

### III МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.793.71

#### ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТИНОК ПОРОШКУ $Ni+Al_2O_3$ В НАДЗВУКОВОМУ СОПЛІ ПРИ ГАЗОДИНАМІЧНОМУ НАПИЛЮВАННІ АНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ

Шорінов О. В.

канд. техн. наук, доцент кафедри технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, e-mail: o.shorinov@khai.edu;

Поливняний С. О.

заступник директора з виробництва нових виробів АТ «Мотор Січ», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: sergeypolyvanij@ukr.net

**Мета роботи.** Розрахувати температуру і швидкість частинок нікелю та оксиду алюмінію, що знаходяться в надзвуковому потоці, в каналі сопла для холодного газодинамічного напилювання низького тиску. Дослідити вплив параметрів газу на вході в сопло, а саме температури і тиску, на швидкість і температуру частинок на виході з сопла.

**Методи дослідження.** Розрахунок температурно-швидкісних характеристик частинок порошку виконується після визначення параметрів газового потоку в каналі надзвукового сопла з використанням відомих газодинамічних залежностей. Початковими даними для розрахунку є геометрія сопла, температура і тиск газу (повітря) на вході. В розрахунках енергетичних параметрів частинок враховується густина матеріалу з якого вони отримані, а також їх діаметр – частинки нікелю з діаметром 25 мкм та частинки оксиду алюмінію з діаметром 22 мкм.

**Отримані результати.** За результатами розрахунків побудовано графіки зміни швидкостей та температур частинок досліджуваних порошків, а також газу, в каналі надзвукового сопла установки для холодного газодинамічного напилювання низького тиску. Також побудовано залежності температурно-швидкісних параметрів частинок на виході з сопла в діапазоні початкових значень температури на вході в сопло від 300 до 600 °C і тиску від 0,6 до 1,0 МПа.

**Наукова новизна.** Показано вплив початкових параметрів газу на вході в сопло в широкому діапазоні значень на температуру і швидкість частинок нікелю і оксиду алюмінію при холодному газодинамічному напилюванні низького тиску.

**Практична цінність.** Отримані результати можуть бути використані для призначення раціональних параметрів напилювання при розробленні технологічних процесів напилювання захисних і відновлювальних покриттів з порошкової суміші  $Ni+Al_2O_3$ .

**Ключові слова:** покриття, газотермічне напилювання, ізоентропійна модель, надзвуковий потік, сопло, температурно-швидкісні параметри.

#### Вступ

Надійність та довговічність деталей визначається конструктивною міцністю матеріалів з яких вони виконані. Експлуатаційні характеристики багатьох виробів – зносостійкість, корозійна стійкість, жаростійкість та інші – визначаються властивостями поверхні. Для отримання високих характеристик міцності поверхневих шарів часто застосовують різні технологічні методи обробки [1, 2]. Нанесення покриттів є одним з таких методів, що дозволяє захистити матеріал основи від зовнішніх впливів, підвищити термін служби деталей та скоротити витрати на ремонт та відновлення.

Покриттями називають штучно створені поверхневі шари, які можуть відрізнятися від матеріалу основи хімічним та фазовим складами, структурою та властивостями. Покриття наносяться для підвищення

експлуатаційних характеристик поверхонь, їх захисту від різних видів впливу (високих навантажень, температур, агресивних середовищ, тощо), в декоративних цілях, а також для відновлення їх пошкоджених ділянок.

Холодне газодинамічне напилювання (ХГН) є одним з методів газотермічного нанесення покриттів. В процесі напилювання покриття формуються за рахунок надзвукового зіткнення частинок порошку з підкладкою; при цьому характерною особливістю є те, що температура частинок є значно нижчою за температуру плавлення матеріалу з якого вони отримані, тобто частинки знаходяться в твердому стані [3].

