які досягали і навіть перевищували 40 %. У другій моделі сили тертя між твердими тілами враховуються в припущенні, що частинки набувають радіальні компоненти швидкості під впливом нецентрального зіткнення з частинками різних розмірів. Цей радіальний рух частинок призводить до зіткнення частинок зі стінкою, що в свою чергу призводить до часткових втрат часткою осової компоненти імпульсу. Ця втрата імпульсу розглядається як втрата на тертя. Основним недоліком цієї моделі є те, що вона не бере до уваги зіткнення між частинками однакового розміру. Однак, коли цей спосіб застосовується до процесу холодно-

го газодинамічного наплення порошку для частинок різного розміру складова цієї похибки передбачається мінімальною.

Завдяки моделюванню можна отримати більш детальну й точну інформацію про швидкісні й температурні поля газового потоку як у соплі, так і на виході з нього, а також температурно-швидкісні параметри частинки для розробки нового обладнання та технології нанесення покриттів.

2. Одновимірна газодинамічна модель

Прийнявши допущення, що потік в соплі розглядається, як ідеальний газ з постійним значенням теплоємності, а течія газу одновимірна та ізоентропічна (тобто процес адіабатний та без урахування сил тертя), можна скористатися класичними рівняннями механіки рідини і газу для визначення енергетичних параметрів потоку в соплі (швидкості, температури, тиску, числа Маха і т.д.).

Для визначення властивостей надзвукового потоку, одержуваних при проходженні через стандартне сопло СК-20 установки ДИМЕТ його внутрішній діаметр був визначений і значення координати "Y" розглядається як радіус сопла, а значення координати "X" як відстань від критичного перерізу сопла до його вихідного перерізу. Щоб визначити число Маха уздовж сопла, вирішувалися співвідношення площа-число Маха [5]

$$\frac{A}{A^*} = f_A(M) = \frac{1}{M} \left[\frac{2 + (\gamma - 1)M^2}{\gamma + 1} \right]^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}}, \quad (1)$$

де A – площа сопла в даній точці;

A^* – площа критичного перерізу сопла;

M – число Маха, рівне одиниці в критичному перерізі;

γ – коефіцієнт питомої теплоємності.

Після розрахунку числа Маха по всій довжині від критичного перетину сопла до його виходу, розраховується щільність газу ρ_0 за допомогою рівняння (2),

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0}, \quad (2)$$

де P_0 – тиск гальмування;

T_0 – температура гальмування;

R – універсальна газова стала.

За допомогою отриманих значень числа Маха і щільності газу, використовуючи рівняння (3) – (5), розраховуються температура T і тиск P потоку,

$$\frac{P}{P_0} = f_P(M) = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{-1}{\gamma}}, \quad (3)$$

$$\frac{T}{T_0} = f_T(M) = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{-1}, \quad (4)$$

$$\frac{P}{P_0} = f_P(M) = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{-\gamma}{\gamma-1}}, \quad (5)$$

де величини з "0" – значення параметрів гальмування.

Швидкість звуку a і швидкість газу v розраховується за формулами

$$a = \sqrt{kRT}, \quad (6)$$

$$v = aM. \quad (7)$$

Оскільки розрахунковий тиск на виході сопла, як правило, менше тиску навколишнього середовища, потрібна проста перевірка, щоб переконатися, що дане рішення можливе:

$$\frac{P_{уд}}{P_{вих}} = \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_{вих}^2 - \frac{\gamma-1}{\gamma+1}, \quad (8)$$

де $P_{уд}$ – тиск удару на виході, який було б отримано при виникненні ударної хвилі на виході з сопла;

індекс "вих" – значення параметрів на виході сопла.

Якщо $P_{уд}$ дорівнює тиску навколишнього середовища, на виході з сопла виникає ударна хвиля. Якщо $P_{уд}$ менше тиску навколишнього середовища, ударна хвиля виникає десь всередині сопла, і подальший дозвуковий потік проходить через ударну хвилю, так що $P_{вих}$ дорівнює тиску навколишнього середовища. Нормальні умови роботи для сопел в процесі холодного газодинамічного наплення вимагають, щоб $P_{вих}$ було менше, ніж тиск навколишнього середовища, а $P_{уд}$ більше, ніж тиск навколишнього середовища. У цьому випадку потік розширюється, і всі розрахункові умови представляють реальні умови всередині сопла. Після виходу з сопла потік сповільнюється – це уповільнення несуттєво для процесу холодного газодинамічного наплення, як для інших процесів термічного наплення, через коротких дистанцій між виходом сопла і підкладкою.

