

НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АЕРОКОСМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ АВІАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Поливняний Сергій Олександрович

УДК 621.452.32.03:669.295:621.793.7(043)

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТІВ НА
ДЕТАЛЯХ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ХОЛОДНИМ ГАЗОДИНАМІЧНИМ
НАПИЛЮВАННЯМ**

132 Матеріалознавство

(шифр та назва спеціальності)

13 Механічна інженерія

(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ С. О. Поливняний

Науковий керівник Долматов Анатолій Іванович

доктор технічних наук, професор;

Шорінов Олександр Володимирович,

кандидат технічних наук, доцент

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Поливяний С. О. Удосконалення технології формування покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 – Матеріалознавство. – Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, 2025.

Дисертацію присвячено вирішенню важливого науково-технічного завдання з подовження ресурсних показників деталей авіаційних двигунів з титанових сплавів на основі науково-обґрунтованих рекомендацій з нанесення захисних і відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилюванням. Актуальність роботи зумовлена тим, що основною перешкодою впровадження технології холодного газодинамічного напилювання з робочим тиском повітря до 1,0 МПа в виробничі процеси на етапах виготовлення нових та відновлювального ремонту пошкоджених та зношених деталей, є відсутність достатньої теоретичної та експериментальної бази щодо призначення технологічних режимів нанесення покриттів з урахуванням характеристик матеріалів порошку та основи для напилювання, що в свою чергу, є актуальним завданням фізико-технічного оброблення.

В першому розділі дисертаційної роботи виконано аналіз титанових сплавів, які використовуються для виготовлення деталей авіаційної та ракетно-космічної техніки, зокрема їх застосування в авіадвигунобудуванні, а також найбільш поширених експлуатаційних дефектів та причин виникнення. Проведено критичний аналіз існуючих методів і технологій зміцнення і відновлення поверхневих шарів деталей з титанових сплавів. Визначено перспективи холодного газодинамічного напилювання для формування захисних і відновлювальних покриттів на деталях з титанових сплавів, та сформульовано мету роботи як подовження ресурсу роботи деталей авіаційної техніки з титанових сплавів за рахунок вдосконалення технології нанесення

відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилюванням, а також визначено завдання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети.

В другому розділі наведено опис обладнання для холодного газодинамічного напилювання, подано інформацію про матеріали порошку та підкладки для напилювання. Описано методики та обладнання для проведення експериментальних досліджень з визначення характеристик покриттів (адгезійної міцності, мікротвердості, коефіцієнту використання порошку) та металографічних досліджень. Застосування сучасних методів і обладнання для досліджень дало змогу отримати достовірні дані щодо характеристик покриттів.

В третьому розділі роботи подано результати теоретичних досліджень температури та швидкості частинок нікелю на виході з надзвукового сопла для холодного газодинамічного напилювання установки ДИМЕТ-405, виконаного за ежекторною схемою, від температури газу на вході в сопло, а також їх діаметру, отриманих з використанням одновимірної ізоентропійної моделі. Результати розрахунків порівняно з результатами чисельного моделювання двофазного потоку в надзвуковому соплі в середовищі ANSYS Fluent. Показано та описано взаємодію потоку з частинками порошку в каналі надзвукового звужувально-розширеного сопла для напилювання. Отриманні дані дозволили зробити висновок про вплив вторинного потоку, з яким порошок подається в розширену частину сопла, на основний потік та, як наслідок, на температурно-швидкісні характеристики частинок, а також надати обґрунтовані рекомендації щодо вибору режимів напилювання та діаметру частинок за критерієм максимальної швидкості частинок на виході з сопла.

В четвертому розділі роботи подано результати досліджень комплексного впливу параметрів холодного напилювання низького тиску, а саме температури на вході в сопло, дистанції напилювання, і витрати порошку на адгезійну міцність покриттів та коефіцієнт використання порошку з композиційної порошкової суміші на основі нікелю з додаванням оксиду алюмінію на підкладку з титанового сплаву ВТЗ-1. Дослідження проводилися за методиками планування багатofакторного експерименту за програмою центрального

композиційного плану з центрами на гранях. За результатами експериментальних даних було отримано рівняння регресії для визначених цільових функцій – адгезійної міцності покриттів та коефіцієнту використання порошку. Для перевірки адекватності моделі було проведено дисперсійний аналіз, за результатами якого встановлено, що отримані емпіричні залежності при 5%-му рівні значущості є адекватними та можуть бути використані для прогнозування адгезійної міцності покриттів та коефіцієнту використання порошку з порошкової суміші нікель + оксид алюмінію на підкладки з титанового сплаву VT3-1 в заданих діапазонах значень визначених режимів напилювання. Було виконано багатофакторну оптимізацію параметрів напилювання з метою отримання максимальних значень адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку із застосуванням методології поверхні відгуку в програмному пакеті Stat-Ease 360. З отриманих емпіричних моделей були побудовані тривимірні та контурні графіки залежності адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку від температури газу а вході в сопло, витрати порошку та дистанції напилювання в досліджуваних діапазонах значень. Отримано оптимальну комбінацією параметрів холодного газодинамічного напилювання з робочим тиском повітря до 1,0 МПа, що забезпечує отримання максимальної адгезійної міцності близько 35 МПа і коефіцієнту використання порошку близько 30 % покриття з композиційної порошкової суміші на основі нікелю з додаванням частинок оксиду алюмінію. Досліджено вплив робочої температури повітря на вході в сопло на мікротвердість покриттів, а також їх мікроструктуру.

В п'ятому розділі подано практичні рекомендації щодо процесу відновлення пошкоджених поверхонь холодним газодинамічним напилюванням, який охоплює етапи підготовки поверхні до напилювання, нанесення покриття та його подальшого оброблення. Показано приклад реального застосування результатів дисертаційного дослідження – розроблено технологічний процес відновлення зношеної поверхні корпусної деталі авіаційного двигуна з

титанового сплаву з подальшим відпрацюванням технології та техніко-економічним аналізом її промислового використання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

- уперше отримано закономірності температурно-швидкісних характеристик частинок нікелевого порошку в каналі сопла, виконаного за ежекторною схемою, для холодного газодинамічного напилювання з робочим тиском до 1,0 МПа, від температури повітря на вході в сопло та діаметру частинок, що дозволило обрати оптимальні температурний режим напилювання та розмір фракції порошку за критерієм максимальної швидкості частинки на виході з сопла;

- уперше теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість використання композиційної порошкової суміші на основі нікелю з додаванням оксиду алюмінію для формування захисних і відновлювальних покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням з робочим тиском повітря до 1,0 МПа, застосування якої підвищує ресурс деталей при їх відновлювальному ремонті;

- уперше на базі експериментальних даних одержано закономірності впливу режимів холодного газодинамічного напилювання з робочим тиском повітря до 1,0 МПа (температура повітря, витрата порошку, дистанція напилювання) на характеристики покриттів (адгезійна міцність, мікротвердість, мікроструктура, коефіцієнт використання порошку), нанесені на титанові сплави. Отримані емпіричні залежності описуються поліномом другого порядку і дають змогу прогнозувати адгезійну міцність покриттів і коефіцієнт використання порошку на титанових сплавах з композиційних порошкових сумішей.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у тому, що автором одержано нові науково-обґрунтовані результати, які є основою розроблення технологічних процесів подовження ресурсу роботи деталей авіаційної техніки з титанових сплавів, та дозволяють на етапі їх ремонту здійснити вибір раціональних режимів напилювання відновлювальних покриттів для забезпечення заданих їх властивостей при мінімальній собівартості одержання.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено і впроваджено технологічні рекомендації з нанесення відновлювальних покриттів на пошкоджені поверхні деталей з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням. Технологія може бути використана для відновлення широкої номенклатури деталей з титанових сплавів авіаційної та іншої техніки.

Запропоновано спосіб відновлення зношених поверхонь деталей, технічну новизну якого захищено патентом України на корисну модель (пат. № 156794, опубл. 07.08.2024, бюл. №32/2024).

Результат роботи у вигляді розроблених технологічних рекомендацій з відновлення зношених поверхонь корпусу сателіту з титанового сплаву BT5JL холодним газодинамічним напилюванням впроваджено у виробничий процес АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя). Проведені експлуатаційні випробування показали, що передбачуваний міжремонтний ресурс відремонтованих корпусів щонайменше відповідає нормативному міжремонтному ресурсу нової деталі. Встановлено, що собівартість відновлення одного корпусу склала менше 25% від ціни нової деталі. За умови річної програми ремонту 20 корпусів сателіту, очікуваний річний економічний ефект може становити 166 244,0 грн. (акт про використання результатів дисертаційної роботи на АТ «Мотор Січ, Додаток Б).

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджені в навчальний процес і науково-дослідній частині Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”, і використовуються в лекційному курсі “Технології виробництва та ремонту двигунів та енергетичних установок” для студентів другого рівня вищої освіти спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка (акт про використання результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі та науково-дослідній частині, Додаток Б).

Ключові слова: газотермічне напилювання, захисно-відновлювальні покриття, композиційний порошок, газовий потік, поверхневий шар, чисельне моделювання, надзвукове сопло, мікроструктура, адгезія, оптимізація, титанові сплави, ресурс.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

1) Дослідження впливу температури газу процесу холодного газодинамічного напилювання на адгезійну міцність нікелевмісних покриттів / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливяний, К. Б. Балушок. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023, № 4, спецвипуск 2 (190). С. 82-88. DOI: 10.32620/akt.2023.4sup2.11

2) Шорінов О. В., Долматов А. І., Поливяний С. О. Експериментальне дослідження впливу параметрів газодинамічного напилювання на коефіцієнт використання порошку / *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2022, №4 спецвипуск 2 (182). С. 123–128. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup2.19

3) Шорінов О. В., Поливяний С. О. Визначення енергетичних параметрів частинок порошку Ni+Al₂O₃ в надзвуковому соплі при газодинамічному напилюванні аналітичним методом / *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2022, №2. С. 64–70. DOI: 10.15588/1607-6885-2022-2-11

4) Шорінов, О. В., Поливяний, С. О. Вплив діаметру частинок порошку нікелю на їх швидкість і температуру при холодному газодинамічному напилюванні [Текст] / О. В. Шорінов, С. О. Поливяний // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2021, № 4(173) спецвипуск 1, С. 110–116. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.15

Статті у наукових періодичних виданнях включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

5) Shorinov, O., Dolmatov, A., Polyviany, S., Balushok, K. Optimization of cold spray process parameters to maximize adhesion and deposition efficiency of

Ni+Al₂O₃ coatings. *Materials Research Express*, 2023, 10(12), p. 126401. DOI: 10.1088/2053-1591/ad11fd (**Scopus, Q2**)

6) Shorinov, O. V., Polyviany, S. A. Simulation of gas flow with nanocomposite powders in a supersonic nozzle. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2022, 44(5), pp. 601–611. DOI: 10.15407/mfint.44.05.0601? (**категорія «А», Scopus, Q3**)

7) Dolmatov, A. I., Polyviany, S. A. Interaction of solid particles from a gas stream with the surface of a flat nozzle. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2021, 43(3), pp. 319–328. DOI: 10.15407/mfint.43.03.0319 (**категорія «А», Scopus, Q3**)

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8) Shorinov, O., Polyviany, S., Dolmatov, A. Calculation of Velocity and Temperature of Nickel Powder Particles in a Supersonic Nozzle During Low-Pressure Cold Spraying. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2022. ICTM 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 657. Springer, Cham (2023). DOI: 10.1007/978-3-031-36201-9_30 (**Scopus**)

9) Volkov, A., Shorinov, O., Polyviany, S. Deposition of titanium-containing coatings by low-pressure cold spraying. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds.) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – ICTM 2021, Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 367, pp. 565–574. Springer, Cham (2022). DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5_48 (**Scopus**)

10) Шорінов О. В., Долматов А. І., Поливяний С. О., Балущок К. Б. Забезпечення адгезійної міцності покриттів на основі нікелю, отриманих холодним газодинамічним напилюванням / Матеріали ХХVІІІ Міжнародного конгресу двигунобудівників – Харків, ХАІ, 2023, с. 39
<https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/5575>

11) Шорінов О. В., Долматов А. І., Поливяний С. О. Дослідження пористості та коефіцієнту використання порошку на основі нікелю холодним газодинамічним напилюванням / ХХVІІ – Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк.

авіац. ін-т», 2022 – 62 с.
<https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/3000>

12) О. В. Шорінов, С. О. Поливняний. Відновлення пошкоджених деталей ГТД з титанових сплавів газотермічними методами / XXVI – Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2021 – 93 с.
https://library.khai.edu/library/fulltexts/doc/Tesis_2021.pdf

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13) Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей. Патент на корисну модель 156794 Україна, МПК(2006) С 23 С 24/04. – О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливняний; заявник і патентовласник Національній аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; – № u2023 06080; заявл. 14.12.2023; опубл. 07.08.2024, Бюл. № 32/2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1813588/>.

ABSTRACT

Polyvianny S. O. Improvement of the cold spraying technology of coatings deposition on titanium alloy parts. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation submitted for the Doctor of Philosophy degree in the Areas of Knowledge 13 Mechanical Engineering, Programme Subject Area 132 Material Sciences. – National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, 2025.

The dissertation is devoted to solving an important scientific and technical problem of extending the service life of titanium alloy components used in aircraft engines. This is achieved through scientifically substantiated recommendations for applying protective and restorative coatings using cold gas dynamic spraying. The relevance of the work lies in the fact that the main obstacle to implementing cold gas dynamic spraying technology with an air working pressure of up to 1.0 MPa in

production processes – during both the manufacturing of new parts and the repair of damaged or worn components – is the lack of sufficient theoretical and experimental foundation for determining the coating process parameters. These parameters must consider the properties of both the powder material and the substrate, which is a critical issue in physical and technical surface treatment.

In the first chapter of the dissertation, an analysis of titanium alloys used in the manufacture of components for aviation and aerospace technology is conducted, with a particular focus on their use in aircraft engine construction. The most common operational defects and their causes are also discussed. A critical review of existing methods and technologies for strengthening and restoring surface layers of titanium alloy components is presented. The prospects of using cold gas dynamic spraying for forming protective and restorative coatings on titanium alloy parts are identified. The goal of the research is defined as extending the operational life of titanium alloy components in aircraft by improving the technology of applying restorative coatings via cold gas dynamic spraying. The specific research objectives necessary to achieve this goal are also outlined.

The second chapter provides a description of the equipment used for cold gas dynamic spraying, as well as details about the powder materials and substrate materials used in the process. The methodologies and equipment for conducting experimental studies – aimed at determining coating properties such as adhesion strength, microhardness, and powder utilization rate – are described, along with metallographic examination techniques. The use of modern research methods and equipment has enabled the acquisition of reliable data regarding the characteristics of the applied coatings.

The third chapter presents the results of a theoretical investigation into the temperature and velocity of nickel particles at the exit of a supersonic nozzle used in the DYMET-405 low-pressure cold spray system with an ejector-type design. The study examines the influence of gas inlet temperature and particle diameter, using a one-dimensional isentropic model. The analytical results are compared with those obtained from numerical simulation of the two-phase flow in the supersonic nozzle

using ANSYS Fluent. The interaction between the gas flow and powder particles in the channel of the converging-diverging supersonic nozzle is demonstrated and described. The data obtained made it possible to assess the impact of the secondary flow, through which the powder is introduced into the divergent section of the nozzle, on the primary flow and, consequently, on the thermal and velocity characteristics of the particles. Based on this analysis, well-grounded recommendations were provided regarding the selection of spraying parameters and particle diameters to ensure maximum particle velocity at the nozzle exit.

