

УДК 621.793.71

doi: 10.32620/aktt.2019.7.20

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

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків***РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНО-ШВИДКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТИНОК ПРИ ХОЛОДНОМУ ГАЗОДИНАМІЧНОМУ НАПИЛЮВАННІ**

Виконано розрахунок температурно-швидкісних параметрів частинок при зіткненні з підкладкою з використанням метода обчислювальної газодинаміки для надзвукового сопла СК-20 установки холодного газодинамічного напилювання (ХГН) низького тиску ДИМЕТ-405. Використання цього методу пояснюється тим, що одновимірна ізентропійна газодинамічна модель, 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. Попередньо встановлено, що різниця в значеннях, отриманих числовим моделюванням і шляхом розрахунків одновимірної ізентропійної моделі, становить менше 10 %. Числове моделювання динаміки двофазного потоку процесу холодного напилювання виконано з використанням програмного пакета Ansys Fluent Academic. Досліджено вплив початкових параметрів процесу холодного напилювання, а саме температури і тиску на вході в сопло, на зміну температури та швидкості частинок алюмінію діаметром 25 мкм у момент зіткнення з підкладкою. Також отримано значення температурно-швидкісних параметрів частинок залежно від їх розміру. Отриману температуру частинки в момент зіткнення з підкладкою було використано для розрахунку критичної швидкості напилювання алюмінієвого порошку – швидкості, необхідної для утворення покриття. Відомо, що формування покриття при ХГН залежить від швидкості частинок порошку. 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. В результаті моделювання і розрахунків критичної швидкості напилювання було побудовано вікно напилювання, тобто область значень швидкостей і температур частинок алюмінієвого порошку в залежності від температури та тиску повітря на вході в сопло, при яких можливе утворення покриттів.

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

Вступ

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

Серед усіх методів газотермічного напилювання покриттів технологія ХГН має низку переваг, а саме відсутність високих температур, окиснення, фазових перетворень матеріалів покриття й підкладки, і може бути успішно застосована для формування покриттів на деталях. Метод полягає в прискоренні надзвуковим газовим потоком частинок порошку, що перебувають у твердій фазі, подальшому їх зіткненні з поверхнею підкладки й утворенні покриття. 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 напилювання встановлено, що для утворення покриттів швидкість частинок порошку має набути деякого певного значення, а саме критичної швидкості, що залежить від їх температури в момент зіткнення й густини матеріалу [2].

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

У роботі досліджено газодинамічні процеси, що протікають при холодному газодинамічному напилюванні низького тиску, тобто в якості робочого газу використовується повітря з тиском на вході в сопло до 1 МПа.

1. Постановка завдання

При отриманні покриттів холодним газодинамічним напилюванням для прискорення й нагрівання частинок використовується високошвидкісний газовий потік. 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.

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 [3–6].

Для визначення енергетичних параметрів у соплі (температури, швидкості, тиску, числа Маха тощо) можна скористатись одновимірною газодинамічною моделлю, адаптованою до числа Маха, що збільшується в розширній частині сопла Лавалю [3]. Потік у соплі вважається одновимірним та ізентропійним (без теплообміну та втрат на тертя). Також припускається, що потік підпорядковується законам для ідеального газу з постійним відношенням теплоємностей (показником адіабати).

Однак, ця модель описує потік лише вздовж осі сопла й не враховує теплообміну потоку з ним, а також втрати на тертя об стінки сопла. Тому для отримання більш реальних результатів в роботі було використано метод обчислювальної газодинаміки (CFD) в 2D- і 3D- площинах. Зазвичай CFD модель містить сопло, підкладку й частину атмосфери навколо вихідного перерізу сопла з нормальними умовами для врахування впливу змішування навколишнього повітря з потоком на швидкість і температуру останнього. Розрахункова область розбивається на велику кількість ланок зі скінченним об'ємом, для кожної з яких проводиться розрахунок швидкісних і температурних параметрів потоку й частинок. У розрахунках ураховується турбулентність і втрати на тертя об стінки сопла.

Завдяки числовому 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 та її траєкторію.

2. Числове моделювання газодинаміки процесу ХГН

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. Усереднені за часом основні рівняння для турбулентного потоку представлені у роботі [7].

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 лагранжівій 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 [5].