В'язкість газу μ розраховується через сталу Сазерленда C (120 К для повітря), а контрольна в'язкість μ_k при контрольній температурі T_k (рівняння 9),

$$\mu = \mu_k \frac{T_k + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_k}\right)^{\frac{3}{2}}. \quad (9)$$

Описана вище модель не охоплює третю частину циклу руху частинок – рух струменя з частинками в затопленому просторі. Для повного опису руху частинок матеріалу від входу в сопло і до підкладки спочатку необхідно описати рух газового потоку на ділянці від моменту виходу з сопла до підкладки включно. Як базову використовували модель, описану в [6, 7] і відображену схемою на рисунку 1, де $L_r = (1 + 6)L_b$; L_b – довжина періодичної структури (хвилі); l – положення точки відбиття падаючого стрибка ущільнення; L_n – відстань від зрізу сопла до підкладки; $L_{дз}$ – довжина ділянки дозвукової течії струменя; D – діаметр сопла.

Модель течії складається з:

а) газодинамічної надзвукової ділянки потоку L_r , на якій швидкість $v_{г.сз}$ і температуру $T_{г.сз}$ газу приймають постійними;

б) ділянка дозвукової течії потоку до підкладки, її довжина

$$L_{дз} = L_n - L_r.$$

Подальші розрахунки виконані за методикою [7]. L_r функція числа Маха для газового потоку на зрізі сопла M_0 і діаметра сопла D (10):

$$L_r = D(4,2 + 1,1M_0^2). \quad (10)$$

Діаметр сопла на виході $D = 4,9$ мм (СК-20), і числа Маха (11):

$$M_0 = \frac{v}{a} = \frac{v}{\sqrt{kRT}}, \quad (11)$$

отримуємо $M_0 = 1,55$, $L_r = 0,0335$ (м) – для сопла СК-20.

Швидкість і температуру газового потоку на газодинамічній ділянці потоку можемо вважати постійними [7]. За межами цієї ділянки значення температури та швидкості газу, внаслідок збільшення інтенсивності взаємодії з навколишнім повітрям, починають змінюватися істотно.

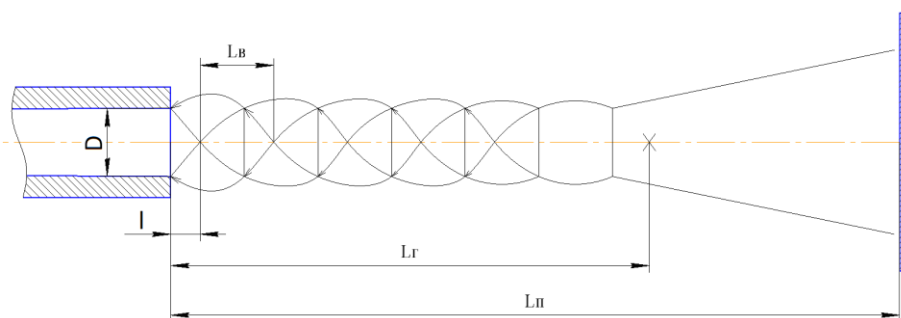


Рис. 1. Модель руху газового потоку на ділянці від виходу з сопла до підкладки

Зміна швидкості і температури газового потоку за зрізом сопла можуть бути описані з досить високою точністю емпіричними співвідношеннями (12) та (13) [7]:

$$\frac{v}{v_0} = 1 - \exp\left(\frac{\alpha}{1 - x/L_{\text{нз}}}\right), \quad (12)$$

$$\frac{T - T_{\text{окр}}}{T_0 - T_{\text{окр}}} = 1 - \exp\left(\frac{\beta}{1 - x/L_{\text{нз}}}\right), \quad (13)$$

де x – відстань по осі струменя від зрізу сопла;

α і β – експериментальні коефіцієнти (в даних розрахунках можна прийняти $\alpha = 0,85$, $\beta = 1,25$ [7]).