The fourth chapter presents the results of investigations into the combined effects of cold spraying process parameters under low-pressure conditions, namely, gas inlet temperature, spraying distance, and powder feed rate, on the adhesion strength of coatings and the powder utilization efficiency. The coatings were formed using a composite powder mixture based on nickel with the addition of aluminum oxide, deposited on a VT3-1 titanium alloy substrate. The research was carried out using a multifactor experimental design following a central composite design with axial points on the face-centered cube. Based on the experimental results, regression equations were derived for the target functions, coating adhesion strength and powder utilization coefficient. To validate the adequacy of the model, an analysis of variance (ANOVA) was performed. The results showed that the empirical relationships obtained are statistically significant at the 5% level and can be used to predict adhesion strength and powder utilization efficiency for the nickel + aluminum oxide composite powder sprayed onto VT3-1 titanium alloy substrates within the investigated parameter ranges.

A multifactor optimization of spraying parameters was conducted with the aim of maximizing both adhesion strength and powder utilization efficiency, using response surface methodology (RSM) implemented in the Stat-Ease 360 software package. Based on the empirical models, three-dimensional surface and contour plots were constructed to visualize the relationships between the input variables – gas inlet temperature, powder feed rate, and spraying distance – and the response variables. An optimal combination of cold gas dynamic spraying parameters with an air working pressure of up to 1.0 MPa was identified. This combination ensures the achievement

of maximum adhesion strength of approximately 35 MPa and powder utilization efficiency of about 30% for coatings formed from the nickel-based composite powder with aluminum oxide particles. Additionally, the effect of air inlet temperature on the microhardness and microstructure of the coatings was studied.

The fifth chapter provides practical recommendations for the process of restoring damaged surfaces using cold gas dynamic spraying. The proposed process includes surface preparation, coating application, and post-treatment stages. A practical example of implementing the dissertation's findings is presented – a technological process was developed for restoring a worn housing component of an aircraft engine made of titanium alloy. This process was followed by technological refinement and a techno-economic analysis of its potential for industrial application.

Scientific novelty of the obtained results includes the following:

- For the first time, the relationships governing the temperature and velocity characteristics of nickel powder particles in the nozzle channel with an ejector-type configuration for low-pressure cold gas spraying (operating pressure up to 1.0 MPa) have been obtained as a function of the air temperature at the nozzle inlet and particle diameter. This made it possible to determine the optimal spraying temperature regime and powder particle size based on the criterion of achieving the maximum particle velocity at the nozzle exit.

- For the first time, the use of a composite powder mixture based on nickel with aluminum oxide additives has been theoretically substantiated and experimentally confirmed for forming protective and restorative coatings on titanium alloy parts using cold gas dynamic spraying at air pressures up to 1.0 MPa. Its application increases the service life of parts during restorative repair.

- For the first time, experimental data have been obtained and the patterns of influence of cold gas dynamic spraying parameters, namely, air temperature, powder feed rate, and spraying distance, at air pressures up to 1.0 MPa on coating characteristics (adhesion strength, microhardness, microstructure, and powder utilization efficiency) applied to titanium alloys have been established. The obtained empirical relationships are described by second-order polynomials, allowing prediction of adhesion strength and powder utilization for composite powder coatings on titanium alloys.

The practical significance of the dissertation lies in the author's development of new, scientifically substantiated results that serve as a foundation for designing technological processes aimed at extending the service life of titanium alloy components in aircraft. These findings also enable the selection of optimal parameters for restorative coating deposition during repairs, ensuring desired coating properties at minimum cost.

Based on theoretical and experimental studies, technological recommendations were developed and implemented for applying restorative coatings to damaged surfaces of titanium alloy components using cold gas dynamic spraying. The technology is suitable for restoring a wide range of titanium alloy parts used in aviation and other industries. A method for restoring worn surfaces has been proposed, the technical novelty of which is protected by a Ukrainian utility model patent (Patent No. 156794, published on August 7, 2024, Bulletin No. 32/2024).

The results of this work, in the form of developed technological recommendations for the restoration of worn satellite housing surfaces made of VT5L titanium alloy using cold gas dynamic spraying, have been implemented into the production process of JSC «Motor Sich» (Zaporizhzhia). Operational tests confirmed that the expected overhaul life of the repaired housings is at least equal to the standard service life of a new part. It was found that the cost of restoring one housing amounted to less than 25% of the cost of a new component. Given an annual repair program of 20 satellite housings, the expected annual economic effect could reach 166,244.0 UAH (act on the application of the dissertation results at JSC «Motor Sich», Appendix «Б»).

Theoretical and practical outcomes of the research have also been integrated into the educational process of the National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» and are used in the lecture course «Production and Repair Technologies for Engines and Power Plants» for master's degree students of specialty 134 «Aviation and Rocket-Space Engineering» (act on the application of the dissertation results in the educational process, Appendix «Б»).

Keywords: thermal spraying, protective and restorative coatings, composite powder, gas flow, surface layer, numerical modeling, supersonic nozzle, microstructure, adhesion, optimization, titanium alloys, service life.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПИТАННЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ	24
1.1 Використання титанових сплавів в авіадвигунобудуванні	24
1.2 Деякі проблеми використання титанових сплавів	27
1.3 Дефекти деталей ГТД та причини їх виникнення	30
1.4 Аналіз газотермічних методів напилювання покриттів для зміцнення та відновлення поверхонь деталей з титанових сплавів	35
1.5 Холодне газодинамічне напилювання.....	37
1.5.1 Особливості методу	37
1.5.2 Обладнання для напилювання.....	40
1.5.3 Порошки для напилювання.....	43
1.5.4 Області застосування.....	44
1.6 Висновки, постановка мети та завдань дослідження.....	47
РОЗДІЛ 2. ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	50
2.1 Обладнання для холодного газодинамічного напилювання	50
2.2 Матеріали для проведення досліджень	53
2.2.1 Вибір матеріалу порошку	53
2.2.2 Вибір матеріалу підкладки та методу підготовки поверхні до напилювання	55
2.3 Методи та обладнання для дослідження мікроструктури покриттів	55
2.4 Методи та обладнання для дослідження адгезійної міцності покриттів ...	57
2.5 Методи та обладнання для дослідження мікротвердості покриттів.....	59
2.6 Методика розрахунку коефіцієнту використання порошку.....	61
2.7 Висновки до розділу 2.....	61
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ХГН	63
3.1 Газодинамічні основи ХГН	63

3.1.1 Одновимірна ізоентропійна модель розрахунку параметрів газу в соплі	63
3.1.2 Модель розрахунку параметрів частинки порошку в газовому потоці	73
3.1.3 Результати розрахунків температурно-швидкісних параметрів газу та частинки в соплі СК-20.....	79
3.2 Чисельне моделювання газодинаміки двофазного потоку.....	81
3.2.1 Створення розрахункової моделі, розрахункової сітки, налаштування початкових та граничних умов	81
3.2.2 Основні рівняння	83
3.2.3 Модель турбулентності.....	87
3.2.4 Дискретна фаза (частинки порошку).....	87
3.2.5 Результати чисельного моделювання.....	89
3.3 Обговорення отриманих результатів.....	95
3.3.1 Порівняння результатів, отриманих за ізоентропійною моделлю та CFD-моделюванням	95
3.3.2 Валідація результатів CFD-моделювання.....	97
3.4 Висновки до розділу 3.....	99
РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПOKPИTTIB	101
4.1 Планування багатофакторного експерименту	101
4.1.1 Вибір незалежних змінних процесу напилювання	103
4.1.2 Визначення рівнів та інтервалів варіювання незалежних змінних	104
4.1.3 Розроблення матриці експерименту	104
4.1.4 Проведення експериментів.....	107
4.1.5 Отримання емпіричних залежностей	108
4.2 Аналіз впливу досліджуваних параметрів процесу на адгезійну міцність і коефіцієнт використання порошку	112
4.3 Пошук оптимальних параметрів напилювання	119
4.4 Перевірка достовірності моделі	120
4.5 Результати досліджень мікроструктури покриттів	121

	16
4.6 Результати досліджень мікротвердості покриттів	127
4.7 Висновки до розділу 4.....	128
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ТА ПРАКТИЧНЕ	
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	130
5.1 Практичні рекомендації щодо ведення технологічного процесу ХГН	130
5.1.1 Підготовка поверхні деталей перед напилюванням	131
5.1.2 Ізоляція поверхонь, що не підлягають напилюванню	134
5.1.4 Загальні рекомендації щодо механічного оброблення газодинамічних покриттів	136
5.2 Розроблення технологічного процесу відновлення корпусу сателіту.....	139
5.3 Розрахунок економічної ефективності від впровадження розробленої технології.....	146
5.4 Практична реалізація та впровадження результатів дослідження.....	150
5.5 Висновки до розділу 5.....	151
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	153
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	156
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	176
ДОДАТОК Б. Акти про використання результатів	179

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. У складних умовах, в яких нині перебуває Україна, питання підвищення довговічності деталей авіаційної техніки набуває критичного значення, адже безпосередньо впливає на боєздатність армії та безпеку держави, тобто стосується важливої проблеми національної безпеки та оборони. Посилення інтенсивності використання авіаційної техніки, що спостерігається з початком широкомасштабної збройної агресії російської федерації, призвело до суттєвого збільшення нальоту літаків і вертольотів. Це в свою чергу стало причиною швидкого вичерпання залишкового ресурсу деталей газотурбінних двигунів і так старіючого парку авіаційної техніки. Статистичні дані свідчать, що понад 80% випадків виходу з ладу авіаційної техніки зумовлені значним зношенням її деталей, що призводить до зростання витрат на ремонт, особливо імпортованих комплектуючих, а також до простоювання техніки, спричиненого очікуванням заміни або відновлення деталей.

Основним напрямом підтримки справності авіаційної техніки Збройних Сил України в період активних бойових дій залишається її ремонт та відновлення. Наразі існує об'єктивна потреба в розробленні нових та вдосконаленні існуючих технологій подовження ресурсу деталей авіаційних двигунів з титанових сплавів. Основними причинами втрати працездатності таких деталей є низькі характеристики матеріалу при роботі на тертя та знос. Погані антифрикційні властивості, зумовлені налипанням титану на інші матеріали, значно ускладнюють його використання у вузлах тертя, а титан у парі з титаном практично не може працювати на тертя.

Холодне газодинамічне напилювання (ХГН) є перспективним методом нанесення захисних і відновлювальних покриттів. На відміну іншим газотермічним методам, головною особливістю ХГН є утворення покриттів з частинок порошку в твердій фазі, без плавлення, за рахунок їх високої кінетичної енергії при зіткненні. Відсутність значного температурного впливу на матеріал

деталі, дозволяє використовувати метод для нанесення покриттів на алюмінієві, магнієві та титанові сплави. Однак широкому впровадженню методу у практику авіадвигунобудування та ремонту заважає відсутність системних досліджень процесу формування покриттів на титанові сплави, недостатня вивченість закономірностей впливу режимних параметрів напилювання, відсутність даних щодо вибору оптимальних параметрів процесу для забезпечення надійної експлуатації деталей з покриттями в поєднанні з високою ефективністю процесу їх напилювання.

Отримання таких даних надасть можливість науково-обґрунтованого вибору раціональних режимів напилювання покриттів для обраних порошкових матеріалів з оптимальним розміром фракції, що в сукупності дозволить реалізувати ідею з використання холодного газодинамічного напилювання для розв'язання важливого наукового завдання з підвищення ресурсу деталей з титанових сплавів на етапі відновлювального ремонту.

Дисертаційна робота виконана згідно з пріоритетним напрямом розвитку науки і техніки України (стаття 5 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (із змінами, редакція від 13.01.2024 р., підстава – 3534-IX)) у частині «Нові речовини і матеріали» пункті «Нові матеріали та речовини спеціального призначення з унікальними властивостями і функціональними характеристиками та технології їх виготовлення» (затверджено постановою Кабінету Міністрів України № 476 від 30.04.2024 р.).

Мета та завдання дослідження. *Метою роботи є* подовження ресурсу роботи деталей авіаційної техніки з титанових сплавів за рахунок удосконалення технології нанесення відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилюванням.

Для досягнення поставленої мети було вирішено такі основні *завдання*:

1. Дослідити вплив параметрів газу на вході в надзвукове сопло для напилювання на процес прискорення та нагрівання частинок порошку в газовому потоці в каналі сопла, виконаного за ежекторною схемою.

2. Встановити залежності впливу режимних параметрів холодного газодинамічного напилювання на характеристики покриттів – адгезійну міцність, мікротвердість та мікроструктуру.

3. Дослідити залежність коефіцієнту використання порошку від режимів напилювання та надати рекомендації щодо їх вибору для забезпечення максимальних значень цього параметру;

4. Розробити технологічні рекомендації з нанесення відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилювання для подовження ресурсу роботи корпусних деталей з титанових сплавів; розрахувати основні техніко-економічні показники; узагальнити і запропонувати для практичного використання розроблені положення на виробничих підприємствах авіаційної промисловості України.

Об'єкт дослідження – процес холодного газодинамічного напилювання покриттів на деталі авіаційних двигунів.

Предмет дослідження – закономірності впливу режимів холодного газодинамічного напилювання на температурно-швидкісні характеристики двофазного потоку та властивості покриттів на титанових сплавах.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у дисертаційній роботі було використано класичні методи обчислювальної газодинаміки, включно з методами дослідження двофазних потоків. Як інструмент чисельного моделювання застосовувалися сучасні обчислювальні пакети на основі методу скінчених об'ємів. Експериментальні дослідження властивостей покриттів проводилися з використанням методу багатофакторного планування експерименту, регресійного аналізу та математичного оброблення статистичних даних, що дозволило представити процес у вигляді функціональних залежностей вхідних і вихідних параметрів при оптимізації режимів напилювання та прогнозування характеристик покриттів. Дослідження особливостей мікроструктури покриттів, межі контакту покриття з підкладкою, структурно-фазового складу покриттів виконувалися методами рентгеноспектрального аналізу, оптичної та електронної мікроскопії. Також

комплекс досліджень включав методи інженерної механіки для дослідження адгезійної міцності та мікротвердості покриттів. Дослідження коефіцієнту використання порошку проводилося методом зважування зразків до та після нанесення покриттів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в такому:

- уперше отримано закономірності температурно-швидкісних характеристик частинок нікелевого порошку в каналі сопла, виконаного за ежекторною схемою, для холодного газодинамічного напилювання з робочим тиском до 1,0 МПа, від температури повітря на вході в сопло та діаметру частинок, що дозволило обрати оптимальні температурний режим напилювання та розмір фракції порошку за критерієм максимальної швидкості частинки на виході з сопла;

- уперше теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість використання композиційної порошкової суміші на основі нікелю з додаванням оксиду алюмінію для формування захисних і відновлювальних покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням з робочим тиском повітря до 1,0 МПа, застосування якої підвищує ресурс деталей при їх відновлювальному ремонті;

- уперше на базі експериментальних даних одержано закономірності впливу режимів холодного газодинамічного напилювання з робочим тиском повітря до 1,0 МПа (температура повітря, витрата порошку, дистанція напилювання) на характеристики покриттів (адгезійна міцність, мікротвердість, мікроструктура, коефіцієнт використання порошку), нанесені на титанові сплави. Отримані емпіричні залежності описуються поліномом другого порядку і дають змогу прогнозувати адгезійну міцність покриттів і коефіцієнт використання порошку на титанових сплавах з композиційних порошкових сумішей.