У даній роботі було використано програмний пакет ANSYS FLUENT. Даними для проведення моделювання є: геометрія сопла, параметри потоку на вході в сопло та властивості частинок порошку. Розрахунок параметрів газу виконується методом скінченних об'ємів. Граничні й початкові умови використовуються для задання тиску й температури робочого газу на вході в сопло, осі симетрії, стінок, температури й тиску навколишнього середовища. Підкладка також була позначена як стінка, що знаходиться на відстані 15 мм від вихідного перерізу сопла. Тиск на вході в сопло змінювався від 0,6 МПа до 1,0 МПа. Температуру на вході в сопло задано в діапазоні від 473 К до 973 К. Температурно-швидкісні параметри частинки при зіткненні з підкладкою розраховувалися для однієї частинки алюмінієвого порошку розміром від 5 мкм до 60 мкм. Швидкість порошку в точці введення дорівнювала 20 м/с, а температура – 300 К. Параметри навколишнього середовища взято при нормальних умовах (1 атм, 300 К). Моделювання виконано для стандартного надзвукового сопла СК-20 установки ХГН низького тиску ДИМЕТ-405 з діаметром на вході 8 мм, діаметром у критичному перерізі 2,7 мм, вихідним діаметром 4 мм, довжиною звукувальної частини 8 мм та розширювальної частини 127 мм.

З метою отримання оптимального розміру розрахункової сітки проведено серію попередніх моделювань. Було встановлено, що зменшення сітки до розміру менш ніж 0,2 мм × 0,2 мм не приводить до підвищення точності розрахунків, але спричиняє значне збільшення розрахункового часу.

3. Результати числового моделювання

Результати числового моделювання впливу параметрів напилування на швидкість і температуру частинок при їх зіткненні з підкладкою представлено на рисунках 1 і 2.

Як видно з результатів експериментів, зміна значень температури й тиску повітря приводить до зміни температурно-швидкісних параметрів частинок порошку, що має велике значення для процесу ХГН. При збільшенні швидкості газового потоку збільшується швидкість частинок, що знаходяться в цьому потоці. Швидкість звуку для газу залежить від температури й молекулярної маси газу. Для того щоб збільшити швидкість потоку (а разом з тим і швидкість частинок), необхідно збільшити температуру або використовувати газ з

меншою молекулярною масою, наприклад гелій. Збільшення тиску не впливає на швидкість, а приводить до змінення густини газу і, отже, впливає на силу лобового опору й прискорення частинок [8].

Як видно з рисунків 1 та 2, серед досліджуваних параметрів температура повітря найбільше впливає на температуру й швидкість частинки в момент зіткнення. Збільшення температури від 473 К до 973 К приводить до збільшення швидкості частинки алюмінію розміром 25 мкм при зіткненні з підкладкою від 486,5 м/с до 628,5 м/с (збільшення швидкості частинки на 22,6 %) і температури частинки від 288 К до 394,4 К (збільшення температури частинки на 27 %) при постійному тиску 1 МПа й дистанції напилування 15 мм.

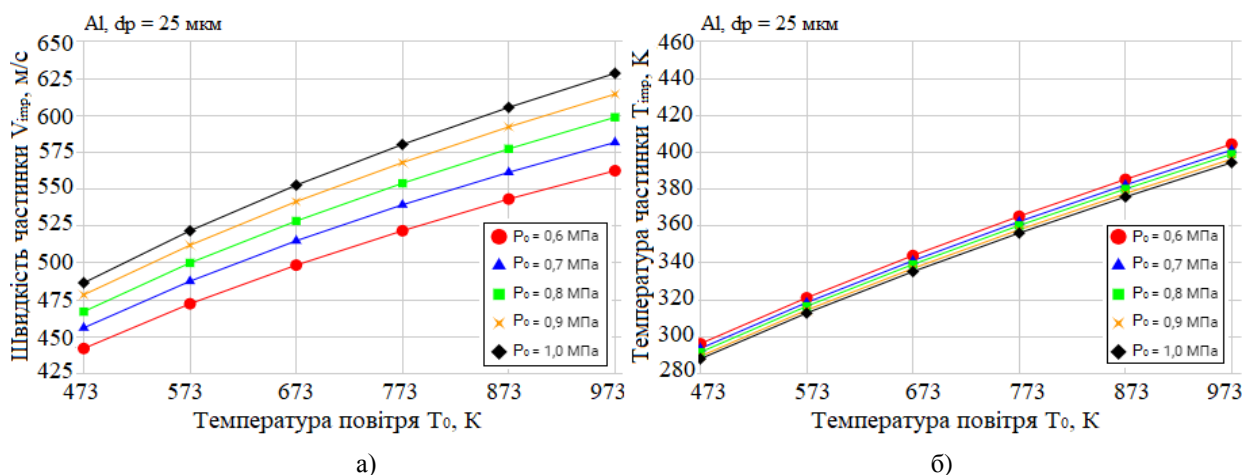


Рис. 1. Вплив T_0 на швидкість (а) і температуру (б) частинок алюмінію діаметром $d_p = 25$ мкм при зіткненні з підкладкою при різних P_0