3. Розрахунок швидкості і температури частинок

Для визначення швидкості частинок використовується диференціальне рівняння (14) [9, 10], яке вирішується методом кінцевих різниць,

$$V_p \frac{dV_p}{dx} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho(v - V_p)|v - V_p|}{\rho_p d_p}, \quad (14)$$

де V_p – швидкість частинки;

C_d – коефіцієнт лобового опору частинки;

ρ_p – густина частинки;

d_p – діаметр частинки.

Для розрахунку температури частинок використовуються наступні рівняння (15) – (20) [9],

$$\rho_p V_p C_p \frac{dT_p}{dx} = Nu \frac{6\lambda}{d_p^2} (T - T_p), \quad (15)$$

$$Nu = 2a + 0.459b Re_p^{0.55} Pr^{0.33}, \quad (16)$$

$$a = \exp(-M_p)(1 + 17M_p / Re_p)^{-1}, \quad (17)$$

$$b = 0.666 + 0.333 \exp(-17M_p / Re_p), \quad (18)$$

$$Re_p = (v - V_p) \rho_d / \mu, \quad (19)$$

$$M_p = (v - V_p) / a, \quad (20)$$

де T_p – температура частинки;

Nu – число Нуссельта;

λ – довжина хвилі між двома сусідніми вершинами поширення струменя (в нашому випадку 6 мм);

Re_p – число Рейнольдса частинки;

M_p – число Маха частинки.

Результати визначення температурно-швидкісних параметрів частинок порошку перед зіткненням з підкладкою для серійного сопла СК-20 отримані в середовищі MATLAB [11]. представлені на рисунках 2 – 3.

Представлена модель описує потік тільки уздовж осі сопла і не враховувала вплив тертя на стінках сопла, так як розглядалося ідеальний варіант надзвукової течії. У реальній течії частина газового струменя, що протікає біля стінок сопла, має менші значення швидкості в результаті тертя [12].

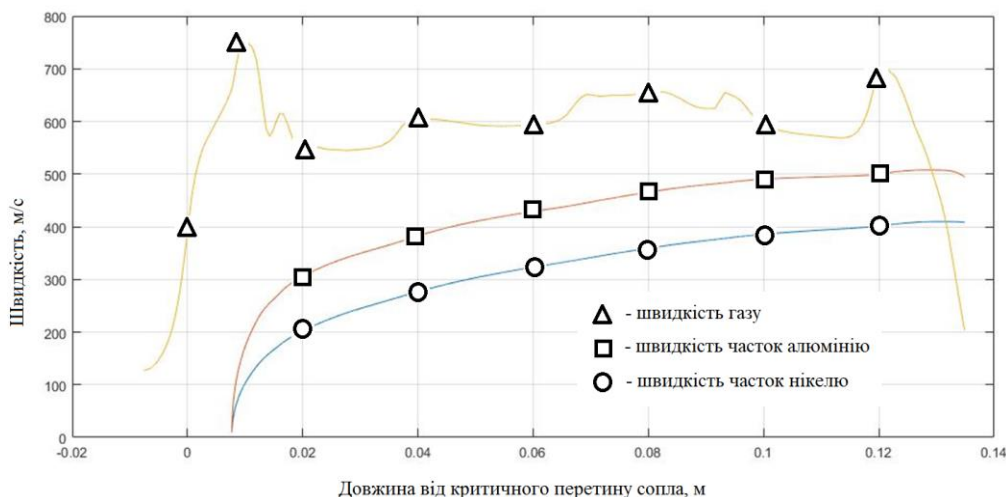
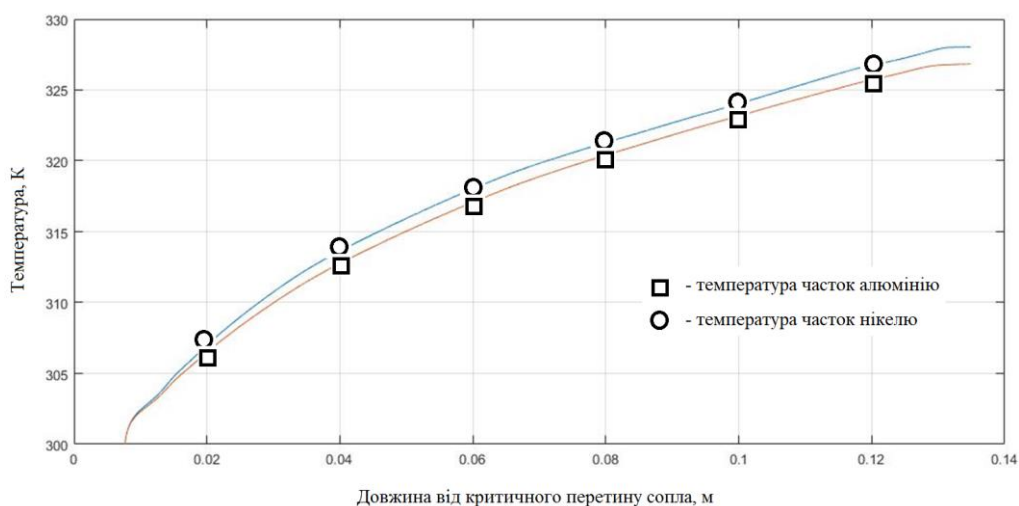
Висновки