Особистий внесок здобувача. Усі основні результати, що становлять суть дисертації, отримані автором особисто. Формулювання теми, постановка мети і завдань дослідження, обговорення проміжних і остаточних результатів

дослідження, формулювання основних висновків було виконано разом із науковим керівником.

Основні результати за темою дисертації викладено у 13 публікаціях, з яких 4 статті у наукових періодичних виданнях включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus (з них одна стаття кuartиль Q2 і 3 статті кuartиль Q3); 4 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України (категорія Б); 2 матеріали конференцій, які індексуються у науково-метричній базі даних Scopus; 3 матеріали в збірниках тез доповідей вітчизняних конференцій; отримано 1 патент України на корисну модель

У роботах, що виконані в співавторстві, автору належать таке (див. Додаток А): проведено серію експериментальних досліджень з встановлення залежностей адгезійної міцності покриттів [1] і коефіцієнту використання порошку [2] від робочої температури стисненого повітря на вході в сопло; визначення температури і швидкості частинок порошку нікелю в залежності від їх діаметру та режимних параметрів процесу напилювання аналітичним методом [3, 8] і комп'ютерним моделюванням [4, 6]; визначено оптимальні режимні параметри процесу холодного газодинамічного напилювання, що забезпечують необхідні значення адгезійної міцності покриттів та максимального коефіцієнту використання композиційного порошку нікель + оксид алюмінію при напилюванні на титанові сплави [5, 10]; дослідження мікроструктури покриттів з композиційної порошкової суміші [11]; визначення особливостей взаємодії частинок порошку з газовим потоком в каналі сопла для напилювання [7]; аналіз можливостей утворення покриттів з композиційних порошкових сумішей на титанових сплавах холодним газодинамічним напилюванням [9]; розроблення технологічних рекомендацій з напилювання відновлювальних покриттів на деталі з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням [12, 13].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення, розділи й результати роботи викладено й обговорено на наукових семінарах кафедри технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», на всеукраїнських і міжнародних науково-технічних конференціях, зокрема на XXVI, XXVII і XXVIII Міжнародному конгресі двигунобудівників (с.м.т. Лазурне, Херсонська область, Україна, 2021 р.; онлайн – 2022 і 2023 рр.). Доповіді на міжнародних конференціях, *матеріали яких індексуються базою Scopus: International Scientific and Technical Conferences on Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – Synergetic Engineering ICTM'2021 і ICTM'2022* (м. Харків, Україна, 2021 і 2022 рр.).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація містить анотацію, вступ, п'ять розділів, висновки, список використаних джерел і додатки. Повний обсяг дисертації становить 180 сторінок, у тому числі основного тексту 138 сторінок, 42 рисунка, 15 таблиць, список використаних джерел із 189 найменувань на 20 сторінках, 2 додатки на 5 сторінках.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

В основу дисертації покладено матеріали, що узагальнюють дослідження, виконані автором при реалізації держбюджетних тем Міністерства освіти і науки України: «Розроблення комплексної технології відновлення й ремонту деталей авіаційної (вертолітної) техніки холодним газодинамічним напилюванням з наступною обробкою різанням» (№ ДР 0122U001341), а також господарських договорів між Національним аерокосмічним університетом «Харківський авіаційний інститут» і АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя): «Дослідження параметрів якості поверхневого шару при напилюванні захисних покриттів на деталі ГТД з порошків, що використовуються на АТ «Мотор Січ» (№ 204-3/2018, 2018–2020 рр.) і «Нанесення захисних і відновлювальних покриттів на деталі ГТД газодинамічним напилюванням» (№204/2020 (УГТ), 2022–2023 рр.) де здобувач був відповідальним виконавцем від підприємства.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність дисертаційної роботи полягає у тому, що автором одержано нові науково-

обґрунтовані результати, які є основою розроблення технологічних процесів подовження ресурсу роботи деталей авіаційної техніки з титанових сплавів, та дозволяють на етапі їх ремонту здійснити вибір раціональних режимів напилювання відновлювальних покриттів для забезпечення заданих їх властивостей при мінімальній собівартості одержання.

На основі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено і впроваджено технологічні рекомендації з нанесення відновлювальних покриттів на пошкоджені поверхні деталей з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням. Технологія може бути використана для відновлення широкої номенклатури деталей з титанових сплавів авіаційної та іншої техніки.

Запропоновано спосіб відновлення зношених поверхонь деталей, технічну новизну якого захищено патентом України на корисну модель (пат. № 156794, опубл. 07.08.2024, бюл. №32/2024).

Результат роботи у вигляді розроблених технологічних рекомендацій з відновлення зношених поверхонь корпусу сателіту з титанового сплаву ВТ5Л холодним газодинамічним напилюванням впроваджено у виробничий процес АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя). Проведені експлуатаційні випробування показали, що передбачуваний міжремонтний ресурс відремонтованих корпусів щонайменше відповідає нормативному міжремонтному ресурсу нової деталі. Встановлено, що собівартість відновлення одного корпусу склала менше 25% від ціни нової деталі. За умови річної програми ремонту 20 корпусів сателіту, очікуваний річний економічний ефект може становити 166 244,0 грн. (акт про використання результатів дисертаційної роботи на АТ «Мотор Січ», Додаток Б).

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджені в навчальний процес і науково-дослідну частину Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”, і використовуються в лекційному курсі “Технології виробництва та ремонту двигунів та енергетичних установок” для студентів другого рівня вищої освіти спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка, а також науково-дослідну частину (акт про використання результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі і науково-дослідній частині, Додаток Б).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПИТАННЯ ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ З ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ

В розділі виконано аналіз титанових сплавів, які використовуються для виготовлення деталей авіаційної та ракетно-космічної техніки, зокрема їх застосування в авіадвигунобудуванні, а також найбільш поширених експлуатаційних дефектів та причин виникнення. Проведено критичний аналіз існуючих методів і технологій зміцнення поверхневих шарів деталей з титанових сплавів та нанесення покриттів. Визначено перспективи холодного газодинамічного напилювання для формування захисних і відновлювальних покриттів на деталях з титанових сплавів, й сформульовано мету роботи як продовження ресурсу роботи деталей авіаційної техніки з титанових сплавів шляхом розроблення технологічних рекомендацій з нанесення відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилюванням, а також визначено завдання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети.

1.1 Використання титанових сплавів в авіадвигунобудуванні

Сплави на основі титану в промислових масштабах почали використовуватися з другої половини ХХ сторіччя. Вони відрізняються високою механічною міцністю, жаростійкістю, високою корозійною стійкістю в багатьох агресивних середовищах тощо [1]. З метою підвищення певних властивостей титанових сплавів, зокрема, міцності, жароміцності та корозійної стійкості, використовується легування. Широке застосування знайшли сплави титану з легуванням алюмінієм, хромом, молібденом, ванадієм, марганцем, оловом та деякими іншими елементами [2].

Титанові сплави поділяються за способом виготовлення на деформовні та ливарні; за механічними властивостями – на сплави низької міцності та підвищеної пластичності, середньої міцності та високоміцні; за призначенням –

на конструкційні та жароміцні. За структурою титанові сплави класифікують на однофазні α - та β -сплави, псевдофазні та двофазні ($\alpha + \beta$)-сплави тощо [3].

Титанові сплави мають тенденцію до дедалі більшого застосування в різних галузях: літако-, вертольото-, ракетобудування, космічна техніка; хімія, нафтохімія, металургія, гальванотехніка, целюлозно-паперова промисловість, фарбувальні та поліграфічні виробництва, харчова, фармацевтична, мікробіологічна галузі промисловості; озброєння; турбінобудування; теплообмінна та опріснювальна техніка; медтехніка; нафтогазове обладнання; поховання радіоактивних відходів; суднобудування, електронна техніка, залізничний транспорт, спортивні товари, будівництво та архітектура, верстатобудування, легка промисловість, автомобілебудування тощо [4–7].

За питомою втомною міцністю титанові сплави перевершують інші матеріали, тому заміна алюмінієвих сплавів і сталей титановими сплавами значно підвищити питому втомну міцність [8]. Використання титанових сплавів у силових конструкціях, що працюють на вигин та поздовжній вигин, а також на розтяг, дає економію маси від 6 % до 50 %, а застосування їх замість алюмінієвих у конструкціях, що працюють на розтягування, дає економію маси до 14 %.

Титанові сплави широко застосовуються для виробництва деталей ГТД [9–11]. Матеріали сучасних авіаційних ГТД повинні мати високу жароміцність, жаростійкість і жорсткість при мінімальній масі. Вибір матеріалів, оптимальних для кожного температурного інтервалу експлуатації, доцільно проводити за питомими (віднесеними до густини) механічними характеристиками та корозійною стійкістю. Для силових конструкцій основними критеріями є питомі межі міцності σ_v/ρ і плинності $\sigma_{0,2}/\rho$, а для малонавантажених протяжних елементів – питомий модуль жорсткості E/ρ . Тривала експлуатація апаратів не тільки при постійних, а й за циклічних підвищених температурах вимагає врахування пластичних властивостей матеріалу та повзучості.

У двигунах сучасних реактивних літаків кількість використання титану складає від 15 % до 30 % від загальної маси (рисунок 1.1).

1.2 Деякі проблеми використання титанових сплавів

У низці випадків виникають проблеми, пов'язані з фізико-хімічною природою титану, його сплавів та умовами експлуатації. Малі значення модулів пружності титану – суттєвий недолік, оскільки у деяких випадках, для отримання досить жорстких конструкцій, доводиться застосовувати великі перетини виробів у порівнянні з тими, що необхідні з умов міцності. Окрім того, з підвищенням температури до 350 °С модулі пружності зменшуються майже за лінійним законом.

Азот, вуглець, кисень і водень, зміцнюючи титан, знижують його пластичність, опір корозії, зварюваність. Недоліком цих сплавів є схильність до водневої крихкості. Водень малорозчинний в α -фазі і присутній в структурі у вигляді гідридної фази, що знижує пластичність, особливо при повільному навантаженні, і в'язкість сплавів. При високих температурах (понад 700 °С) у сплавів з підвищеним вмістом титану проявляється високотемпературна крихкість. При цьому, міцність таких сплавів знижується проти вихідної, тобто відбувається їх розміцнення.

Деякі із зазначених недоліків титану можуть бути усунені за допомогою його легування. Титан легують переважно з метою підвищення міцності і жароміцності, рідше – для поліпшення корозійної стійкості.

Серед основних недоліків функціональних конструкційних властивостей титанових сплавів виготовлення деталей можна назвати наступні. По-перше, це низькі характеристики матеріалів при роботі на тертя та знос. Низькі антифрикційні властивості через високий коефіцієнт тертя є одним із суттєвих недоліків титанових сплавів [15]. Тому деталі механізмів і машин, що працюють в умовах інтенсивного тертя, стають непридатними раніше, ніж інші складові ланки конструкції і вся конструкція в цілому виявляється непрацездатною. Погані антифрикційні властивості, зумовлені налипанням титану на багато матеріалів, значно ускладнюють його використання у вузлах тертя, а титан у парі з титаном практично не може працювати на тертя. Досі не знайдено матеріалу,

що задовільно працює у парі з незмінним титаном [16]. Дослідження показують, що титан та його сплави при роботі з іншими металами або переносяться (налипають) на поверхню більш твердого металу, після чого тертя протікає як у парі титан-титан, або на поверхню титану відбувається перенесення м'якшого металу і тертя протікає як в однойменній парі з м'якого металу. У таких парах спостерігається і взаємне перенесення [17, 18].

Зменшення негативного впливу вищеописаного явища можливе за допомогою електроіскрового легування [19] та термічного оксидування [20, 21], у зв'язку з чим працездатність різних антифрикційних матеріалів оцінюється, в основному, при терті оксидованого титану. Оксидування титану та його сплавів повітрям здійснюється у звичайних електричних печах при вільному доступі повітря до поверхні металу в інтервалі температур від 700 °С до 900 °С [22]. Вибір зазначеного інтервалу температур обґрунтований тим, що при окисленні титану при температурі нижче 700 °С товщина окисленого шару дуже незначна і мало залежить від часу; підвищення температури вище 900 °С супроводжується сильним псуванням структури та значним падінням механічних властивостей серцевини.

По-друге, особливістю титану та його сплавів є висока схильність до контактного схоплювання при терті. Ця властивість створює відомі труднощі при обробці титану різанням і робить небезпечним його застосування в вузлах тертя, тому, що може статися його заклинювання [23, 24].

Відносно тонка природна окисна плівка на титані легко руйнується при терті за рахунок високих питомих навантажень у точках контакту (на нерівностях поверхні), завдяки значно вищій пластичності титану, ніж у окисної плівки. На локальних ділянках контакту двох поверхонь відбувається явище схоплювання. Цьому сприяє і ряд інших властивостей титану: підвищена пружна деформація через менший (наприклад, ніж у сталі) модуль пружності, нижча теплопровідність та ін. Оскільки титан легко наклепується при пластичній деформації, зв'язки, що виникають у місцях контакту (холодне зварювання), на наклепаному металі міцніші, ніж міцність основного металу. Крім того, завдяки

виділенню теплоти при терті, поверхня збагачується газами з навколишнього середовища, що також підвищує міцність поверхневого шару. Тому руйнування зв'язків, що утворилися, зазвичай відбувається в глибині основного металу і пошкодження на поверхнях з титану, що контактують, носять так званий глибинний характер зі значним наволакуванням і виривами металу.

Поява початку схоплювання на поверхнях, що труться, залежить від багатьох факторів, таких як питоме навантаження, швидкість тертя, величина відносного переміщення і його характер, шорсткість поверхні, навколишнє середовище тощо [25]. За інших рівних умов значення питомого навантаження схоплювання сильно залежить від величини шляху взаємного переміщення поверхонь, що труться, зменшуючись зі збільшенням шляху тертя. Легування титану різними α - та β -стабілізаторами, термообробка сплавів мало змінюють опір схоплювання в умовах тертя. Оксидування, азотування, хімічне нікелювання та гальванічне хромування титанових сплавів збільшують навантаження схоплювання, проте коефіцієнт тертя для цих поєднань зміцнення поверхні титану, за винятком хімічного нікелювання, падає всього від 1,5 до 2,0 раз [26].

По-третє, велика схильність титану і його сплавів до задирання практично не дозволяє застосовувати ці матеріали для виготовлення деталей, що працюють в умовах контактного тертя.

На структуру, фазовий склад та міцність зчеплення окалини з основним металом значний вплив мають легуючі елементи. З цієї причини стосовно кожного сплаву підбираються оптимальні режими різних методів підвищення антифрикційних властивостей титану та його сплавів. Існує ряд методів підвищення антифрикційних властивостей титану, це, в першу чергу, оксидування, а також дифузійне зміцнення поверхонь деталей шляхом насичення поверхневого шару киснем, азотом, бором, вуглецем, кремнієм і т. п. Застосовують також нанесення металів на поверхню титану хімічними способами, а також осадженням з розплавів, пару тощо. Застосовують

наплавлення на поверхню твердих сплавів на основі титану або різних видів напилення – плазмового, детонаційного тощо [26].

Оцінка працездатності під час тертя титанових сплавів, що підлягали різним методам поверхневого зміцнення за опублікованими літературними даними, представляє значні труднощі з таких основних причин. Антифрикційні властивості шарів на титані, отримані методами хіміко-термічної обробки, змінюються в міру зношування шару, так як останній має змінні по глибині фізико-механічні властивості, у тому числі і твердість, що змінюється від максимальної на поверхні до твердості вихідного матеріалу.