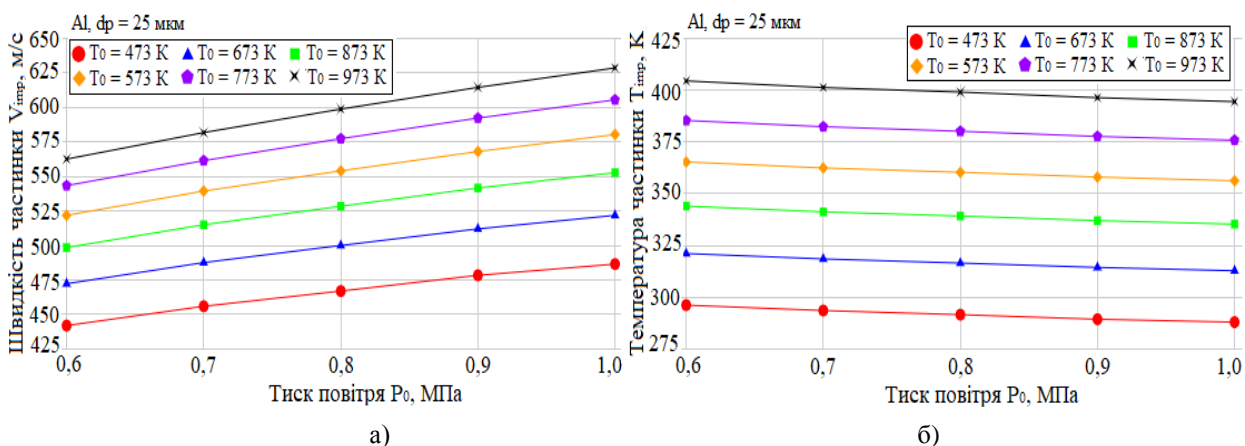


Рис. 2. Вплив P_0 на швидкість (а) і температуру (б) частинок алюмінію діаметром $d_p = 25$ мкм при зіткненні з підкладкою при різних T_0

Зміна тиску повітря на вході в сопло менше впливає на швидкість частинки порівняно з температурою повітря. Так, зі збільшенням тиску від 0,6 МПа до 1,0 МПа швидкість частинки алюмінію розміром 25 мкм збільшується від 562,5 м/с до 628,5 м/с (збільшення швидкості частинок на 10,5 %), а температура частинки зменшується від 404,4 К до 394,4 К при постійній температурі 973 К і дистанції напилювання 15 мм.

Також завдяки числовому моделюванню визначено вплив діаметру частинок на їх температуру і швидкість при різних температурах і постійному тиску повітря 1 МПа. Встановлено, що частинки меншого діаметру прискорюються до більш високих швидкостей, але в той же час мають значно менші температури. Необхідно зазначити, що незважаючи на більш високі швидкості частинок малих розмірів їх напилювання ускладнене, оскільки зі зменшенням діаметра частинок спостерігається збільшення критичної швидкості, необхідної для формування покриттів.

4. Результати розрахунків критичної швидкості та вікно напилювання

Критична швидкість і швидкість ерозії для частинки алюмінієвого порошку розміром 25 мкм розраховано з допомогою рівняння (1) залежно від температури зіткнення, отриманої за результатами чисельного моделювання:

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{F_1 4\sigma_0 \left(1 - \frac{T_i - T_R}{T_m - T_R}\right)}{\rho_p} + F_2 C_p (T_m - T)}, \quad (1)$$

де V_{crit} – критична швидкість частинки;

σ_0 – границя міцності на розтяг матеріалу частинки;

T_i – температура удару частинки;

T_R – температура навколишнього середовища (293 К);

T_m – температура плавлення частинки;

ρ_p – густина матеріалу частинки;

C_p – теплоємність матеріалу частинки;

F_1 і F_2 – емпіричні коефіцієнти, отримані після кореляції експериментальних даних.