Для отримання результатів температурно-швидкісних параметрів частинок у соплі, на виході з нього та при натіканні на підкладку була допрацьована одновимірною газодинамічна модель процесу розгону і підігріву частинок з урахуванням затопленого простору. Виконано розрахунок температурно-швидкісних характеристик частинок алюмінію і нікелю розміром 25 мкм в момент зіткнення з підкладкою для стандартної геометрії каналу надзвукового сопла (СК-20) при початкових умовах процесу - температурі 723 К і тиску 1,0 МПа

Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними по визначенню швидкості і температури потоку показали, що теоретичні розрахунки відрізняються від експериментальних не більше ніж на 10 %, що пояснюється тим, що при розрахунках не враховувалися втрати на тертя об стінки сопла, не враховувався теплообмін потоку з соплом і описувався потік тільки уздовж осі сопла.

Література

1. Холодное газодинамическое напыление [Текст] / А. П. Алхимов и др. ; под ред. В. М. Фомина. – Новосибирск : Физматлит. – 2010. – 536 с.
2. 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.
3. Rudinger, G. Fundamentals of Gas-Particle Flow [Text] / G. Rudinger // Handbook of Powder Technology, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. – 1980. – Vol. 2. – 156 с.
4. Eskin, D. An engineering model of particulate friction in accelerating nozzles [Text] / D. Eskin, S. Voropaev // Powder Technol. – 2004. – Vol. 145. – P. 203–212.
5. 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.
6. Евдокименко, Ю. И. Энергетическая эффективность горелок для высокоскоростного газопламенного напыления [Текст] / Ю. И. Евдокименко, В. М. Кисель, Г. А. Фролов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 7 (84). – С. 12–17.

Рис. 2. Швидкість газу (повітря) і частинок Al та Ni при $T_0=450$ °C та $P_0=1,0$ МПа для сопла СК-20Рис. 3. Температура частинок Al та Ni при $T_0=450$ °C та $P_0=1,0$ МПа для сопла СК-20

7. Вопнерук, А. А. Совершенствование технологии высокоскоростного газопламенного напыления износостойких покрытий со структурой метастабильного аустенита [Текст]: дис. канд. техн. наук. / Вопнерук, А. А. ; Урал. федер. ун-т им. Б. Н. Ельцина. – Екатеринбург, 2010. – 178 с.

8. Математическая модель сверхзвукового воздушно-плазменного напылений [Текст] / С. И. Головин, В. А. Аверченко, Л. Г. Попович и др. // Сварочное производство. – 2008. – № 2. – С. 16–22.