Працездатність зміцненого або нанесеного шару (гальванічні, хімічні та напилені покриття), як правило, залежить від величини і часу впливу знакозмінних напружень, що виникають при ковзанні двох шорстких поверхонь в точках реального контакту і приводять в більшості випадків до утомного зносу шару або до його фарбування.

Для підвищення зносостійкості, жаростійкості, корозійних властивостей перспективним є використання захисних та зміцнювальних покриттів.

1.3 Дефекти деталей ГТД та причини їх виникнення

Під час експлуатації під дією статичних, динамічних і температурних навантажень, деталі авіаційних ГТД можуть пошкоджуватися. Окрім навантажень, що сприймають деталі, пошкодження можуть бути викликані конструктивними та виробничими дефектами, а також можливими порушеннями умов технічної експлуатації та обслуговування. Більшість пошкоджень призводить до втрати працездатності деталі, вузла, та, як наслідок, виробу в цілому.

Дефекти деталей класифікують на поверхневі та об'ємні. До поверхневих дефектів відносять зміну форми та розмірів поверхонь, порушення поверхневого шару (корозія, забоїни, надири, риси, наклеп, сліди налипання, ерозія). На появу

таких дефектів суттєво впливають якість поверхневого шару, а саме шорсткість та залишкові напруження [27].

Об'ємні дефекти охоплюють більшу глибину. Їх усунення створюють значні технологічні труднощі, а часто взагалі не можливе. В об'ємах металу накопичуються циклова втомлюваність, термічна втомлюваність, повзучість, міжкристалічна корозія [28].

Основні причини дефектів деталей ГТД можна представити у вигляді класифікації поділивши їх на три категорії за джерелом впливу на механічні, термічні та хімічні [29].

Механічного впливу зазнають поверхні деталей, що знаходяться в контакті з іншими деталями, а також з такими, що обертаються, поверхні яких утворюють проточну частину. Від термічного впливу страждають деталі, що знаходяться в зоні високих температур та сприймаючі значні їх перепади. Від хімічного впливу на поверхнях деталей виникають дефекти, джерелом яких є взаємодія з корозійним середовищем: мастилом, високотемпературний газовий потік та інше.

Однією з основних причин дефектів деталей ГТД є знос. Деталі працюють у важких умовах під дією навантажень, вібрацій, високих температур, пилу, атмосферних умов тощо. Усі ці фактори викликають природній знос деталей та агрегатів, що проявляється в поступовій зміні розмірів, форми та якості поверхневого шару. Як наслідок – зниження надійності та несучої здатності деталей, а також вихід з ладу при досягненні критичних значень пошкоджень [29, 30].

Виділяють наступні види природнього зносу: абразивний, ерозійний, контактний, окисний, тепловий, корозійний, утомний і деформаційний [31, 32].

Абразивний знос виникає під дією твердих частинок пилу, що потрапляє в рухомі з'єднання, а також продуктів зносу, що залишаються між робочими поверхнями. Результатом абразивного зносу є риски та задирки на контактних поверхнях у яких можуть затримуватися тверді частинки та посилювати абразивний знос. Окремо слід виділити абразивний знос зовнішніх поверхонь

деталей через взаємодію з ними твердих частинок, що переносяться повітряним потоком.

Причиною виникнення ерозійного зносу є вплив високошвидкісних потоків гарячих газів і рідин на поверхні деталей ГТД, в результаті чого на них утворюються лунки. Такий знос часто зустрічається на робочих поверхнях лопаток турбін, форсунок, сопел, стінках камер згоряння тощо [33, 34].

Конструкція ГТД передбачає велику кількість контактних поверхонь, одна з яких є рухомою, а інша – нерухома (вали та отвори). Виникнення вібрацій та знакозмінних навантажень призводить до руйнування поверхневих шарів металу. Частинки поверхневого шару викрашуються та відділяються у вигляді продуктів зносу – металевого пилу.

Під дією кисню та різноманітних хімічних елементів та з'єднань (наприклад, в мастилах), що потрапляють в навантажене з'єднання, на робочих поверхнях з'являються тонкі оксидні плівки зі зниженою стійкістю до зносу. Наслідком цього є окисний знос, що далі переходить у форму контактного зносу [36, 36].

Тепловий знос спостерігається на поверхнях, що знаходяться в умовах тертя при значному питомому тиску та поганому змащуванні. Високі контактні температури призводять до зміни структури поверхневих шарів металів; відбувається зменшення їх міцності та, як наслідок, збільшується знос робочих поверхонь. В окремих випадках в місцях значних контактних напружень температура в поверхневих шарах підвищується на стільки, що може спостерігатися миттєве місцеве зварювання частинок металів з'єднаних деталей. При наступному переміщенні деталей такі частинки вириваються з поверхні менш міцного металу з утворенням на ній задирок. В той же час поверхні до яких вони зварилися стають більше шорсткими, що призводить до подальшого абразивного зносу поверхонь контактуючих деталей [31, 38].

Одним з різновидів природнього зносу є розвинення утомних явищ в металі, що виникають під дією знакозмінних напружень при експлуатації деталей. Ці явища спостерігаються в місцях-концентраторах напружень: отвори,

задирки, забоїни, місцях корозії тощо. Утомний знос проявляється у вигляді сітки дрібних тріщин на поверхні деталі. Ці тріщини концентрують напруження на своїх кінцях та поширюються в довжину та глибину, значно послаблюючи пошкоджену деталь та, в решті решт, призводять до її руйнування [39, 40].

Деформаційний знос характеризується тим, що в умовах значних статичних, динамічних і теплових навантажень метал пластично деформується та втрачає міцність [41]. Деформаційного зносу зазнають бовти, що розтягаються під впливом довготривалої дії сил затяжки; пружини, що знаходяться тривалий час в стиснутому, або розтягнутому стані, втрачають пружність; розтягуються та послабляються заклепки тощо. У випадку перевищення металом деталі в певному перетині граничних значень пластичності, відбувається руйнування деталі та вихід її з ладу.

При експлуатації найбільш сильного фізико-хімічного впливу зазнають поверхневі шари деталі. Руйнування в більшості випадків починається з поверхні (наприклад, тріщини втомленості, корозія, знос, ерозія). Аналіз відмов газотурбінних двигунів в процесі експлуатації показує, що у більшості пошкоджень деталі мають утомний характер, тому практичне значення питання забезпечення їх несучої здатності важко переоцінити. Безупинно збільшуються вимоги до надійності та матеріалоемності ГТД, все більш жорсткими стають вимоги щодо режимів експлуатаційного навантаження.

Для виконання аналізу деталей ГТД, що підлягають ремонту, доцільно їх розділити на групи, по кожній з яких виконати окремий аналіз. Серед них можна виділити різні групи: диски, лопатки, вали, корпусні деталі, кронштейни та інші.

Деталі роторів авіаційних ГТД через важкі умови роботи потерпають від виникнення дефектів. Вони є найбільш відповідальними деталями до яких висувають високі вимоги щодо надійності. Серед деталей роторів можна виділити три основні групи: вали, диски та лопатки. Ці деталі знаходяться під впливом знакозмінних і центробіжних навантажень, додаткових навантажень від високочастотних вібрацій в умовах корозійного середовища та підвищених температур.

Серед дефектів дисків компресорів найбільш розповсюдженими є тріщини втоми, пошкодження поверхонь, що утворюють проточну частину двигуна, а також поверхні, що розташовані біля рухомих елементів двигуна або в безпосередньому контакті з іншими деталями. Місцями локалізації тріщин є концентратори напружень: отвори, області переходу між поверхнями, тощо [43, 44, 45]. На розвиток тріщин в ободі диска може впливати фреттинг-знос. Встановлено, що на контактних поверхнях спостерігаються сліди тужавіння, задирок, утомно-корозійні процеси, перенос матеріалу та інші пошкодження, котрі впливають на працездатність з'єднань [46]. Наслідком фреттингу є зміна контактної жорсткості та точності з'єднання.

Явище фреттинг-зносу спостерігається й на інших поверхнях дисків. На торці центрального отвору спостерігаються вм'ятини та забоїни, що може бути результатом тертя між цією поверхнею та поверхнею іншої деталі (кільцем) [47]. Напрацювання на шийці диску, що виникає в результаті контакту з підшипником передньої опори, може призводити до збільшення вібрацій. Окрім того, характерними дефектами дисків компресорів є такі, що пов'язані з потраплянням у процесі експлуатації в двигун сторонніх предметів (пил, град, гравій тощо), в наслідок яких відбувається пошкодження проточної частини (подряпини). Також сторонні предмети можуть потрапляти в зазори між диском та елементами статора [48].

Для дисків та валів турбін ГТД також характерним є знос робочих поверхонь, що знаходяться в контакті з іншими деталями – знос шліцьових з'єднань, в пазах під лопатки, отворах тощо [31]. На відміну від компресорів в турбіні спостерігаються також дефекти, пов'язані з впливом високих температур газового потоку [49, 50, 51]. Прикладами таких дефектів є корозія та нагар.

Руйнування валів ГТД має випадковий характер та в процесі експлуатації авіаційних двигунів зустрічається не часто. Для деталей цієї групи спостерігається руйнування валів гвинта, валів турбін низького тиску, а також валів та шестерень, ресор у вигляді тріщин, фреттинг-корозії та фреттинг-зносу.

Лопатки авіаційних ГТД є високонавантаженими деталями, та з урахуванням різних умов експлуатації їх дефекти можна розділити на наступні типи: тріщини, викликані змінними напруженнями та вібраціями; знос кромки та вершин пера; газова ерозія через дію гарячих газів; корозія в агресивному середовищі; фреттинг-корозія в замкових з'єднаннях лопаток; механічні пошкодження від потрапляння сторонніх предметів (забоїни, риски); структурні зміни внаслідок перегрівання [52, 53, 54].

Окрім природних експлуатаційних дефектів зустрічаються пошкодження поверхонь деталей ГТД при технічному обслуговуванні та ремонті авіаційної техніки. Стосовно дисків – після зняття з них лопаток можливі дефекти у вигляді надирів, подряпин та інше. Також зустрічається пошкодження різьб та шліців.

Кожен із вищеперерахованих дефектів деталей тієї чи іншої групи може привести деталь до трьох станів: допустимий для подальшої експлуатації в двигуні без додаткових операцій та ремонту; допустимий для подальшої роботи з додатковими операціями, котрі забезпечать подовження ресурсу лопаток (відновлення різними способами); недопустимий до подальшої експлуатації в двигуні (пошкодження вище допустимих норм, ремонт яких економічно недоцільний в порівнянні з заміною на нову деталь) [55].

1.4 Аналіз газотермічних методів напилювання покриттів для зміцнення та відновлення поверхонь деталей з титанових сплавів

Методи газотермічного напилювання – напилювання дрібних частинок (порошку або крапель) на поверхні деталей – широко використовуються з метою підвищення працездатності деталей авіаційної техніки, а також їх відновлення [35, 56, 57, 58]. Основними методами нанесення покриттів на поверхні титанових сплавів є газополуменеве [59, 60, 61, 62], плазмове [56, 57, 63, 64, 65] та детонаційне [66, 67, 68, 69, 70] напилення. Ці способи нанесення покриттів швидко розвиваються, оскільки відкривають можливість отримання досить товстих покриттів від 1 мм і більше, при температурі нагрівання деталі від 200

°C до 300 °C, методи дають високу адгезію та можливість використання в якості матеріалів покриттів практично будь-які матеріали. Принципово цими методами можна отримувати багат шарові покриття, із забезпеченням високої адгезії з основним металом і високої когезії покриття навіть у випадку гетерогенності покриття.

Слід зазначити, що при всіх перевагах методів газотермічного напилювання для отримання покриттів на поверхнях з титанових сплавів, описані вище методи газотермічного напилювання мають недоліки:

1) неминуча пористість в діапазоні від 5 % до 20 %, а також іноді великі зміни хімічного та фазового складів вихідних матеріалів у процесі напилювання;

2) жолоблення деталей через суттєву різницю коефіцієнта термічного розширення матеріалів та підкладки. Використовують примусове охолодження потоком стисненого повітря, спрямованим на непокриту ділянку поверхні. Зниження деформації також досягається напиленням перехідних проміжних шарів;

3) у зв'язку з тим, що номенклатура матеріалів, що напиляються, обмежена, а міцність зчеплення покриття з основою невисока і становить від 5 МПа до 25 МПа, пористість знаходиться в діапазоні від 5 % до 25 %, коефіцієнт використання енергії при напиленні становить від 2 % до 12 %, технологія газополуменевого нанесення покриттів має обмежене використання;

4) межа витривалості під впливом детонаційних покриттів поверхонь титанових сплавів товщиною від 0,2 мм до 0,25 мм знижується в межах від 20 % до 40%, це обумовлено наявністю високих розтягальних поверхневих напружень. Найбільше зниження межі витривалості спостерігається при нанесенні карбідних покриттів;

5) низька для деяких умов експлуатації міцність зчеплення покриттів з основою від 10 МПа до 40 МПа, висока пористість, низький коефіцієнт корисної дії використання енергії плазмового потоку для нагрівання порошку, високий рівень шуму від 110 дБ до 130 дБ та випромінювання, відносно висока вартість

обладнання та його стаціонарність гальмують застосування плазмового методу поверхневого зміцнення та відновлення деталей сучасної авіаційної техніки;

б) для детонаційних покриттів потрібна фінішна обробка, шліфування через погіршення мікро- та макрошорсткості;

7) детонаційний метод має відносно високу вартість, порівняно низьку продуктивність, вимагає спеціального обладнання та приміщень. Потребує спеціального відпрацювання технології процесу та вузьких меж грануляції порошоків для стійкої якості покриттів.

1.5 Холодне газодинамічне напилювання

1.5.1 Особливості методу

Холодне газодинамічне напилювання – це технологія нанесення покриттів, в процесі якого частинки порошку матеріалу, що напилюється, в нерозплавленому стані з температурою нижче температури плавлення за рахунок високошвидкісного удару з поверхнею утворюють покриття.

Метод отримання покриттів з металевих частинок в твердому стані був вперше запатентований в 1963 р. Rocheville [77]. Для реалізації методу автором було запропоновано використовувати надзвукове сопло, в яке подавалися тверді частинки порошкового матеріалу і прискорювалися у напрямку підкладки з утворенням на поверхні останньої або тонкого покриття, або одиночним закріпленням частинок в невеликих поглибленнях на поверхні.

Альтернативний метод отримання товстих покриттів різних матеріалів в «холодних» газових потоках був запропонований А. П. Алхімовим та колективом вчених в 1990 р. [78], та пізніше отриманими патентами [79, 80]. Згідно методу тверді (нерозплавлені) частинки розміром від 10 мкм до 50 мкм за допомогою порошкового живильника під тиском подаються в високотемпературну камеру змішування високого тиску звужувального-розширювального сопла (сопла Лавалю) і далі прискорюються надзвуковим

газовим потоком. Оскільки за допомогою електричного нагрівача газ попередньо є підігрітим перед його подаванням у сопло, термін «холодне напилювання» очевидно не відповідає природі цього процесу формування покриттів, представленій авторами у доповіді [78]. Проте оскільки в процесі напилювання температура частинок порошку при зіткненні з підкладкою є відносно низькою в порівнянні з температурою плавлення їх матеріалу, термін «холодне» було залишено. Акцент на тому, що процес реалізується саме за рахунок високої кінетичної енергії частинок, в назві методу додана ще одна характеристика – «газодинамічне» напилювання, що є відмінністю від традиційних методів газотермічного напилювання, утворення покриттів при яких відбувається із краплин розплавлених частинок порошку.