Відсутність значного температурного впливу на матеріал підкладки дозволяє використовувати технологію ХГН для нанесення захисних і відновлювальних

покриттів на деталі з магнієвих, алюмінієвих і титанових сплавів [4–6]. Авторами отримано певні позитивні результати щодо напилювання покриттів на деталі з магнієвих і алюмінієвих сплавів [7]. Стосовно можливості відновлення пошкоджених поверхонь деталей з титанових сплавів та пошуку порошкового матеріалу для напилювання методом ХГН низького тиску, авторами запропоновано використання порошкової суміші  $Ni+Al_2O_3$ . Такі покриття мають задовільні фізико-механічні властивості і можуть бути використанні для нанесення на деталі газотурбінних двигунів, виготовлені з титанових сплавів.

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 в момент зіткнення [8, 9]. Зміну параметрів частинок порошку в соплі, на виході з нього, а також перед зіткненням з поверхнею підкладки можна визначити за допомогою аналітичних моделей, що дає змогу передбачити можливість формування покриттів певного матеріалу, певного фракції і певних параметрів напилювання. Цей етап є важливим на шляху розроблення технології та обладнання для ХГН, зокрема проектування й оптимізації надзвукових сопел.

### Постановка задачі

Швидкість частинок порошку при холодному газодинамічному напилюванні залежить від таких основних чинників: температура й тиск газу на вході в сопло; геометрія сопла; молекулярна маса робочого газу; густина матеріалу; форма й розмір частинок; час знаходження у високошвидкісному газовому потоці; взаємодія з ударною хвилею від поверхні підкладки та інше. При збільшенні швидкості газового потоку збільшується швидкість частинок порошку, що знаходяться в цьому потоці.

Процес ХГН складається з двох стадій – прискорення частинок порошку газовим потоком та надзвукового зіткнення їх з підкладкою та формування покриття. Тому дослідження процесу зіткнення не можливе без розуміння параметрів частинок на виході з сопла та впливу на них початкових параметрів газу.

На рис. 1 схематично показано стандартне сопло СК-20, що використовується в установках холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405 для якого в роботі проведено розрахунки. Сопло є надзвуковим, має дозвукову звужуючу частину, критичний переріз, і надзвукову розширну частину, що використовується для прискорення робочого газу і, відповідно, частинок порошку, що подаються за критичним перерізом в потік.

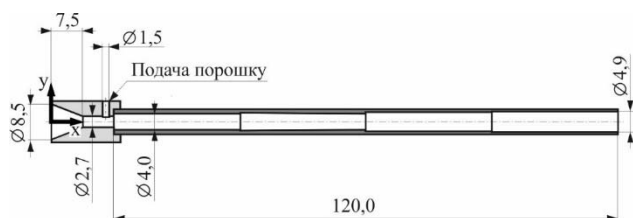


Рис. 1. Геометрія сопла СК-20 установки ДИМЕТ-405

Таким чином, метою роботи є дослідження впливу температури і тиску газу на вході в сопло на температуру та швидкість частинок нікелю та оксиду алюмінію в каналі надзвукового сопла та на виході з нього при ХГН низького тиску з використанням відомої аналітичної моделі.

### Огляд літератури

Вище було перелічено основні параметри процесу ХГН, що в значній мірі впливають на швидкість та температуру частинок. В цьому розділі стисло наведено результати огляду літератури щодо впливу цих параметрів на енергетичні характеристики частинок порошку.

Зазвичай з метою мінімізації впливу зміни густини газу в соплі на швидкість частинок використовують системи холодного напилювання високого тиску (тиск газу на вході в сопло до 5 МПа). Зі збільшенням тиску збільшується густина газу в соплі, що забезпечує великі значення сили лобового опору для прискорення частинок. Однак збільшення тиску є можливим до деякого певного значення, що залежить від матеріалу й розміру частинок [3]. Крім того, зі збільшенням тиску збільшується й витрата газу через сопло, що впливає на його максимально можливу температуру, яка забезпечується потужністю нагрівника.

У роботі [10] було встановлено, що, по-перше, швидкість частинки обмежена швидкістю газу, по-друге, при збільшенні часу перебування частинки в потоці її швидкість монотонно збільшується. По-третє, прискорення частинки збільшується зі збільшенням густини газу. Оптимальні умови прискорення визначаються умовою максимуму сили опору. Розрахунки авторів показують, що оптимальні густина й швидкість газу, які дають максимальне прискорення частинки, можуть бути отримані при відносному числі Маха приблизно 1,4. Оптимальною формою профілю сопла буде в тому випадку, якщо в кожному перерізі відносне число Маха частинки близьке до цієї величини. Таким чином, зміна параметрів газу приводить до зміни оптимальної геометрії сопла.