9. Cold Spray Technology [Text] / A. Papyrin et al. – Amsterdam : Elsevier, 2006. – 336 p.

10 Cold Gas Dynamic Manufacturing: a Non-Thermal Approach to Freeform Fabrication [Text] / J. Pattison et al. // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47 (3–4). – P. 627–634.

11. Matlab Documentation, TheMathWorks Inc. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mathworks.com>. – 12.05.2020.

12. Anderson, John D. Modern Compressive Flow by Anderson [Text] / D. Anderson John. – McGraw-Hill, 2002. – 784 p.

References

1. Alhimov, A. P., Klinkov, S. V., Kosarev, V. F., *Holodnoe gazodinamicheskoe napylenie [Cold Spray]*; edited by V. M. Fomina. Novosibirsk, Fizmatlit, 2010. 536 p.

2. Kosarev, V. F., Alhimov, A. P., Klinkov, A. N. On Some Aspects of Gas Dynamics of the Cold Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2003, vol. 12, iss. 2, pp. 265–281. DOI: 10.1361/105996303770348384.

3. Rudinger, G. Fundamentals of Gas-Particle Flow. *Handbook of Powder Technology*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 1980, vol. 2. 156 p.

4. Eskin, D., Voropaev, S. An engineering model of particulate friction in accelerating nozzles. *Powder Technol*, 2004, vol. 145, pp. 203–212.

5. Dykhuizen, R., Smith, M. Gas Dynamic Principles of Cold Spraying of Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, vol. 7, iss. 2, pp. 205–212.

6. Evdokimenko, Ju. I., Kisel', V. M., Frolov, G. A. Jenergeticheskaia jeffektivnost' gorelok dlja vysokoskorostnogo gazoplamnennogo napylenija [Energy efficiency burners for high-speed flame spraying]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2011, no 7 (84), pp. 12–17.

7. Vopneruk, A. A. *Sovershenstvovanie tehnologii vysokoskorostnogo gazoplamnennogo napylenija iznosostojkij pokrytij so strukturoj metastabil'nogo austenita*. Dis. kand. tehn. nauk [Improving the technology of high-speed flame spraying of wear-resistant coatings with the structure of metastable austenite. PhD diss]. Ural. feder. un-t im. B. N. El'cina, Ekaterinburg, 2010. 178 p.

8. Golovin, S. I., Avepchenko, V. A., Popovich, L. G., Puzpjakov, A. F. *Matematicheskaja model'*

svepzhvukovogo vozdušno-plazmennogo napylenij [Mathematical model of supersonic air-plasma spraying]. *Welding production*, 2008, no. 2, pp. 16–22.

9. Papyrin, A., Alhimov, A., Klinkov, S., Kosarev, V., Fomin, V. *Cold Spray Technology*. Amsterdam, Elsevier, 2006. 336 p.

10. Pattison, J., Celotto, S., Morgan, R., Bray, M., O'Neill, W. *Cold Gas Dynamic Manufacturing: a Non-Thermal Approach to Freeform Fabrication*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, vol. 47 (3–4), pp. 627–634.

11. *Matlab Documentation, TheMathWorks Inc*. Available at: <http://www.mathworks.com> (accessed 12.05.2020).

12. Anderson John, D. *Modern Compressive Flow by Anderson*. McGraw-Hill, 2002. 784 p.

Надійшла до редакції 18.05.2020, розглянута на редколегії 15.08.2020

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ПРИ ХОЛОДНОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