На рисунку 1.3 подано температурно-швидкісну діаграму для наглядного розуміння місця ХГН серед інших методів газотермічного напилювання.

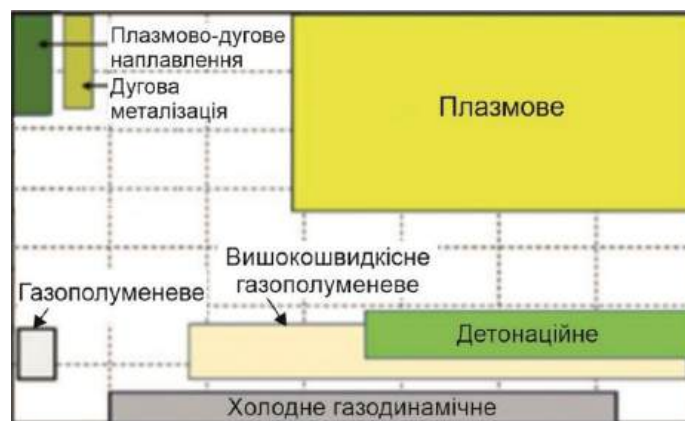


Рисунок 1.3 – Температурно-швидкісна діаграма методів газотермічного напилювання

При холодному газодинамічному напилюванні матеріали, що використовуються, майже не зазнають фазових змін, змін в мікроструктурі, окиснення поверхні тощо.

Більшість металів, таких як сплави на основі міді, алюмінію, цинку нікелю і титану [81], та навіть металокерамічні та керамічні [82] покриття можуть бути нанесені цим методом.

Як відзначалося вище, найбільш важливим параметром процесу холодного газодинамічного напилювання є швидкість частинок перед зіткненням з підкладкою [83]. Для певного матеріалу існує так звана «критична» швидкість частинок. При досягненні значень цієї критичної швидкості частинки порошку можуть з високою ефективністю закріплюватися, утворюючи покриття. І навпаки, частинки порошку, що не досягли значень критичної швидкості, призводять до ерозії підкладки [84]. Слід зазначити, що поняття «критична швидкість» – це діапазон значень, або так зване «вікно напилювання» в середині якого відбувається напилювання, а при перевищенні верхнього значення знову спостерігається процес ерозії. Окрім того, при певних умовах можливе утворення покриттів зі швидкостями частинок нижче або вище граничних значень, але з низькою ефективністю напилювання, або низькими характеристиками покриттів. Фактично, критична швидкість залежить від матеріалу порошку, а також як від розміру частинок, так і від їх розподілу за розмірами [85]. Встановлено, що критичні швидкості становлять приблизно від 560 м/с до 580 м/с для Cu, від 620 м/с до 640 м/с для Fe, від 620 м/с до 640 м/с для Ni, та від 680 м/с до 700 м/с для Al [84, 85].

Не лише параметри матеріалу, такі як густина, розмір частинок, морфологія, впливають на прискорення частинок та їх подальшу поведінку в процесі напилювання [86], але й тип робочого газу, його температура та тиск, геометрія сопла визначають температурно-швидкісні параметри частинок [86, 87].

Прискорення частинок порошку відбувається в каналі сопла для ХГН. Газ під тиском до 60 МПа подається у сопло та протікаючи через його звужувально-розширюючий канал прискорюється до надзвукової швидкості. Подача порошку в залежності від різновиду ХГН з певною витратою подається або в дозвукову, або в надзвукову частину сопла (див. п.п. 1.5.2) з подальшим його прискоренням в надзвуковій частині через швидке розширення газу. Можливо є очевидним, що попередньо нагрітий стиснений газ здатний забезпечити більш високі швидкості газового потоку в соплі. Проте навіть при температурах попереднього нагрівання

до 900 С, газ швидко охолоджується по мірі його розширювання в надзвуковій частині сопла [87]. Відповідно, час взаємодії частинок з гарячим газом відносно малий, а температури твердих частинок залишаються нижчими, ніж у газу [87]. Таким чином, основна функція робочого газу полягає у прискоренні частинок порошку вище критичної швидкості.

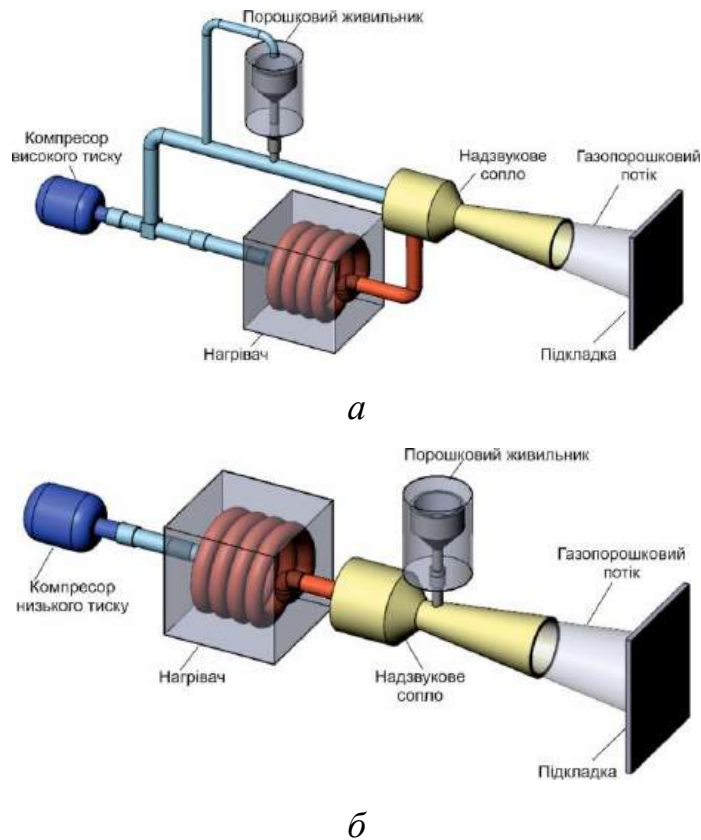
Фізичний механізм, що забезпечує зчеплення частинок порошку з підкладкою при ХГН досі залишається предметом дискусій та досліджень. Однією з теорій є руйнування тонких поверхневих оксидних плівок при пластичній деформації частинки при її зіткненні з підкладкою, та забезпечення локального контакту під високим тиском чистих поверхонь матеріалів з їх наступним зчепленням [87]. Хоча це й досі залишається гіпотезою, вона погоджується з тим фактом, що багато пластичних матеріалів, таких як метали та полімери, були нанесені методом ХГН. Експерименти з такими матеріалами, як кераміка, з іншої сторони, залишились безрезультатними у випадку їх напилювання без додавання металевої складової. Мікроснімки покриттів при ХГН представлені в роботі [87] також показують, що механізм напилювання здебільшого, якщо не повністю, є процесом, при якому матеріали залишаються в твердому стані.

1.5.2 Обладнання для напилювання

Наразі існує дві основні схеми реалізації ХГН (рисунок 1.4) [88, 89]:

1) високого тиску (ХГН ВТ) (рисунок 1.4а), при якому порошок подаються в дозвукову (звужувальну) частину сопла до критичного перерізу з порошкового живильника під тиском, що трохи перевищує тиск в дозвуковій частині сопла;

2) низького тиску (ХГН НТ) (рисунок 1.4б), при якому порошок подається в надзвукову (розширювальну) частину сопла за критичним перерізом з порошкового живильника відкритого типу (тиск в бункері дорівнює тиску навколишнього середовища) за рахунок принципу ежекції.



a – високого тиску; *б* – низького тиску

Рисунок 1.4 – Схематичне зображення типів систем ХГН.

Відмінності в параметрах напилювання з використанням систем ХГН ВТ і НТ впливають на структуру та якість покриттів, через температурно-швидкісні характеристики частинок порошку при їх зіткненні з підкладкою.

Обладнання для ХГН НТ, зазвичай, в порівнянні з обладнанням для ХГН ВТ значно менше, портативне, дешевше та добре зарекомендувало себе для виконання ремонтних робіт в «польових» умовах, ремонтних майстернях і ділянках – відновлення зношених поверхонь, усунення механічних пошкоджень, тріщин, слідів корозії та ерозії на невеликих ділянках деталей тощо. ХГН НТ дозволяє наносити покриття з порошків пластичних і відносно легкоплавких металів – сплавів міді, алюмінію, цинку, нікелю, частіше за все з додаванням керамічної складової (Al_2O_3). В якості робочого газу вони використовують повітря або азот.

Обладнання для ХГН ВТ натомість характеризується великими габаритами, є стаціонарним, а для реалізації процесу напилювання необхідне застосування маніпулятора-руки з написанням керуючої програми для неї. В якості робочого газу використовують гази з меншою молекулярною масою – азот, гелій, або їх суміші. Такі системи дозволяють наносити покриття з порошків широкого спектру матеріалів: оксидів, карбідів, нітридів, тугоплавких сплавів та інші з високим коефіцієнтом використання порошку (близько 90 %) та високими характеристиками покриттів. Використовується для формування спеціальних покриттів: корозійно-, зносо-, ерозійно-, жаростійких, жароміцних тощо.

За результатами досліджень процесу ХГН, проведеними вченими та дослідниками по всьому світу, на сьогодні розроблено різні типи обладнання для реалізації процесу, зокрема такими виробниками, як Dycomet (Аккрюм, Нідерланди), Kteck Corporation (Альбукерке, США), Oerlikon Metco (Трюббах, Швейцарія), Impact Innovations (Раттенкірхен, Германія), Plasma Giken Co. Ltd (Сайтама, Японія), ОЦПН (Обнінськ, російська федерація), Centerline (Вінздор, Канада) та інші.

Основними виробниками обладнання для ХГН низького тиску є CenterLine SST PX (CenterLine, Вінздор, Канада) [90] та ДИМЕТ-421 (ОЦПН, Обнінськ, Російська Федерація) [91], а високого тиску – ColdSpray PCS-1000 (Plasma Giken Co. Ltd., Сайтама, Японія) [92] та Impact Cold Spray System 5/11 (Impact Innovations, Раттенкірхен, Германія) [93]

Звісно обладнання для ХГН ВТ і НТ має свої недоліки.

Для систем ВТ через необхідність подавання порошку в дозвукову частину сопла виникає потреба у використанні порошкових живильників високого тиску, що ускладнює їх конструкцію, габарити і масу, потребує більш складної системи керування.

Через великі значення витрати газу (до 4,2 м³/хв для гелію) для забезпечення високої температури цього потоку (до 1100 °С) необхідний відповідний електричний нагрівач. Потужність таких нагрівачів може сягати

47 кВт. Більш складне та дороге обладнання та використання дороговартуючого гелію впливає на собівартість отримання покриттів.

Для обладнання ХГН НТ суттєвим недоліком є обмежений спектр матеріалів для напилювання та низький коефіцієнт використання порошку (близько 30%). В більшості випадків ручний метод нанесення покриттів впливає на контроль деяких параметрів процесу напилювання, наприклад дистанція та кут напилювання, що впливає на якість покриттів та стабільність результатів.

1.5.3 Порошки для напилювання

Основні характеристики порошку, такі як форма, розмір, мікроструктура та поверхневий хімічний склад, безпосередньо залежать від методу його отримання. Серед методів отримання порошків для ХГН можна виділити наступні: розпилювання, механічне подрібнення, електролітичне осадження, навуглецьовування, термічна дисоціація та інші [94].

Для практичного застосування та розроблення рекомендацій з напилювання для конкретного порошкового матеріалу перш за все необхідно визначити розподіл частинок порошку за розміром, якщо така інформація відсутня. Для цього можуть бути використані наступні методи: визначення фракційного складу шляхом ситового просіювання та лазерною дифракцією. Для визначення розміру та форми частинок використовується метод скануючої електронної мікроскопії. Для визначення об'ємної густини та сипучості порошку використовують лійку Холла.

На протязі останніх десятиліть спостерігається стала тенденція до напилювання нових матеріалів спеціального призначення [95, 96]. На початку розвитку технології ХГН здебільшого використовувалась невелика номенклатура матеріалів, адже ранні дослідження були спрямовані на розуміння в першу чергу природи процесу без конкретного практичного застосування. Станом на сьогодні для отримання покриттів методом ХГН зі спеціальними властивостями високої якості використовується широка номенклатура

порошкових матеріалів, які можна об'єднати в наступні категорії: метали, метал-матричні композити, кераміка, полімери, і наноструктуровані порошки [95].

Метал-матричні композити (ММК) – це поєднання як мінімум двох матеріалів – один з яких метал, а друга складова – інший матеріал [97, 98]. При цьому при ХГН обидва матеріали знаходяться в твердій фазі. Перевагами ХГН при напилюванні ММК є те, що через відсутність значного температурного впливу на порошок відсутні хімічні реакції, фазові трансформації, сплавлення між матеріалами тощо. Наявність керамічних частинок у порошковій суміші має позитивний вплив на процес формування покриттів, їх мікроструктуру та фізико-механічні властивості. Отримання ММК покриттів при ХГН можна реалізувати за допомогою різних технологічних прийомів: напилювання порошкової суміші, отриманої змішуванням двох і більше компонентів, окреме подавання порошків з різних порошкових живильників до сопла, використання плакованих порошків та інше. Не дивлячись на велику кількість досліджень з напилювання ММК, фундаментальні основи формування таких покриттів залишаються не вивчені, а узагальнені рекомендації щодо впливу керамічної складової на якість покриттів та прогнозування їх характеристик – відсутні.

1.5.4 Області застосування

За останні десятиліття ХГН з нової технології перетворилась на цілком життєздатну альтернативу газотермічним методам напилювання та іншим технологіям ремонту та відновлення поверхонь, пов'язаних зі значним температурним впливом на поверхню.

До впровадження ХГН деталі, матеріали яких є чутливими до високих температур (алюміній, магній, титан), у більшості випадків підлягали повній заміні на нові. При цьому покриття можуть бути гомо-чи гетерогенними до матеріалу підкладки.

Одними з кращих прикладів використання ХГН – це відновлення деталей вертольотів з магнієвих сплавів через їх експлуатаційні дефекти, а саме корозію

та критичний знос поверхонь, а також усунення дефектів, що виникають під час їх виробництва [99].

Дослідження процесу ХГН і впровадження його у виробничі та ремонтні процеси для захисту і відновлення пошкоджених поверхонь деталей літаків і вертольотів з магнієвих, титанових, і алюмінієвих сплавів, показали, що запропонована ресурсозберігаюча та екологічно більш безпечна технологія може бути успішно застосована для таких цілей замість традиційних методів [100, 101]. Корозія корпусу головного редуктора із магнієвого сплаву ZE41A-T5 є серйозною проблемою як військових, так і цивільних вертольотів. Було продемонстровано, що використання покриттів, отриманих ХГН, дозволяє нарощувати покриття з метою відновлення втраченого матеріалу через корозію та, окрім того, надійно захищає від агресивного впливу навколишнього середовища. Відновлення та ремонт корпусів редукторів з магнієвих сплавів вертольоту УН-60 методом ХГН зарекомендувало себе більш економічно вигідними рішенням в порівнянні із заміною на нові деталі, що позначилося не лише на прямих затратах на виробництво нових корпусів, а ще й на логістику між виробничими і ремонтними підприємствами, зниження частоти відмов, часу простою техніки тощо.