У роботі [11] 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. При напилюванні високошвидкісного газового 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 [12] аналітично оцінюється оптимальний розмір частинок залежно від вхідних параметрів (типу

### Методика розрахунків

газу, його тиску й температури, густини матеріалу частинок, геометрії сопла тощо). Під оптимальним розуміють такий розмір час-тинок, 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 вибрати порошки таким чином, щоб найдрібніші й найбільші частинки мали швидкість удару, вищу за критичну.

У роботі [12] було також встановлено, що зі збільшенням швидкості й температури частинок збільшується коефіцієнт використання порошку і адгезія, зменшуються пористість і шорсткість покриття. Таким чином, аналітичні й експериментальні результати показують, що найкращу якість покриттів можна отримати при максимальній швидкості частинок, що не перевищує швидкостей, при яких спостерігається високошвидкісний знос поверхні підкладки.

Дослідження параметрів газу і частинок порошку за допомогою комп'ютерного моделювання є розповсюдженим методом для оптимізації процесу ХГН: профілювання надзвукових сопел [13], знаходження оптимальних параметрів частинок для їх адгезії [14] та інше. У роботі [15] автори використовують відносно простий аналіз на основі ізоентропійної газодинамічної моделі [16] і програму ANSYS FLUENT [17]. В обох випадках спочатку розраховуються енергетичні параметри потоку, а потім – рух частинок. На основі ізоентропійних обчислень 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 швидкість частинки на 25 %, якщо подвоюється температура (від 300 °С до 600 °С). При високих температурах (вище 520 °С) швидкість частинок збільшується слабкіше через зменшення густини газу. Показано, що при розрахунках за програмою FLUENT швидкість частинок є на 10 % меншою, ніж при розрахунках за ізоентропійною моделлю.

У роботі [18] вивчається вплив геометрії сопла на прискорення частинок. Авторами досліджено багатоканальну схему надзвукового сопла. Такі сопла можуть бути запропоновані при оптимізації процесів напилювання порошкових сумішей, наприклад метал і кераміка, для яких рекомендується їх окрема подача до сопла [19].

За результатами проведеного літературного огляду були встановлені важливі параметри процесу, що в значній мірі впливають на температуру та швидкість частинок порошку – температура та тиск повітря на вході в сопло, а також розмір самих частинок.

Для визначення енергетичних параметрів потоку у соплі (температури, швидкості, тиску, числа Маха тощо) можна скористатись одновимірною газодинамічною моделлю, адаптованою до числа Маха, що збільшується в розширній частині сопла Лавалю [10].

Потік у соплі вважається одновимірним та ізоентропійним (без теплообміну та втрат на тертя). Також припускається, що потік підпорядковується законом для ідеального газу з постійним відношенням теплоємностей (показником адиабати).

Таким чином, рівняння, що описують течію такого потоку, можна брати з підручників класичної механіки рідин і газів [20]. Одновимірна модель не враховує прилежового шару, що розвивається на внутрішніх стінках сопла й гальмує потік порівняно з течією поблизу осі сопла. Тому результати розрахунку моделі є трохи завищеними порівняно з результатами, одержаними на практиці.

З урахуванням зазначених припущень параметри газу залежатимуть від геометрії сопла, температури й тиску газу на вході в сопло. З метою прискорення потоку до надзвукових швидкостей при ХГН використовують сопло Лавалю. При прискоренні потоку в соплі температура й тиск газу зменшуються, тоді, як швидкість потоку збільшується. Параметри газу при цьому є функцією від місцевого значення числа Маха (відношення швидкості газу до місцевої швидкості звуку).