А. О. Волков, А. В. Шоринов, А. И. Долматов, С. Е. Маркович

Доработана одномерная газодинамическая модель процесса разгона и подогрева частиц с учетом затопленного пространства. Один цикл ускорения частиц газовым потоком можно разделить на три периода: смешивание струи газа и порошка; движение и ускорение частиц в расширяющейся части сопла; движение струи с частицами в затопленном пространстве (в том числе отскок от подложки). Известно, что формирование покрытия при ХГН зависит от нормальной составляющей скорости частиц порошка относительно поверхности, на которую производится напыление. Для каждого материала существует свое значение критической скорости, при которой начинается процесс формирования покрытий. Для каждого материала существует свое значение критической скорости, при которой начинается процесс формирования покрытий. При скоростях частиц выше критической происходит их сцепление с подложкой и образование покрытия, обусловленное пластической деформацией частиц, а при скоростях ниже критической наблюдается эрозия поверхности или напыление с низкой эффективностью при определенных условиях. Принимая во внимание то, что одной из особенностей процесса холодного газодинамического напыления (ХГН) является весьма малые дистанции между сопловым аппаратом и подкладкой, что приводит к возникновению обратного течения газового потока (ударной волны), отраженного от подложки, а отраженный поток не только значительно затормаживает частицы напыляемого порошка, но и отклоняет их траекторию, изменяя угол напыления необходимость более детального анализа затопленного пространства неоспорима. Выполнен расчет температурно-скоростных параметров частиц алюминия и никеля размером 25 мкм при столкновении с подкладкой для сверхзвукового сопла СК-20 установки ХГН низкого давления ДИМЕТ-405. Несмотря на то, что одномерная изоэнтропийная газодинамическая модель, которая обычно используется для расчета параметров потока, описывает его только вдоль оси сопла, без учета теплообмена с соплом и потерь на трение о внутренние стенки, что приводит к получению завышенных результатов расчетов её использование позволяет предварительно оптимизировать геометрию канала сопла и технологический процесс напыления. Математическое моделирование динамики двухфазного потока процесса холодного напыления выполнена с использованием программного пакета MATLAB.

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

SIMULATION OF TWO-PHASE FLOW IN COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING

A. Volkov, O. Shorinov, A. Dolmatov, S. Markovych

The one-dimensional gas-dynamic model for calculation of acceleration and heating of particles which takes into account space from the nozzle outlet to the substrate has been improved. One cycle of particle acceleration by a gas flow can be divided into three parts: mixing a gas flow with powder; particle movement and acceleration in the divergent part of the nozzle; the movement of gas-powder flow from nozzle outlet to substrate. It is known that cold spray coating formation depends on the normal component of particle velocity towards the surface to be sprayed. Each material obtains its value of the critical velocity when the coating formation process starts. At particle veloci-

ties above critical, they adhere to the substrate and form coating due to plastic deformation of particles, and at velocities below critical value surface erosion or spraying with low efficiency is observed. One of the features of the process of cold gas-dynamic spraying is a relatively small distance between the nozzle outlet and the deposited surface, which leads to the occurrence of the reverse flow of the gas stream (bow shock) reflected from the substrate. The reflected flow significantly inhibits the trajectory of particles of sprayed powder which need to be investigated. Impact temperature and velocity of aluminum and nickel particles with size 25 microns with a substrate for SK-20 supersonic nozzle of DIMET-405 low-pressure cold spraying machine has been calculated. Although the one-dimensional isentropic gas-dynamic model, which is usually used to calculate flow parameters, describes flow only along the axis of the nozzle, excluding heat transfer with nozzle and friction loss on the inner walls, which leads to overestimated results of calculations, its utilization allows to optimize the geometry of the nozzle channel and develop a technological process of the spraying process. Mathematical modeling of two-phase flow dynamics of the cold spraying process was performed using the MATLAB software. Comparison of simulation results with experimental data to determine the flow velocity and temperature showed that the theoretical calculations differ from the experimental ones by no more than 10 %.

Keywords: cold gas-dynamic spraying; coatings; spraying parameters; particles temperature and velocity; critical velocity.

Волков Андрій Олегович – інженер кафедри технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

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

Долматов Анатолій Іванович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. технології виробництва авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Маркович Сергій Євгенійович – канд. техн. наук, доц., доц. каф. технології виробництва авіаційних двигунів, помічник ректора з інноваційної діяльності, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Andriy Volkov – Engineer of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: a.volkov@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-5899-1252.

Oleksandr Shorinov – Candidate of Technical Science, Assistant lecturer of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: o.shorinov@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0002-5057-6679.

Anatolii Dolmatov – Doctor of Technical Science, Professor, Head of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: a.dolmatov@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-5552-8791.

Sergii Markovych – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, Deputy rector for innovation, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: s.markovych@khai.edu, ORCID Author ID: 0000-0001-8321-2786.