На рисунку 3 зображено зміну критичної швидкості напилювання V_{crit} і швидкості ерозії V_{er} залежно від температури частинки. Область під кривою V_{crit} відповідає слабкій ерозії, відсутності напилювання або напилювання з дуже низькою ефективністю. Область над кривою V_{er} відповідає

сильній ерозії поверхні підкладки внаслідок високошвидкісного зіткнення й відсутності напилювання. Область між цими двома кривими є областю можливості напилювання певного порошкового матеріалу, яку називають вікном напилювання.

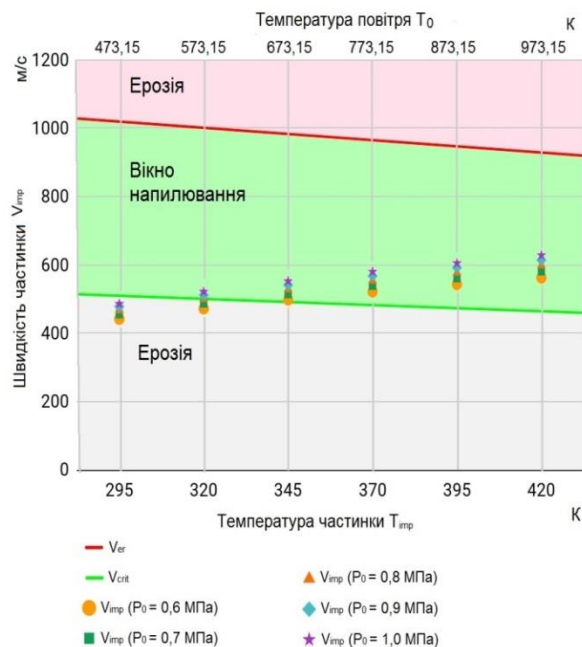


Рис. 3. Результати розрахунків критичної швидкості напилювання V_{crit} і швидкості ерозії V_{er} і вікно напилювання

Висновки

Для отримання результатів температурно-швидкісних параметрів частинок у соплі, на виході з нього та при натіканні на підкладку було використано метод обчислювальної газодинаміки (CFD). Моделювання газодинаміки двофазного потоку в соплі установки ХГН виконано для температур повітря від 473 К до 973 К і тисків від 0,6 до 1,0 МПа повітря. Моделювання є важливим етапом розроблення технології та обладнання для ХГН, зокрема етапом проектування й оптимізації надзвукових сопел та знаходження оптимальних параметрів процесу напилювання.

Використовуючи знайдені значення температур частинок алюмінію в момент зіткнення з підкладкою, розраховано діапазон критичної швидкості напилювання. Розрахунки дали змогу зробити висновок, що вікно напилювання для частинок алюмінію діаметром 25 мкм становлять від 510,6 м/с до 1021,3 м/с при температурі повітря $T_0 = 473$ К і тиску $P_0 = 0,6$ МПа і зменшується до діапазону від 468,8 м/с до 937,6 м/с при $T_0 = 973$ К і $P_0 = 1$ МПа. Встановлено, що швидкість

частинок, які знаходяться у вікні напилювання, забезпечується при тиску P_0 від 0,9 МПа до 1,0 МПа і $T_0 = 573$ К або при $P_0 = 0,7$ МПа і T_0 понад 673 К.

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, issue 2. – P. 265–281.
3. Dykhuizen, R. Gas Dynamic Principles of Cold Spraying of Cold Spray [Text] / R. Dykhuizen, M. Smith // Journal of Thermal Spray Technology. 1998. – Vol. 7, issue 2. – P. 205–212.
4. Cold Spray Technology [Text] / A. Papyrin et al. – Amsterdam : Elsevier, 2006. – 336 p.
5. 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, issue 4. – P. 542–550.
6. On Parameter Selection in Cold Spraying [Text] / H. Assadi et al // Journal of Thermal Spray Technology. 2011. – Vol. 20, issue 6. – P. 1161–1176.
7. Rajaratnam, N. Turbulent Jets [Text] / N. Rajaratnam. – Amsterdam : Elsevier, 1976. – 304 p.

8. Chatterjee, U. Environmental Degradation of Metals [Text] / U. Chatterjee, S. Bose, S. Roy. – New York : Basel, Marcel Dekker, 2001. – 510 p.