Зазвичай температура газу є вищою, ніж температура навколишнього середовища. Якщо частинка рухається повільно, то її оточує газ з температурою, близькою до температури гальмування. Однак якщо швидкість частинки є близькою до швидкості газу, то вона охолоджується. При малих концентраціях частинок у потоці теплообмін між частинками й газом не порушує припущення про адиабатичну течію газу [10].

Параметрами газового потоку на вході в сопло є температура  $T_0$  і тиск  $P_0$ , швидкість потоку при цьому дорівнює нулю. Передбачається, що температура потоку на вході в сопло та масова витрата газу є відомими. Масова витрата газу в установках газотермічного напилювання зазвичай задається тиском.

Початкові дані для розрахунків наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Початкові дані для розрахунків

Параметр	Значення
<i>Частинки порошку нікелю:</i>	
- діаметр $d_p$ , мкм	25
- густина $\rho_p$ , kg/m <sup>3</sup>	8874
- теплоємність $C_p$ , J/kg·K	446
<i>Частинки порошку оксиду алюмінію:</i>	
- діаметр $d_p$ , мкм	22
- густина $\rho_p$ , kg/m <sup>3</sup>	3950
- теплоємність $C_p$ , J/kg·K	790,4
<i>Робочий газ (повітря):</i>	
- питома газова стала $R$ , J/kg·K	287,05
- показник адиабати $\gamma$	1,4

При збільшенні швидкості газового потоку збільшується швидкість частинок порошку, що знаходяться в цьому потоці. Швидкість звуку для газу залежить від температури й молекулярної маси газу:

$$V = \sqrt{\gamma RT}, \quad (1)$$

де  $R$  – питома газова стала (універсальна газова стала поділена, на молекулярну масу газу).

Взаємозв'язок температури газового потоку в критичному перерізі сопла  $T^*$  і температури газу  $T_0$  можна представити рівнянням

$$\frac{T_0}{T^*} = 1 + \frac{\gamma-1}{2}, \quad (2)$$

де  $\gamma$  – відношення питомих теплоємностей (показник адіабати); для одноатомних газів  $\gamma = 1,66$ , а для двоатомних зазвичай  $\gamma = 1,4$  (при розрахунках повітря вважають двоатомним газом, оскільки це суміш азоту з киснем).

Використовуючи рівняння (1), передбачають, що в критичному перерізі сопла режим течії є звуковим. Звуковий режим течії може бути отриманий лише при певних значеннях температури. У критичному перерізі  $M = 1$ , а місцеву швидкість можна виразити за допомогою рівняння (1).

У роботі [10] передбачається, що витрата газу (не тиск) є заданим. Густина газу в критичному перерізі можна визначити за рівнянням

$$\rho^* = \frac{m}{V^* A^*}, \quad (3)$$

де  $m$  – масова витрата газу через критичний переріз сопла.

Використовуючи закон для ідеального газу, тиск у критичному перерізі можна отримати за рівнянням:

$$P^* = \rho^* RT^* \quad (4)$$

За відомим тиском в критичному перерізі сопла можна розрахувати тиск газу:

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

Далі необхідно визначити параметри газу на виході з сопла: тиск, температуру, число Маха або площу вихідного перерізу. Припустимо, що площі критичного перерізу й перерізу на виході сопла задано. Рівняння для розрахунку числа Маха на виході сопла має такий вигляд:

$$\frac{A}{A^*} = \left(\frac{1}{M}\right) \left[\left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)\right]^{\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}}. \quad (6)$$

Після визначення числа Маха на виході з сопла

можна розрахувати інші параметри потоку, використовуючи рівняння

$$\frac{P}{P^*} = \left(\frac{\gamma+1}{2+(\gamma-1)M^2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (7)$$

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2, \quad (8)$$

$$V = M\sqrt{\gamma RT}, \quad (9)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{\frac{1}{\gamma-1}}. \quad (10)$$

В'язкість газу  $\mu$  розраховується за температурою Сатерленда  $T_s$  (120 К для повітря) і кімнатною температурою  $\mu_0$ :

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{273}\right)^{1,5} \frac{273+T_s}{T+T_s}. \quad (11)$$

Для визначення швидкості частинок використовується диференціальне рівняння (12), яке вирішується методом кінцевих різниць:

$$V_p \frac{dV_p}{dz} = \frac{3}{4} C_D \frac{\rho(V-V_p)|V-V_p|}{\rho_p d_p}, \quad (12)$$

де  $V_p$  – швидкість частинки;  $C_D$  – коефіцієнт опору частинки;  $\rho_p$  – густина матеріалу частинки;  $d_p$  – діаметр частинки.