Технологія ХГН також була продемонстрована як метод отримання щільних покриттів з чистого титанового порошку на підкладці з алюмінієвого сплаву 7075, товщиною більше 300 мкм без негативних змін мікроструктури [102]. Майже відсутня пористість та твердість покриттів, що перевищує твердість початкового порошку з чистого титану, може бути пояснена високошвидкісним зіткненням налітаючих частинок порошку з раніше сформованим шаром, зменшенням пор і підвищенням твердості за рахунок ефекту наклепу [103, 104]. Було зроблено висновок, що за рахунок оптимізації процесу ХГН можливе отримання покриттів із характеристиками, що переважають показники для традиційних методів газотермічного напилювання, а висока ефективність та економічність процесу відкривають широкі можливості для застосування в авіаційній промисловості.

Ще один приклад відновлення деталі методом ХГН – усунення механічних та корозійних пошкоджень опори валу несучого гвинта вертольоту АН-64 «Араче» з алюмінієвого сплаву Al-7149 [105]. В якості матеріалу порошку було використано алюмінієвий сплав.

Покриття з міцних алюмінієвих сплавів AA2224, AA6061 і AA7075 були нанесені на амортизаційні стійки шасі важкого транспортного вертольоту СН-53 та лопаті вентилятору середнього військово-транспортного літака С-160 [106]. Після випробувань технологія була успішно впроваджена у виробничі процеси. Втомні характеристики системи покриття-підкладка у цих випадках були визначені як критичні і за результатами досліджень яких було зроблено висновок щодо можливостей застосування технології. Встановлено, що покриття не впливають негативно на експлуатаційні характеристики об'єкту дослідження. Окрім того, спостерігалось покращення втомних характеристик зразків з покриттями, що можна пояснити впливом стискальних залишкових напружень в покриттях, отриманих методом ХГН, тим самим перешкоджаючи виникненню та розвиненню тріщин втоми. Автори відзначають, що в дослідженнях було враховано також можливі випадки зіткнення деталей з покриттями зі сторонніми предметами під час експлуатації, а також можливі механічні пошкодження від інструментів під час виконання капітального ремонту та обслуговування техніки [106].

Ще прикладом використання ХГН для ремонту деталей авіаційної техніки з алюмінієвих сплавів є відновлення зношених ділянок навколо отворів кріплення панелей передніх відсіків обладнання надзвукового бомбардувальника В-1. Панелі виготовляються з алюмінієвого сплаву Al-2024-T6; матеріал гвинтів – сталь. Знос отворів відбувається через багаторазове відчинення та зачинення відсіків при експлуатації літака, що в результаті призводить до збільшення зазору між панелями, погіршення аеродинамічних характеристик фюзеляжу тощо. Матеріал порошку для нанесення покриття – алюмінієвий сплав Al-6061. За результатами дослідження характеристик покриттів було зроблено висновок про їх відповідність заданим вимогам [107].

Високоміцні нікелеві сплави (Інконель) достатньо розповсюджені в авіаційній промисловості через їх відмінні механічні властивості в поєднанні з високою стійкістю до хімічного та температурного впливу. Важкі умови роботи призводять до того, що деталі з таких сплавів сприймають високі механічні та термічні навантаження, що часто призводять до зносу та пошкоджень поверхонь. Прикладом таких деталей є корпус приводу керування носовим колесом. Через своє розташування він регулярно зазнає впливу вологи та бруду, що проникають в з'єднання при випущеному шасі, призводячи до корозії. Технологія ХГН була застосована для відновлення пошкоджених поверхонь. Спочатку виконувалося механічне оброблення ділянок, після наносилося покриття з порошку на основі нікелевого сплаву, далі отримували задану форму та розміри поверхні обробкою різанням. Завдяки цьому отримували не лише відновлену поверхню, але й забезпечували її кращі антикорозійні властивості [108].

Технологія ХГН була успішно застосована для ремонту деталей газотурбінного двигуна, наприклад корпусу вентилятора з алюмінієвого сплаву Al-6061, де використання високотемпературних процесів напилювання та зварювання недопустиме [109].

1.6 Висновки, постановка мети та завдань дослідження

В першому розділі дисертаційної роботи виконано аналіз титанових сплавів, які використовуються для виготовлення деталей авіаційної та ракетно-космічної техніки, зокрема їх застосування в авіадвигунобудуванні, а також найбільш поширених експлуатаційних дефектів та причин виникнення. Проведено критичний аналіз існуючих методів і технологій зміцнення і відновлення поверхневих шарів деталей з титанових сплавів. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що нанесення на пошкоджені поверхні деталей з титанових сплавів відновлювальних покриттів є ефективним способом подовження їх ресурсу, а також покращення їх експлуатаційних характеристик.

Встановлено, що нанесення на робочі поверхні деталей захисних покриттів є ефективним способом покращення їх експлуатаційних характеристик, що призводить до суттєвого підвищення ресурсу роботи деталей. Незважаючи на значну кількість наукових робіт з дослідження закономірностей впливу параметрів процесу на властивості покриттів, відсутні узагальнюючі дані щодо впливу режимів холодного газодинамічного напилювання низького тиску, як альтернативного та перспективного способу нанесення захисних і відновлювальних покриттів, на кількісні та якісні характеристики покриттів, а також відсутні систематичні дослідження з розроблення технологічних рекомендацій з нанесення покриттів холодним газодинамічним напилюванням низького тиску на титанові сплави.

Удосконалення технології холодного газодинамічного напилювання не можливе без встановлення закономірностей взаємодії газового потоку з частинками порошку в надзвуковому соплі. Дослідження процесу прискорення та нагрівання потоку в соплі, а, відповідно, і частинок в цьому потоці, є важливим і необхідним етапом оптимізації сопел, а також пошуку оптимальних параметрів напилювання. Аналіз літератури показав, що переважна більшість робіт, спрямованих на забезпечення частинкам порошку певного матеріалу необхідних значень критичної швидкості, пов'язані з розробленням оптимізацією геометрії сопла або визначенням режимних параметрів напилювання за результатами експериментальних досліджень. Окрім того, майже відсутні роботи присвячені виявленню можливостей надзвукових сопел для холодного газодинамічного напилювання низького тиску з точки зору забезпечення ними критичних значень швидкості. Лише наявні деякі експериментальні дослідження процесу ХГН низького тиску, в яких зазначаються низькі фізико-механічні характеристики покриттів та низька ефективність напилювання, автори яких пов'язують це з низькою кінетичною енергією частинок в момент зіткнення з підкладкою. Особливості течії потоку з частинки та їх поведінку під час натікання на поверхню важко проаналізувати експериментально через їх перехідну нелінійну динамічну природу, що пояснює важливість теоретичних досліджень.

Тож, з урахуванням усього вищезазначеного, *метою дисертаційної роботи є* подовження ресурсу роботи деталей авіаційної техніки з титанових сплавів за рахунок удосконалення технології нанесення відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилюванням.

Для досягнення поставленої мети було вирішено такі *основні завдання*:

1) Дослідити вплив параметрів газу на вході в надзвукове сопло для напилювання на процес прискорення та нагрівання частинок порошку в газовому потоці в каналі сопла, виконаного за ежекторною схемою.

2) Встановити залежності впливу режимних параметрів холодного газодинамічного напилювання на характеристики покриттів – адгезійну міцність, мікротвердість та мікроструктуру.

3) Дослідити залежність коефіцієнту використання порошку від режимів напилювання та надати рекомендації щодо їх вибору для забезпечення максимальних значень цього параметру;

4) Розробити технологічні рекомендації з нанесення відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилювання для подовження ресурсу роботи корпусних деталей з титанових сплавів; розрахувати основні техніко-економічні показники; узагальнити і запропонувати для практичного використання розроблені положення на виробничих підприємствах авіаційної промисловості України.

Об'єкт дослідження – процес холодного газодинамічного напилювання покриттів на деталі авіаційних двигунів.

Предмет дослідження – закономірності впливу режимів холодного газодинамічного напилювання на температурно-швидкісні характеристики двофазного потоку та властивості покриттів на титанових сплавах.

РОЗДІЛ 2

ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

При розробленні технологічних рекомендацій з напилювання захисних і відновлювальних покриттів холодним газодинамічним методом, важливим є виявлення залежностей між характеристиками покриттів та параметрами процесу напилювання. Тому в рамках даної дисертаційної роботи було застосовано комплексний підхід до проведення досліджень з застосуванням сучасних апробованих методик й обладнання для проведення експериментів, що забезпечило отримання достовірних результатів досліджень.

2.1 Обладнання для холодного газодинамічного напилювання

Для напилювання покриттів в дисертаційній роботі було використано установку для холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405. Зовнішній вигляд установки показано на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд установки ХГН НТ ДИМЕТ-405.

Технічні характеристики установки ХГН НТ ДИМЕТ-405 наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики установки ХГН НТ ДИМЕТ-405.

№	Параметр	Значення
1	Параметри повітря, яке подається до установки: – максимальний тиск, МПа – максимальна витрата, м ³ /хв – температура, °С	1,6 0,45 не більше 40
2	Параметри повітря, яке подається до установки: – робочий тиск, МПа – робочий температура нагрівання, °С	від 0,5 до 0,9 від 200 до 650
3	Витрата порошку, г/с	від 0,1 до 0,8
4	Час виходу на режим, с	не більше 10
5	Габаритні розміри, мм	550 × 470 × 260
6	Маса, кг	16
7	Рівень шуму, дБ	не більше 75
8	Максимальна потужність, кВт	3,3

Установка складається з наступних основних вузлів (рисунок 2.1): блок контролю та керування; напилувач, в середині якого розташовано нагрівач газу; надзвукове сопло; порошкові живильники.

Блок контролю та керування об'єднує в своєму корпусі елементи силового електричного живлення, систему керування температурою повітря, систему електроживлення та керування витратою порошку живильників, перемикача порошкової траси та елементи комутації. Передня панель блоку контролю та керування показано містить наступні елементи контролю: тумблер вибору порошкового живильника; регулятор витрати порошку; регулятор температурного режиму; вмикач живлення установки.

Напилувач складається з кожуху з термоізоляцією, в середині якого в герметичному циліндричному корпусі розміщено електричний нагрівач. Напилувач містить датчик тиску 6, який блокує подачу напруги на спіраль нагрівача при тиску нижче допустимого значення (0,5 МПа).

Нагріте стиснене повітря подається в надзвукове звужувально-розширне сопло (сопло Лавалю). Сопло (рисунок 2.2), що використовується в установці ДИМЕТ-405, призначене для формування повітряно-порошкової суміші та прискорення її до надзвукової швидкості з метою напилування покриття.

Сопло складається зі змінної трубки-насадку 1 та втулки для закріплення 2 (рисунок 2.2а). Змінна трубка фіксується гвинтом 3, а через втулку 4 відбувається подача порошку від порошкового живильника.

Два порошкові живильники (рисунок 2.1) забезпечують дозовану подачу порошку в сопло в процесі роботи. Порошкові живильники складаються з живлячого бункеру та віброперетворювача, що забезпечує стабільну подачу порошку в сопло. Витрата порошку регулюється в діапазоні від 0,1 г/с до 0,8 г/с. Бункери живильника відкритого типу, без утворення всередині них тиску для примусової подачі в сопло. подача порошку відбувається в розширну частину сопла (за критичним перерізом) за рахунок ежекції.



а



б

а – фотографія сопла; *б* – схематичне зображення сопла з розділами

Рисунок 2.2 – Надзвукове звужувально-розширне сопло, що використовується в установці ХГН НТ ДИМЕТ-405.

Система очищення повітряного потоку складається з масловловлювача, фільтрів грубого та тонкого очищення. Ресивер, що наповнюється стисненим повітрям забезпечує стабільну роботу установки в процесі напилування.

Працює установка наступним чином. Стиснене повітря під встановленим на манометрі тиском подається в напилювач. При відкритті пневмокрану повітря подається по шлангу до нагрівача напилювача, який вмикається коли значення тиску є більше за 0,5 МПа. Нагрівач забезпечує нагрівання повітря до робочої температури та подається в надзвукове сопло. Температура повітря на виході нагрівача контролюється термопарою в напилювачі та підтримується на заданому рівні системою керування блоку контролю та керування. Подача порошку живильником вмикається після виходу напилювача на робочий температурний режим кнопкою напилювача, тумблером «ПОРОШОК» блоку контролю та керування або зовнішнім вимикачем через роз'єм «ДИСТ. КЕР». Порошок, який ежектується з порошкового живильника, подається по трубці через в сопло, де прискорюється до необхідних значень швидкості. Повітряно-порошковий потік направляється на поверхню виробу, де прискорені частинки порошку при зіткненні утворюють покриття.

Режим напилювання залежить від витрати порошку, яка змінюється регулятором блоку контролю та керування, температури, тиску повітря та дистанції від зрізу сопла до поверхні.

2.2 Матеріали для проведення досліджень

2.2.1 Вибір матеріалу порошку

На підставі результатів аналізу, наведеного в розділі 1 щодо можливостей технології ХГН низького тиску та матеріалів, що можуть бути використані для відновлення зношених поверхонь деталей авіаційних двигунів з титанових сплавів, було обрано в якості порошкового матеріалу комерційно доступну метал-матричну композиційну порошкову суміш на основі нікелю $Ni+Al_2O_3$.

Порошкову суміш $Ni+Al_2O_3$ отримують шляхом механічного змішування окремих складових. Призначенням є використання для усунення поверхневих дефектів, відновлення зношених ділянок, нанесення зносостійких покриттів на деталях, що працюють при температурі до 1200 °С.

Використання механічних сумішей порошків є самим розповсюдженим способом отримання композиційної структури покриттів. Додавання неметалічних частинок може застосовуватися для підвищення якості покриттів і коефіцієнту використання порошку, оскільки неметалічні частинки відіграють роль абразиву – очищають поверхню для напилювання першого шару від поверхневої оксидної плівки, забруднень, а також забезпечує ущільнення шарів, за рахунок чого збільшується адгезія, когезія та щільність покриттів. Використання армуючих частинок корунду зі значно відмінною від матриці твердістю не лише збільшує зносостійкість покриття, але й в результаті збільшеної гетерогенності може розширити області існування при фрикційному контакті так званих вторинних структур, що забезпечують нормальний перебіг процесу тертя в широкому діапазоні параметрів навантаження.

На рисунку 2.3 представлено мікроснімок та хімічний склад порошкової суміші Ni+Al₂O₃.

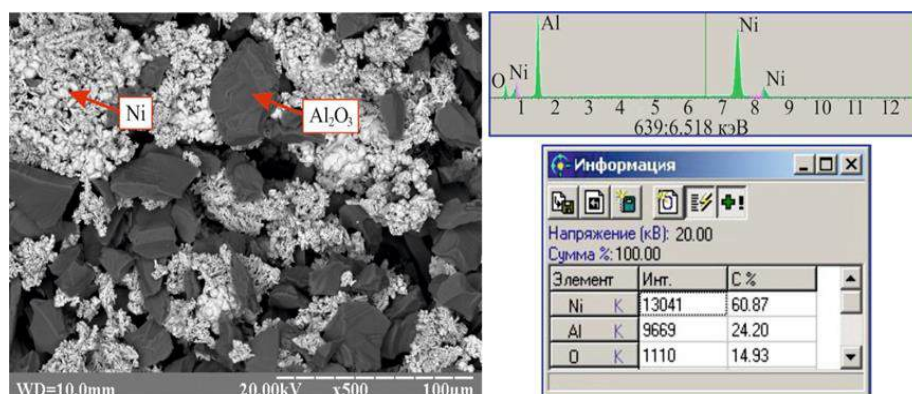


Рисунок 2.3 – Мікроснімок та хімічний склад порошкової суміші Ni+Al₂O₃, що було використано в дисертаційній роботі.

