

Савченко Н.В., кандидат фізико-математичних наук, доцент

Шорінов О.В., кандидат технічних наук, доцент

(Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна)

ПОРІВНЯЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЧАСТИНОК У СОПЛІ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ: АНАЛІТИЧНИЙ ТА ЧИСЛОВИЙ ПІДХОДИ

Холодне газодинамічне напилення є перспективною технологією нанесення покриттів, що застосовується для надання поверхням специфічних експлуатаційних властивостей, таких як підвищена зносостійкість, корозійна стійкість, а також поліпшення теплової або електричної провідності. Основна особливість цього процесу полягає у тому, що формування покриття відбувається завдяки удару твердих порошкових частинок, прискорених до надзвукових швидкостей, об поверхню підкладки при температурах, нижчих за температуру плавлення матеріалу частинок. Здатність створювати щільні покриття з високою адгезійною та когезійною міцністю без структурних і фазових змін у матеріалі покриття та підкладки робить холодне напилення унікальним і конкурентоспроможним серед методів термічного напилення. Технологія успішно використовується не лише для захисту поверхонь, але й для відновлення пошкоджених деталей шляхом відновлення їхніх функціональних властивостей.

Останнім часом холодне газодинамічне напилення розглядається як перспективний метод адитивного виробництва, що дозволяє пошарово формувати металеві деталі. У зв'язку з цим питання моделювання процесів прискорення та нагрівання частинок у соплі холодного напилення набуває особливої актуальності, оскільки саме ці параметри визначають якість покриття, ефективність осадження та стабільність процесу.

Метою даної роботи є порівняння результатів визначення швидкості та температури порошкових частинок у соплі холодного напилення низького тиску, отриманих за допомогою чисельного моделювання (CFD) та аналітичної ізоентропної моделі. Дослідження спрямоване на виявлення відмінностей між результатами обох підходів та оцінку меж застосовності спрощеної аналітичної моделі для опису реальних газодинамічних процесів.

Проведено теоретичне дослідження прискорення та нагрівання частинок у звужувально-розширювальному соплі з дозавантаженням порошку за потоком для процесу холодного напилення низького тиску. Робота виконувалася у два етапи. На першому етапі здійснено детальне CFD-моделювання двофазного потоку в середовищі ANSYS Fluent, яке враховувало турбулентність, в'язкісні ефекти, розвиток прикордонного шару, взаємодію газу з частинками та рух транспортного газу. На другому етапі для порівняння результатів застосовано одновимірну ізоентропну газодинамічну модель, що дозволила оцінити основні параметри газу та частинок у спрощених умовах.

Дослідження проведено для частинок нікелю при температурах застою газу 440°C, 520°C та 620°C і діаметрах частинок 10, 25 і 40 μm. Результати CFD, які враховують реальні газодинамічні ефекти — турбулентність, в'язкісні втрати та взаємодію частинок із потоком — порівняно з аналітичними розрахунками показали нижчі швидкості частинок (на $50 \pm 7\%$) та вищі температури (на $22 \pm 7\%$). Такі відмінності пояснюються впливом теплових втрат, розвитком прикордонного шару та утворенням вторинних течій, що виникають унаслідок підсмоктування атмосферного газу разом із порошком у розширювальну частину сопла. Ці ефекти порушують ідеальне ізоентропне розширення, закладене в аналітичній моделі, що призводить до зменшення швидкості газу й частинок, але до підвищення температури останніх.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що ізоентропна модель переоцінює швидкість частинок приблизно на $50 \pm 7\%$ і недооцінює температуру частинок на $22 \pm 7\%$ порівняно з CFD-моделюванням. Такі розбіжності свідчать про обмеженість застосування спрощених аналітичних підходів для моделювання процесів у соплах низького тиску з дозавантаженням порошку за потоком. Незважаючи на це, ізоентропна модель може бути використана для попередніх оцінок або для аналізу процесів у соплах високого тиску, де впливи турбулентності, в'язкості та вторинних течій менш суттєві.

Результати CFD-моделювання також показали, що поточна геометрія сопла низького тиску є неоптимальною для досягнення максимальної швидкості частинок перед ударом у підкладку, що може негативно впливати на ефективність осадження. Удосконалення профілю сопла, зокрема оптимізація кута розширення та довжини дифузорної ділянки, дозволяє підвищити швидкість газового потоку й покращити умови прискорення частинок, що своєю чергою сприятиме збільшенню ефективності осадження та покращенню адгезійних властивостей покриття.

Отримані результати формують наукові засади для розроблення ефективної методології проектування та оптимізації надзвукових сопел для процесу холодного напилення. Вони також створюють передумови для підвищення ефективності процесу, покращення якості покриттів і розширення промислових застосувань технології холодного газодинамічного напилення. Подальші дослідження мають бути спрямовані на експериментальну перевірку чисельних результатів, уточнення аналітичних моделей і врахування впливу складніших фізичних факторів, таких як розподіл розмірів частинок, турбулентні структури потоку та нерівномірність температурного поля в соплі.

Таким чином, у роботі показано, що застосування сучасних CFD-інструментів дає змогу глибше зрозуміти реальні процеси у соплі холодного напилення та виявити недоліки спрощених аналітичних моделей. Комплексне використання чисельних і аналітичних підходів забезпечує більш повне уявлення про процес прискорення частинок і може бути використане як ефективний інструмент для інженерного прогнозування, оптимізації геометрії сопел та розроблення нових установок холодного газодинамічного напилення низького тиску.

Список використаних джерел:

1. Jafari, R., Cizek, J., Lukac, F., Cvrcek, L., Buri, M., Walter, J., Honkanen, M., Vippola, M. & Koivuluoto, H. A Comparative Study on Wear Resistance of Cold-Sprayed Aluminum/Quasicrystal Composite Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2024, vol. 33, pp. 705–718. DOI: 10.1007/s11666-024-01758-8
2. Zhang, M., Zhou, S., Huang, R., Xu, F., Wang, J., Dai, S., Zhang, Y. & Zhu, L. Cold sprayed Cu-coated AlN reinforced copper matrix composite coatings with improved tribological and anticorrosion properties. *Surface and Coatings Technology*, 2025, vol. 496, article no. 131666. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2024.131666
3. Liu, Q., Gong, C., Zhou, C., Liang, T., Hao, Z., Wang, Z. & Tian, X. Comparative Analysis of Mechanical and Electrical Properties of Graphene/Copper Composite Coating on PEEK via Cold Spray with Varied Nozzle Speed. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2024, vol. 33, pp. 2209–2226. DOI: 10.1007/s11666-024-01853-w
4. Assadi, H., Kreye, H., Gärtner, F. & Klassen, T. Cold spraying – a materials perspective. *Acta Materialia*, 2016, vol. 116, pp. 382–407. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.06.034