Для розрахунку температури частинки використовуються рівняння (13)–(18) [20]:

$$\rho_p V_p C_p \frac{dT_p}{dz} = Nu \frac{6\lambda}{d_p^2} (T - T_p), \quad (13)$$

$$Nu = 2a + 0,459b Re_p^{0,55} Pr \gamma^{0,33}, \quad (14)$$

$$a = \exp(-M_p) \left(\frac{1+17M_p}{Re_p}\right)^{-1}, \quad (15)$$

$$b = 0,666 + 0,333 \exp\left(\frac{-17M_p}{Re_p}\right), \quad (16)$$

$$Re_p = (V - V_p) \frac{\rho d_p}{\mu}, \quad (17)$$

$$M_p = \frac{(V-V_p)}{a}, \quad (18)$$

де  $T_p$  – температура частинки;  $Nu$  – число Нуссельта;  $\lambda$  – теплопровідність;  $Re_p$  – число Рейнольдса частинки;  $M_p$  – число Маха частинки.

Результати розрахунків та їх обговорення

На рис. 2 і 3 представлено результати розрахунків

швидкості та температури частинок порошку нікелю діаметром 25 мкм і оксиду алюмінію діаметром 22 мкм, а також потоку, в каналі сопла з використанням одномірної ізоентропійної моделі. З метою спрощення аналізу форма частинок вважаємо ідеально сферичною з фізичними властивостями, як і у початкового матеріалу. Як робочий газ використовувалось повітря з тиском 1 МПа й температурою 500 °С.

Температура частинки оксиду алюмінію на рис. 3 не показана, оскільки вона майже відповідає температурі частинки нікелю –305,21 К і 305,27 К відповідно.

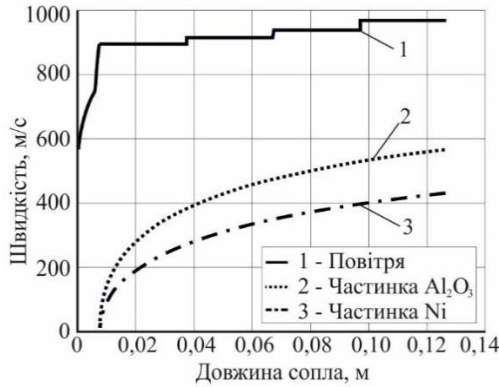


Рис. 2. Результати розрахунку швидкості газу та частинок нікелю й оксиду алюмінію в соплі

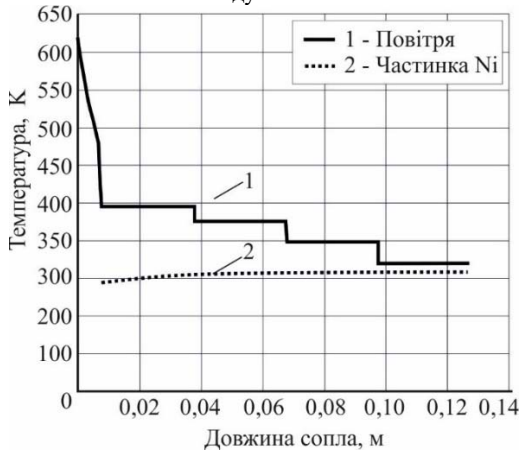


Рис. 3. Результати розрахунку температури газу та частинки нікелю в соплі

На рис. 4 і 5 представлено результати розрахунків впливу температури і тиску газу на вході в сопло на температуру і швидкість частинок порошку нікелю діаметром 25 мкм і оксиду алюмінію діаметром 22 мкм на виході із сопла. Розрахунки виконано для діапазонів температур від 300 °С до 600 °С, та тиску від 0,6 до 1,0 МПа. Температура частинки оксиду алюмінію на рис. 5 на виході з сопла не показана, оскільки вона майже відповідає температурі частинки нікелю.