Вихідні частинки нікелю мають форму дендритів, і в цілому складаються наче з окремих утворень різних розмірів, з'єднаних між собою тонкими перемичками. Така форма частинок також дозволяє зміщуватися окремим ділянкам дендритів при деформації частинок з взаємним перемішуванням маси, що може приводити до високої когезійної міцності покриття.

2.2.2 Вибір матеріалу підкладки та методу підготовки поверхні до напилювання

В якості матеріалу підкладки було обрано титановий сплав ВТ9 за ОСТ1 90013-81 [110]. Слід також зазначити, що за результатом аналізу літературних джерел та попередніх експериментальних досліджень встановлено, що марка титанового сплаву зразків для напилювання не впливає на властивості покриттів, в першу чергу адгезійної міцності.

Для напилювання покриттів для подальших досліджень мікроструктури, адгезійної міцності, мікротвердості та коефіцієнту використання порошку, були підготовлені зразки плоскої форми (пластини) розміром 20×50×1,5 мм та циліндричної форми діаметром 25 мм та висотою 40 мм.

Попередня підготовка поверхні зразків перед напилюванням складалася з струминно-абразивного оброблення електрокорундом нормальним 14А фракцією F80...100 для видалення поверхневого оксидного шару та підвищення шорсткості поверхні, а також наступним знежиренням розчинником (Нефрас СЗ-80/120 за ТУ 38.401-67-108-92). Шорсткість поверхні зразка після піскоструминного оброблення становила від 120 мкм до 160 мкм. Час після завершення підготовки поверхні та напилювання покриття складав не більше двадцяти хвилин.

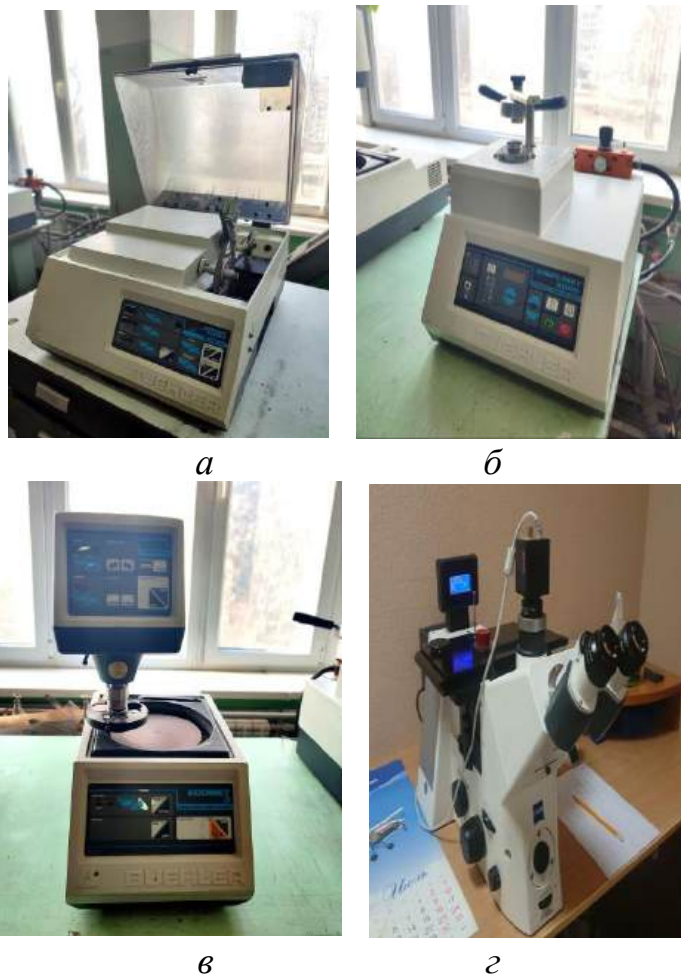
2.3 Методи та обладнання для дослідження мікроструктури покриттів

Мікроструктурний аналіз проводять з метою дослідження розмірів і форми пор, їх розподілу по об'єму зразка, зв'язаності пор (вірогідність поєднання пор одна з одною), розмірів і форми зерен тощо. Окрім того, важливе практичне значення має також стан перехідної зони між покриттям і підкладкою.

Найбільшого розповсюдження для кількісного та якісного аналізу геометрії пор та будови перехідної зони знайшли оптичні методи.

Використане в дисертаційній роботі обладнання для мікроструктурних досліджень показано на рисунку 2.4.

Для виготовлення мікрошліфів використовувалась наступна методика. Відповідно до плану експерименту на підготовлені плоскі зразки з титанового сплаву ВТ9 було напилено покриття завтовшки приблизно 2,5 мм. Далі виконували вирізання зразків розміром від 5 мм до 15 мм перпендикулярно шару покриття з використанням алмазних кругів на прецизійному відрізнному верстаті Bühler IsoMet 2000 (рисунок 2.4а).



а – Відрізнной верстат Bühler IsoMet 2000; *б* – автоматичний верстат гарячого запресування Bühler SimpliMet 2000; *в* – шліфувально-полірувальний верстат

Bühler EcoMet 3; *г* – оптичний металографічний мікроскоп

ZEISS Axio Observer D1m

Рисунок 2.4 – Обладнання для металографічних досліджень.

Для монтування вирізаних зразків з покриттями використовувався автоматичний верстат гарячого запресування Bühler SimpliMet 2000 (рисунок 2.4б) з діаметром оправки 30 мм і висотою 20 мм. При цьому поверхня покриття, яка підлягає аналізу, була близько торцевої поверхні речовини для монтажу (епоксидна смола).

Шліфування поверхні зразка виконували в оправці на наждачному папері з поступовим зменшенням зернистості до усунення слідів шліфування попереднього оброблення. Після шліфування проводилося полірування зразків на алмазних пастах, завершальна грануляція якої становила 1 мкм. Виконання цих операцій проводилося за допомогою шліфувально-полірувального верстату Bühler EcoMet 3, показаного на рисунку рисунок 2.4в.

Контроль якості полірування виконували під мікроскопом (200-500x) після ретельного промивання шліфу спиртом. Полірування закінчували коли не було видно слідів оброблення й додаткове оброблення не збільшувало кількість та якість деталей текстури шліфа.

Дослідження мікроструктури покриттів виконано з використанням оптичного металографічного мікроскопу ZEISS Axio Observer D1m зі збільшенням до 1000x, показаного на рисунок 2.4г.

2.4 Методи та обладнання для дослідження адгезійної міцності покриттів

Адгезійна, тобто питома міцність зчеплення покриття з підкладкою, є основною властивістю, яка визначає експлуатаційні характеристики виробів різного призначення. Визначення міцності зчеплення покриття з основою переслідує такі цілі: відокремити деталі та вироби з недопустимою низькою міцністю зчеплення від придатних; оцінити ефективність зміни режимів напилювання покриттів та оброблення поверхні під покриття й таким чином оптимізувати умови забезпечення необхідної міцності зчеплення; отримати більш глибокі уявлення про механізм зв'язків між покриттям і підкладкою.

Наразі не існує надійної методики вимірювання міцності зчеплення газотермічних покриттів. В порівнянні з штифтовим методом [111], клейовий метод є більш простим з точки зору виготовлення зразків для дослідження. Визначення адгезійної міцності покриттів виконувалося відповідно до ДСТУ 2639-94 [112]. Для дослідження адгезійної міцності були підготовлені зразки циліндричної форми діаметром 25 мм і висотою 40 мм (рисунок 2.4б). Перед напилюванням покриття поверхня зразка піддавалася піско-струминному обробленню електрокорундом 14А фракцією F80...100 з метою підвищення шорсткості та активації поверхні, що, як відомо, позитивно впливає на збільшення міцності зчеплення покриття з основою [187].

Відповідно до наведених режимів на торцеву поверхню одного зі зразків наносилося покриття. Контрзразок, що має такий самий діаметр, торцем з'єднувався з покриттям з використанням клею. Критерієм міцності з'єднання є зусилля, при якому відбувається відділення покриття по межі з основним металом при розтягуванні, віднесене до площі поверхні торця. У дослідженнях було використано двокомпонентний клей на основі епоксидних і поліамідних смол ВК-9 за ОСТ В 84-2081-83. Перед проведенням експериментів було визначено міцність склеювання зразків без покриття, яка склала в середньому 35,3 МПа. Після склеювання зразок закріплювався в розривній машині. Було використано пристрій з самовстановлюємих зразками, який забезпечує більш однорідний напружено-деформований стан матеріалів в зоні контакту покриття з підкладкою, прикладання розтягального навантаження по нормалі до межі поділу покриття-підкладка та спрощується встановлення зразків при випробуванні.

На рисунку 2.5 показана розривна машина, яка була використана для дослідження адгезійної міцності покриттів.

Після прикладання розтягального навантаження, фіксувалася сила в момент руйнування зразка або по шару покриття або клею. Міцність зчеплення σ визначалася за формулою:



a

a – розривна машина; *б* – адгезійне, когезійне та руйнування по клею

Рисунок 2.5 – Обладнання та можливі випадки руйнування зразків

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (2.1)$$

де F – розривне зусилля, Н;

S – площа поперечного перерізу зразків, мм².

При цьому можливі три сценарії руйнування зразків (рисунок 2.5б): відшарування покриття (адгезійне руйнування); руйнування по товщині шару покриття (когезійне руйнування); відшарування по клею (недостатня адгезійна міцність клею).

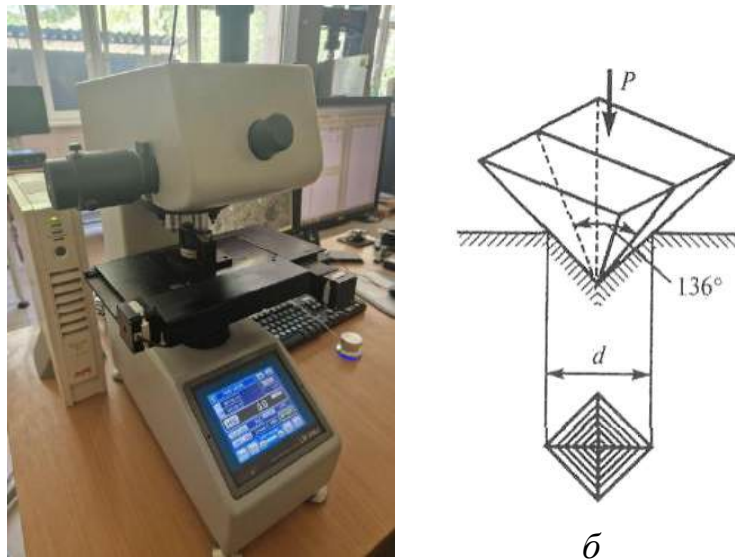
2.5 Методи та обладнання для дослідження мікротвердості покриттів

Дослідження мікротвердості отриманих покриттів виконано за ДСТУ ISO 6507-1:2007 [113] з використанням твердоміру мікро-Віккерс LECO АМН55 (рисунок 2.6а). Мікротвердість визначали вдавленням в поверхню зразка алмазної пірамідки з навантаженням 0,15 кг, витримкою 15 с і подальшим вимірюванням діагоналі відтинку. Цим методом визначається твердість окремих зерен і структурних складових шліфа при металографічному

аналізі. Цей метод є опосередкованою оцінкою щільності матеріалу покриття. Чим більше в шарі пор, тим глибше заглиблюється індентор.

На підготовлені зразки з сплаву ВТ9 згідно плану експерименту було напилено покриття з порошку $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$ завтовшки приблизно 2,5 мм. Після цього за стандартними методиками з підготовки зразків для металографічних досліджень мікроструктури, було отримано поперечні мікрошліфи покриттів з їх подальшим використанням для визначення мікротвердості.

Схема визначення мікротвердості показана на рисунку 2.6б.



a

б

a – зовнішній вигляд; *б* – схема визначення мікротвердості

Рисунок 2.6 – Твердомір мікро-Віккерс АМН55.

Кут при вершині алмазної пірамідки становить 136° . Відтинок, що утворюється, має форму квадрата, діагональ якого вимірюють після зняття навантаження. Число твердості визначають за формулою

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2}, \quad (2.2)$$

де P – навантаження, Н;

d – діагональ відтинку, мм.

2.6 Методика розрахунку коефіцієнту використання порошку

Визначення коефіцієнту використання порошку K_{en} (ефективності напилювання покриттів) проводилося за наступною методикою [114]. Виконували зважування зразка перед напилюванням покриття (m_0) та зразка з покриттям (m_1) після. Далі визначали масу порошку, що було витрачено для напилювання покриття (m_p), як різницю між початковою масою порошку, завантаженої до порошкового живильника (m_{p0}), та масою порошку, що залишилась в ньому та живильній трубці після завершення процесу напилювання (m_{p1}). Тобто

$$K_{en} = \frac{m_1 - m_0}{m_p} 100\% = \frac{m_1 - m_0}{m_{p0} - m_{p1}} 100\%. \quad (2.3)$$

Зважування зразків та порошку виконувалося з використанням лабораторних ваг з точністю вимірювання 0,0001 г.

Завантаження порошку певної маси до бункеру порошкового живильника перед кожним новим експериментом виконували після прочистки його та трубок подачі порошку до сопла. Напилювання покриттів проводили за два проходи при витраті порошку G_p 0,2 г/с, 0,5 г/с і 0,8 г/с, значення якої встановлювалося на установці для напилювання. Подача порошку відбувалася в ручному режимі після досягнення заданої робочої температури газу. Початком руху пістолету для напилювання був момент візуального фіксування початку зростання покриття на підкладці. Після двох проходів подача порошку завершувалася, вимикалося живлення електричного нагрівника газу, а після цього і подача газу. Залишки порошку в бункері порошкового живильника та трубці подачі до сопла збиралися для подальшого зважування.

2.7 Висновки до розділу 2

Отримання достовірних результатів дисертації роботи забезпечується використанням сучасного обладнання, каліброваного службами метрологічного

забезпечення, апробованих методик експериментальних досліджень, необхідною повторністю дослідів, ретельною підготовкою дослідних зразків перед та після експерименту, чітким дотриманням порядку його проведення тощо.

Напилювання покриттів виконували за допомогою установки холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-403. В якості порошкового матеріалу було використано порошкову суміш на основі нікелю $Ni+Al_2O_3$. Покриття було напилено на зразки з титанового сплаву ВТ9 за ОСТ1 90013-81, попередня обробка яких перед напилюванням полягала в струминно-абразивному обробленні електрокорундом нормальним 14А фракцією F80.

Експериментальне дослідження характеристик покриттів проводилося з використанням стандартних методик та сучасного обладнання, зокрема:

- металографічні дослідження (мікроструктура, товщина шару покриття, межа поділу покриття та підкладки) проводили з використанням оптичного інвертованого мікроскопу ZEISS Axio Observer D1m, оснащеного системою автоматизованого аналізу зображення;

- підготовка поперечних мікрошліфів покриттів для металографічного аналізу включала вирізання зразків за допомогою прецизійного відрізного верстату Bühler IsoMet 2000, їх монтування в епоксидній смолі в Bühler SimpliMet 2000, шліфування і полірування в шліфувально-полірувальному верстаті Bühler EcoMet 3;

- мікротвердість зразків визначали за допомогою мікротвердоміра АМН55 за ДСТУ ISO 6507-1:2007;

- визначення адгезійної міцності покриттів проводилося клейовим методом на розривній машині за ДСТУ 2639-94 з використанням клею ВК9 за ОСТ В 84-2081-83;

- визначення коефіцієнту використання порошку (ефективності напилювання покриттів) проводили за приростом маси зразка шляхом зважування на лабораторних вагах зразку до та після напилювання з точністю до 0,0001 г, а також маси порошка, що було використано для отримання покриття.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ХГН

Реалізація процесу холодного газодинамічного напилювання можлива за умови досягнення частинками порошку певного матеріалу та розміру необхідних значень температури та швидкості у момент зіткнення з поверхнею підкладки. 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. В цілому, керування процесом напилювання та прогнозування фізико-механічних характеристик покриттів не можливе без наявності даних про температурно-швидкісні характеристики частинки.