References

1. Alhimov, A. P. et al. *Holodnoe gazodinamicheskoe napylenie* [Cold Spray]. Novosibirsk, Fizmatlit Publ., 2010. 536 p.
2. Kosarev, V. F. et al. On Some Aspects of Gas Dynamics of the Cold Spray Process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2003, vol. 12, issue 2, pp. 265–281.
3. Dykhuizen, R., Smith, M. Gas Dynamic Principles of Cold Spraying of Cold Spray. *Journal of Thermal Spray Technology*, 1998, vol. 7, issue 2, pp. 205–212.
4. Papyrin, A. et al. *Cold Spray Technology*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2006. 336 p.
5. 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, issue 4, pp. 542–550.
6. Assadi, H. et al. On Parameter Selection in Cold Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2011, vol. 20, issue 6, pp. 1161–1176.
7. Rajaratnam, N. *Turbulent Jets*. Amsterdam, Elsevier Publ., 1976. 304 p.
8. Chatterjee, U., Bose, S., Roy, S. *Environmental Degradation of Metals*. New York, Basel, Marcel Dekker, 2001. 510 p.

Поступила в редакцию 5.04.2019, рассмотрена на редколлегии 7.08.2019

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЧАСТИЦ ПРИ ХОЛОДНОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ

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

Выполнен расчет температурно-скоростных параметров частиц при соударении о подложку с использованием метода вычислительной газодинамики для сверхзвукового сопла СК-20 установки холодного газодинамического напыления (ХГН) низкого давления ДИМЕТ-405. Использование этого метода объясняется тем, 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. Предварительно установлено, что разница в значениях, полученных численным моделированием и путем расчетов одномерной изоэнтропийной модели, составляет менее 10%. Численное моделирование динамики двухфазного потока процесса холодного напыления выполнено с использованием программного пакета Ansys Fluent Academic. Исследовано влияние начальных параметров процесса холодного напыления, а именно температуры и давления на входе в сопло, на изменение температуры и скорости частиц алюминия диаметром 25 мкм в момент соударения о подложку. Также получено значение температурно-скоростных параметров частиц в зависимости от их размера. Полученную температуру частицы в момент соударения о подложку было использовано для расчёта критической скорости напыления алюминиевого порошка – скорости, необходимой для образования покрытия. Известно, что формирование покрытий при ХГН зависит от скорости частиц порошка. 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. В результате моделирования и расчетов критической скорости напыления было построено окно напыления, то есть область значений скоростей и температур частиц алюминиевого

порошка в зависимости от температуры и давления воздуха на входе в сопло, при которых возможно образование покрытий.

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

CALCULATION OF PARTICLES TEMPERATURE AND VELOCITY OF COLD SPRAYING

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

The method of computational fluid dynamics (CFD) for the supersonic nozzle SK-20 of the low-pressure cold gas-dynamic spraying equipment DYMET-405 was applied for calculation of particles impact temperature and velocity. The application of the CFD method is the one-dimensional isentropic gas-dynamic model considers the flow only along the nozzle axis, without taking into account the heat exchange with the nozzle and the friction losses on the internal walls, which leads to obtaining overestimated results of calculations. Previously it was found out that the difference in the values obtained by numerical simulation and the results of calculations of a one-dimensional isentropic model was less than 10%. Numerical simulation of the two-phase flow of the cold spray process has been performed using the Ansys Fluent Academic software package. The influence of the initial cold spray process parameters such as temperature and pressure at the nozzle inlet on the change in temperature and velocity of aluminum particles with a diameter of 25 μm at the moment of impact with the substrate has been studied. Also, the influence of the particle size on the above-mentioned parameters has been obtained. The numerical simulation results of the particle impact temperature with the substrate have been used to calculate the critical velocity of aluminum powder – the velocity needed for coating formation. It is known that the formation of cold spray coatings depends on the velocity of the powder particles. For each material, there is a critical velocity at which the process of forming the coating begins. At particle velocities above the critical one, their adhesion to the substrate and the formation of the coating, due to the plastic deformation of the particles, occurs, while at lower velocities the surface erosion or deposition with low efficiency under certain conditions is observed. As a result of simulation and calculations of the critical velocity, the window of spraying was developed, that is the region of values of velocities and temperatures of the particles of aluminum powder, depending on the temperature and pressure of the air at the nozzle inlet, at which the formation of coatings is possible.

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

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

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

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

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

Shorinov Oleksandr Volodymyrovych – Candidate of Technical Science, Head of laboratory of Dept. of aircraft engine manufacturing technologies, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: shorinov1@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0002-5057-6679.

Volkov Andriy Olegovych – 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.

Markovych Sergii Evgenovych – 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: motor.khai@gmail.com, ORCID Author ID: 0000-0001-8321-2786.

Dolmatov Anatolii Ivanovych – 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.