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.

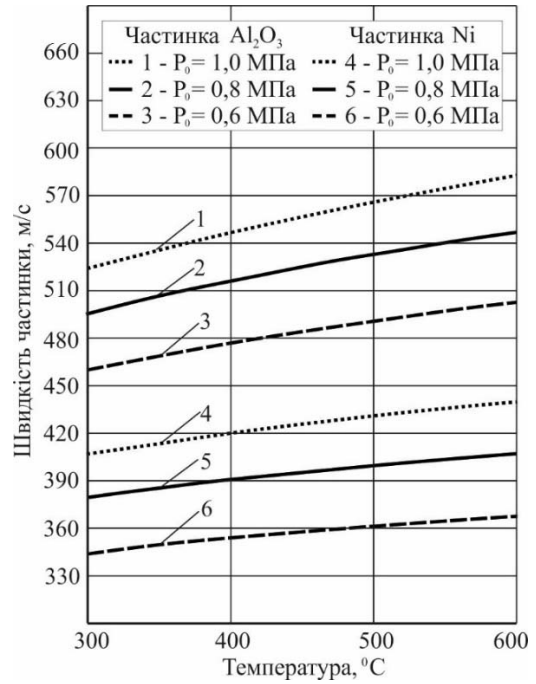


Рис. 4. Залежність швидкості частинок нікелю та оксиду алюмінію на виході з сопла при різних значеннях температури  $T_0$  і тиску  $P_0$  повітря на вході в сопло

При збільшенні швидкості газового потоку збільшується швидкість частинок, що знаходяться в цьому потоці. Швидкість звуку для газу залежить від температури й молекулярної маси газу (рівняння (1)). Для того щоб збільшити швидкість потоку (а разом з тим і швидкість частинок), необхідно збільшити температуру або використувати 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 [3].

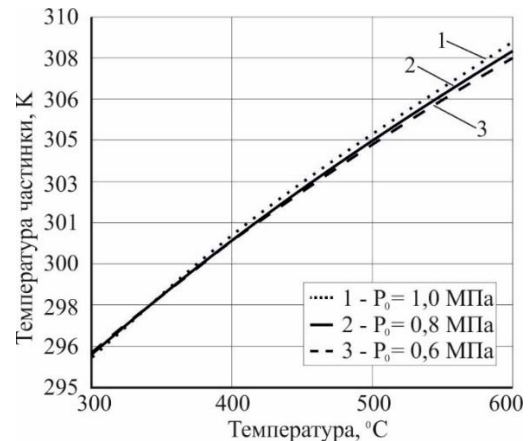


Рис. 5. Залежність температури частинки нікелю на виході з сопла при різних значеннях температури  $T_0$  і тиску  $P_0$  повітря на вході в сопло

Як видно з рис. 4–5, збільшення температури від 300 °С до 600 °С приводить до збільшення швидкості частинки нікелю розміром 25 мкм на виході з сопла з 406,8 м/с до 440,2 м/с і температури частинки від 296,2 К до 309 К при постійному тиску 1,0 МПа.

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 нікелю розміром 25 мкм збільшується з 367,6 м/с до 440,2 м/с, а температура частинки залишається майже незмінною – з 308,4 К до 309 К при постійній температурі 600 °С.

Теж саме відбувається і з частинками оксиду алюмінію – зі збільшенням температури і тиску повітря на вхід в сопло спостерігається зростання температури і швидкості частинок. При цьому значення швидкості частинки оксиду алюмінію в порівнянні зі швидкістю частинки нікелю за однакових умов є більшою через те, що вони є меншими і легшими. Це необхідно враховувати при розробленні технологічних рекомендацій з напилування, проектуванні надзвукових сопел, оптимізації процесів напилування тощо.

### Висновки

1. Виконано розрахунок швидкостей і температур потоку і частинок порошку нікелю діаметром 25 мкм і оксиду алюмінію діаметром 22 мкм, що знаходяться в цьому потоці, в каналі надзвукового сопла та на виході з нього в широкому діапазоні температури повітря від 300 °С до 600 °С і тиску від 0,6 до 1,0 МПа.

2. За результатами розрахунків побудовано графік зміни швидкості та температури газу і частинок порошку в надзвуковому соплі СК-20 при температурі газу на вході в сопло Т0 500 °С та тиску Р0 1,0 МПа.

3. Побудовано залежності температурно-швидкісних параметрів частинок порошку на виході з сопла від температури та тиску газу на вході в сопло в діапазоні від 300 °С до 600 °С та від 0,6 до 1,0 МПа відповідно.

4. Отримані результати можуть бути використані для знаходження оптимальних технологічних параметрів та розроблення рекомендацій з нанесення композиційних покриттів Ni + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> при ХГН низького тиску.

### Подяки

Автор висловлює подяку Національному фонду досліджень України за підтримку (конкурс «Підтримка досліджень провідних та молодих учених», номер проєкту 2020.02/0119).

### Список літератури

1. Качан О. Я. Підвищення довговічності зварних барабанів роторів компресорів обробкою в псевдозрідженому шарі абразиву / О. Я. Качан, С. О. Уланов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2022. – № 1. – С. 53–57. DOI: 10.15588/1607-6885-2022-1-7

2. Використання новітніх екологічно безпечних технологій поверхневого зміцнення при азотуванні / О. В. Нестеров, О. В. Климов, Д. В. Ткач, В. Т. Рубан // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2021. – № 2. – С. 21–25. DOI: 10.15588/1607-6885-2021-3-4

3. From particle acceleration to impact and bonding in cold spraying / T. Schmidt, H. Assadi, F. Gärtner and

etc. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2009. – 18(5). – P. 794–808. DOI: 10.1007/s11666-009-9357-7

4. Dissimilar metal joining and structural repair of ZE41AT5 cast magnesium by the cold spray process / V. Champagne Jr., D. Kaplowitz, V. K. Champagne III and etc. // Material Manufacturing Processes. – 2018. – 33. – P. 130–139. DOI: 10.1080/10426914.2016.1257137

5. A repair method for damage in aluminum alloy structures with the cold spray process / X. Han, X. Sun, G. Li and etc. // Materials. – 2021. – 14(22). – article no. 6957. DOI: 10.3390/ma14226957

6. Surface repair of aircraft titanium alloy parts by cold spraying technology / W. Hu, S. Markovych, K. Tan and etc. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2020. – № 3(163). – С. 30–42. DOI: 10.32620/akt.2020.3.04

7. Шоринов А. В. Восстановление корпусных деталей из легких сплавов холодным газодинамическим напылением / А. В. Шоринов, С. Е. Маркович // Вестник двигателестроения. – 2018. – № 1. – С. 101106. DOI: 10.15588/1727-0219-2018-1-14

8. On parameter selection in cold spraying / H. Assadi, T. Schmidt, H. Richter and etc. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2011. – 20(6). – P. 1161–1176. DOI: 10.1007/s11666-011-9662-9

9. Comment on ‘Adiabatic shear instability is not necessary for adhesion in cold spray’ / H. Assadi, F. Gärtner, T. Klassen, H. Kreye // Scripta Materialia. – 2019. – 162. – P. 512–514. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.10.036

10. Dykhuizen R. Gas dynamic principles of cold spraying of cold spray / R. Dykhuizen, M. Smith // Journal of Thermal Spray Technology. – 1998. – 7(2). – P. 205–212. DOI: 10.1361/105996398770350945

11. Particle size effects in metallic microparticle impact-bonding / I. Dowding, M. Hassani, Y. Sun, D. and etc. // Acta Materialia. – 2020. – 194. – P. 40–48. DOI: 10.1016/j.actamat.2020.04.044

12. Canales H. Window of deposition description and prediction of deposition efficiency via machine learning techniques in cold spraying / H. Canales, I. G. Cano, S. Dosta // Surface and Coatings Technology. – 2020. – 401. – article no. 126143. DOI: doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126143

13. Shorinov O. V. Simulation of gas flow with nanocomposite carbon-containing powders in supersonic nozzle / O. V. Shorinov, S. A. Polyviyany // Metallofizika i Noveishie Tekhnologii. – 2022. – 44(5). – P. 601–611. DOI: 10.15407/mfint.44.05.0601

14. Cold spray additive manufacturing of Ti6Al4V: Special nozzle design using numerical simulation and experimental validation / C. Cao, W. Li, Z. Zhang and etc. // Coatings. – 2022. – 12(2). – article no. 210. DOI: 10.3390/coatings12020210

15. Stoltenhoff T. Cold spraying – state of the art and applicability / T. Stoltenhoff, J. Voyer, H. Kreye // Thermal Spray 2002: Proceedings from the International Thermal Spray Conference. – 2002. – P. 366–374.

16. Optimization of the cold spray process / T. Stoltenhoff, H. Kreye, H. J. Richter, H. Assadi // Thermal Spray 2001: Proceedings from the International Thermal



Spray Conference. 2001. – P. 409–416.

17. The cold spray process and its potential for industrial applications / F. Gärtner, T. Stoltenhoff, T. Schmidt, H. Kreye // Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – 15. – P. 223–232. DOI: 10.1361/105996306X108110

18. Research on structure and technological parameters of multichannel cold spraying nozzle / W. Hu, K. Tan, S. Markovych, T. Cao // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – 5(1–113). – P. 6–14. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.242707

19. Deposition of multicomponent coatings by cold spray / S. V. Klinkov, V. F. Kosarev, A. A. Sova, I. Smurov // Surface and Coatings Technology. – 2008. – 202(24). – P. 5858–5862. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2008.06.171

20. Oosthuizen P. H. Introduction to Compressible Fluid Flow / P. H. Oosthuizen, W. E. Carscallen. – USA : CNC Press, 2014. – 576 p.

Одержано 21.09.2022

## DETERMINATION OF ENERGY PARAMETERS OF Ni+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> POWDER PARTICLES IN A SUPERSONIC NOZZLE DURING COLD GAS-DYNAMIC SPRAYING USING THE ANALYTICAL METHOD

Shorinov O.

Ph.D., Associate professor of the Department “Aircraft Engine Production Technology”, National Aerospace University named after M.E. Zhukovsky “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.shorinov@khai.edu;

Polyvianyi S.

Deputy Director of New Products Production JSC “Motor Sich”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: sergeypolyvanij@ukr.net

**Purpose.** To calculate the temperature and velocity of nickel and aluminum oxide particles in the supersonic flow in the low-pressure cold gas-dynamic spraying nozzle. To investigate the effect of gas parameters at the nozzle inlet, in particular temperature and pressure, on the velocity and temperature of particles at the nozzle outlet.

**Research methods.** The calculation of the temperature-velocity characteristics of the powder particles is performed after determining the parameters of the gas flow in the supersonic nozzle channel using well known gas-dynamic dependencies. The initial data for the calculation are the following: the geometry of the nozzle, the temperature and pressure of the gas (air) at the nozzle inlet. The density of the material from which particles are obtained, as well as their diameter, were taken into account in the calculation of the energy parameters. Nickel particles with a diameter of 25 μm and aluminum oxide particles with a diameter of 22 μm were used.

**Results.** Based on the calculations results, graphs of changes in the velocities and temperatures of the particles of the investigated powders, as well as working gas, in the channel of the low-pressure cold gas-dynamic spraying supersonic nozzle were developed. The dependences of the temperature-velocity parameters of the particles at the nozzle exit in the range of initial values of temperature at the nozzle inlet from 300 to 600 C° and pressure from 0.6 to 1.0 MPa were also developed.

**Scientific novelty.** The influence of the initial parameters of the gas at the nozzle inlet in a wide range of values on the temperature and velocity of nickel and aluminum oxide particles during the low-pressure cold gas-dynamic spraying is shown.

**Practical value.** The obtained results can be used to determine rational spraying parameters in the development of technological processes of deposition of protective and restorative coatings from Ni+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder mixture.

**Key words:** coating, thermal spraying, isentropy model, supersonic flow, nozzle, temperature-velocity parameters.