В розділі представлено основні газодинамічні залежності, що описують газовий потік в каналі сопла, а також рівняння для розрахунку температурно-швидкісних характеристик частинок порошку в цьому потоці. Подано результати дослідження залежностей температури та швидкості частинок нікелю на виході з надзвукового сопла для холодного газодинамічного напилювання установки ДИМЕТ-405 від температури газу на вході в сопло, а також їх діаметру, отриманих з використанням одновимірної ізоентропійної моделі. Друга частина розділу присвячена чисельному моделюванню двофазного потоку в надзвуковому соплі; показано вплив температури газу на вході в сопло, а також розміру частинок нікелю, на їх прискорення та нагрівання в каналі сопла.

3.1 Газодинамічні основи ХГН

3.1.1 Одновимірна ізоентропійна модель розрахунку параметрів газу в соплі

Енергія, яка передається частинкам порошку при їх введенні в надзвуковий потік, є ключовим фактором, що забезпечує можливість реалізації процесу ХГН. Явища, які протікають при зіткненні частинок з підкладкою, їх зчеплення та

утворення покриття переважно залежать від швидкості та температури частинки для даного матеріалу, з якого вони отриманні. Це пояснює важливість дослідження газодинаміки двофазного потоку при розроблені технології ХГН. Енергія високотемпературного потоку з високим тиском перетворюється на кінетичну за допомогою звужувально-розширального каналу (сопла Лавалю) з відповідним співвідношенням тиску в критичному та вихідному перерізі сопла відповідно до газодинамічних залежностей, наведених нижче.

Газоподібне середовище при його протіканні, що супроводжується помітною зміною густини ($d\rho$) через зміну тиску (dP) і температури (dT) називається стисливим потоком. Швидкість зміни густини газу по відношенню до тиску можна пов'язати з швидкістю звуку. Звук є нескінченно малою хвилею, яка створює зміну тиску, густини та швидкості шляхом постійного розповсюдження в середовищі [115]. Його швидкість визначається як відстань, яку хвиля тиску проходить за одиницю часу в певному середовищі. Рівняння неперервності та збереження імпульсу в хвилі тиску можна пов'язати наступними залежностями

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dV}{c}, \quad (3.1)$$

і

$$c = \sqrt{\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_s} = \sqrt{\frac{k_{st}}{\rho}}, \quad (3.2)$$

де s означає процес постійної ентропії, оскільки невелика зміна тиску та температури призводить до майже зворотного процесу.

Таким чином, швидкість звуку також визначається як квадратний корінь із жорсткості k_{st} , поділеної на густину ρ матеріалу або миттєвої зміни пружності напруження через зміну густини. Враховуючи, що потік є ідеальним газом і описується законом для ідеального газу $P = \rho RT$, швидкість звуку ідеального газу можна отримати за допомогою формули [115]

$$c_g = \sqrt{\gamma RT}, \quad (3.3)$$

де R – газова стала приведена до молекулярної маси газу W , $R = 8,3144$ Дж/моль*К;

$$\gamma - \text{коефіцієнт питомої теплоємності, } \gamma = \frac{C_p}{C_v}.$$

Отже, потік, який характеризується низькою швидкістю звуку потребує незначної зміни тиску, щоб створити певну зміну густини, яка описується раніше представленим співвідношенням, що робить цей потік більш стисливим, ніж такий, для якого характерна висока швидкість звуку. Крім того, як видно з рівняння (3.3), швидкість звуку ідеального газу залежить виключно від температури газу T і типу газу γ . Таким чином, чим вище температура та питома теплоємність тим вищою може бути швидкість газу на виході з сопла. З таблиці 3.1 в якій наведено значення швидкості звуку деяких газів, можна зробити висновок, що через низьку реакційну здатність і відносну доступність, тобто низьку вартість, азот найкраще підходить для комерційного використання в установках ХГН.

Таблиця 3.1 – Швидкість звуку деяких газів за стандартних значеннях тиску та температури.

Газ	Швидкість звуку, м/с
Двоокис вуглецю, CO ₂	269
Аргон, Ar	322
Повітря (0,78N+0,21O ₂ +0,093Ar+0,0007CO ₂)	346
Азот, N	351
Гелій, He	1016
Водень, H	1315

Вплив швидкості звуку на стисливість середовища і характер імпульсів тиску можна оцінити через число Маха

$$M = \frac{V}{c}. \quad (3.4)$$

Таким чином, характеристики потоку газу залежать від швидкості потоку та локальної швидкості звуку. Ефект стиснення потоку починається при дозвукових ($0,3 < M < 1,0$) швидкостях і повністю розвивається при $M > 1,0$. Патерни потоку та явища, що протікають в реальній системі, яка складається зі стисливого середовища, дуже складні, але їх можна аналізувати та інтерпретувати використовуючи певні припущення. При спрощеному аналізі передбачається, що відбуваються зміни властивостей течії, а самі припущення наступні [87]:

1) газований потік ізоентропічний: адіабатичний ефект та ефекти тертя є малими. Тому потік також можна вважати зворотним і, таким чином, ізоентропічним.

2) Газований потік одновимірний: властивості газу однакові перпендикулярно напрямку потоку.

3) Газ є ідеальним.

4) Питома теплоємність постійного тиску ($dh = C_p dT$) і постійного об'єму ($du = C_v dT$) газу вважаються постійними; калорійно ідеальний газ.

Отже, якщо потік всередині звукувально-розширеного сопла розглядається як контрольний об'єм, до якого не підводиться енергія чи робота від зовнішнього джерела, який характеризується тиском і температурою гальмування, і якщо втрати тепла та тертя є незначними, тоді перший закон термодинаміки можна записати як ентальпію гальмування контрольного об'єму

$$h_0 = h + \frac{V^2}{2} = const, \quad (3.5)$$

де h_0 – ентальпія потоку при нульовій швидкості;

V – швидкість потоку.

Припущення про сталу питому теплоємність при постійному тиску та закон ідеального газу дозволяють записати наступне

$$C_p = \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)}. \quad (3.6)$$

Якщо в якості початкових умов задати температуру гальмування T_0 і масову витрату газу \dot{m} , а також враховуючи рівняння (3.6), то властивості газу (температура, тиск і густина) в будь-якій точці всередині сопла можна виразити за допомогою таких ізентропічних співвідношень [87]

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2, \quad (3.7)$$

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (3.8)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}. \quad (3.9)$$

З рівняння (3.9) видно, що зі збільшенням числа Маха газу його густина зменшується. Як буде описано далі, зменшення густини призводить до зменшення сили опору, прикладеної до частинок, які рухаються всередині потоку, що в свою чергу зменшує їх швидкість. Тому розширення газу до високих значень числа Маха всередині звукувально-розширеного сопла не означає забезпечення високих швидкостей частинок. З цієї причини процес ХГН реалізується в надзвуковому режимі течії в діапазоні числа Маха від 2,0 до 3,0 замість гіперзвукового режиму.

На додаток до першого закону термодинаміки, закон збереження маси з урахуванням рівнянь (3.1) і (3.2) також можна записати для контрольного об'єму, що розглядається [116]

$$\left. \begin{aligned} \dot{m} &= \rho VA \\ -\partial P &= \rho V \partial V \\ \partial P &= c^2 \partial \rho \end{aligned} \right\} = (1 - M^2) \frac{\partial V}{V} = -\frac{\partial A}{A}. \quad (3.10)$$

При $M < 1,0$, зменшення площі поперечного перерізу в напрямку потоку, $\partial A < 0$, є єдиним способом прискорити потік ($\partial V > 0$). Зі зменшенням площі швидкість потоку буде продовжувати збільшуватися, але з меншою інтенсивністю, оскільки швидкість потоку буде наближатися до швидкості звуку. На це безпосередньо впливає член $(1 - M^2)$, який зменшується зі збільшенням числа Маха M при зростанні швидкості. Для $M > 1,0$ з рівняння (3.10) видно, що єдиний спосіб збільшити швидкість газового потоку – це збільшити площу ($\partial A > 0$). Отже, щоб забезпечити необхідне постійне прискорення потоку при ХГН використовується звукувальньо-розширне сопло. Тобто в звукувальній частині сопла ($M < 1,0$) площа зменшується, потік прискорюється, а при проходженні потоком критичного перетину за певних умов газ продовжуватиме прискорюватися в розширній частині. Умова, яка має бути виконана в критичному перетині для забезпечення прискорення газу по всьому каналу сопла – це досягнення потоком числа Маха $M = 1,0$.

Не дивлячись на те, що вище представлені залежності можна використовувати для ізоентропічних потоків, існують певні умови по тиску гальмування та протитиску (тиску на виході з сопла), які призводять до неізоентропічного потоку та/або не забезпечують необхідних умов у критичному перерізі. На рисунку 3.1 показано поведінку газу для різних співвідношень тиску гальмування та протитиску [118]:

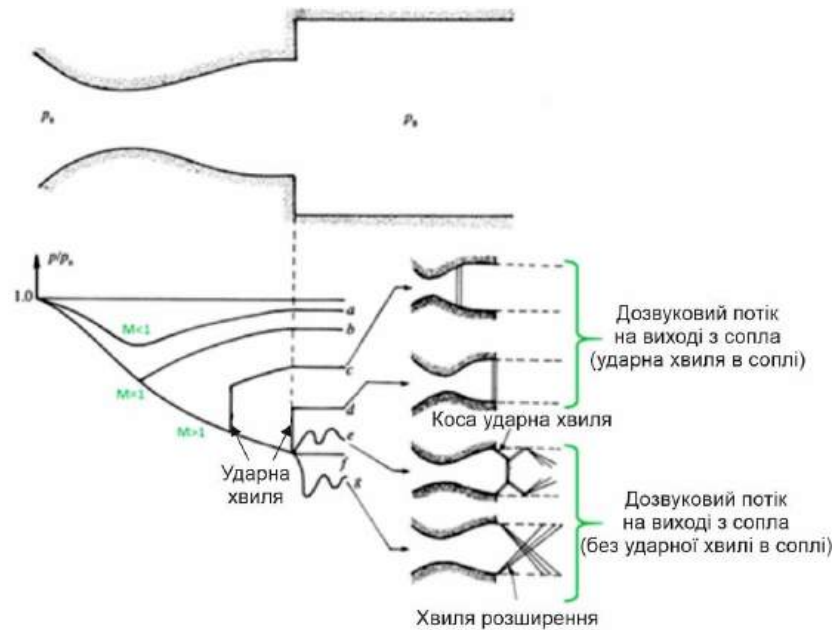


Рисунок 3.1 – Поведінка газового потоку на основі співвідношення тиску гальмування та протитиску [117].

1) Якщо $\Delta P = 0$, газ залишатиметься статичним і прискорення не відбуватиметься, тобто не відбуватиметься перетворення ентальпії в кінетичну енергію.

2) Коли протитиск зменшується, потік прискорюється в напрямку вихідного перерізу сопла від звукувальної частини до розширної, як це було описано вище при аналізі рівняння (3.10). При цьому, якщо в критичному перерізі досягається умова дозвуку ($M < 1,0$), в розширній частині сопла потік буде сповільнюватися (рисунок 3.1а).

3) При подальшому зниженні протитиску та при досягненні в критичному перерізі швидкості звуку ($M = 1,0$), можуть виникнути два випадки:

– якщо зниження тиску недостатньо низьке, щоб підтримувати прискорення в розширній частині сопла, то газ все одно сповільнюватиметься, з перетворенням кінетичної енергії в ентальпію (рисунок 3.1б);

– якщо тиск на виході нижче критичного значення, тобто нижче тиску випадку б, потік буде прискорюватися в розширній частині та буде досягнутий надзвуковий режим. Однак для вирівнювання тиску потоку з протитиском буде необхідна нормальна ударна хвиля, після чого швидкість потоку, температура і

густина різко зменшуються. Чим нижчий тиск на виході, тим далі по течії відбувається виникнення ударної хвилі (рисунок 3.1в), аж до поки вона не досягне випадку z .

4) рисунок 3.1д і рисунок 3.1з показують перерозширені та недорозширені потоки відповідно. У випадку перерозширення тиск на виході є нижчим, ніж протитиск (рисунок 3.1ж). Далі на виході потрібна серія незворотних косих ударних хвиль і хвиль розрідження, щоб збільшити тиск потоку. З іншого боку, недорозширений потік потребує додаткового розширення, щоб зменшити тиск на виході до протитиску. Потім утворюються хвилі розрідження та косі ударні хвилі, щоб забезпечити досягнення протитиску.

5) Нарешті, рисунок 3.1ж є ідеальним ізоентропійним випадком, що характеризується відсутністю значних перешкод всередині і зовні сопла. Це відбувається, коли газ всередині сопла досягає значень протитиску на виході з нього.

При досягненні звукового режиму в критичному перетині, тиск гальмування P_0 і властивості газу в критичному перетині (температура T^* , швидкість V^* і густина ρ^*) можуть бути розраховані наступним чином [87]

$$T^* = \frac{T_0}{1 + (\gamma - 1)/2}, \text{ при } M^* = 1, \quad (3.11)$$

$$V^* = \sqrt{\gamma RT^*}, \quad (3.12)$$

$$\rho^* = \frac{m^*}{V^* A^*}, \quad (3.13)$$

де A^* – поперечна площа в критичному перерізі.

Крім того, використовуючи закон ідеального газу, можна розрахувати тиск газу в критичному перерізі

$$P^* = \rho^* RT^*. \quad (3.14)$$

За відомим тиском газу в критичному перерізі можна розрахувати тиск гальмування

$$P_0 = P^* \left(\frac{T_0}{T^*} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = P^* \left(\frac{\gamma-1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}. \quad (3.15)$$

Нарешті, відношення площ поперечних перерізів сопла та число Маха може бути представлено як

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{1}{(\gamma-1)} \left(1 + \frac{(\gamma+1)}{2} M^2 \right) \right]^{\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}}, \quad (3.16)$$

з якого можна отримати число Маха на виході для сопла, що проектується. Площа критичного перерізу сопла A^* існуючих комерційних установок ХГН знаходиться в діапазоні від 1,0 мм² до 3,0 мм², що зазвичай залежить від максимальної витрати газу, під яку розробляється система, відштовхуючись від потужності нагрівача газу. Масова витрата газу, постійна по всьому соплу, може бути виражена у вигляді [118]

$$\dot{m} = \frac{A^* P_0}{\sqrt{T_0}} \sqrt{\frac{\gamma}{R}} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{-(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}}. \quad (3.17)$$

Сопла, які використовуються в процесі ХГН проектуються таким чином, щоб якомога ближче відповідати ізентропічному сценарію, показаного на рисунку 3.1ж, з метою попередження виникнення збурень та великих коливань властивостей потоку, що унеможливило прогнозування та керування характеристиками покриттів. Однак зазвичай з практичних міркувань використовується більш-менш універсальне сопло для роботи на різних

початкових параметрах газу, що призводить до режимів пере- або нерозширення газу на виході з сопла. І хоча ударні хвилі всередині сопла можна уникнути, їх неможливо повністю усунути в процесі ХГН. Після виходу з сопла надзвуковий потік спрямовується на поверхню підкладки, при натіканні газу на якій утворюється головна ударна хвиля. Різкі зміни властивостей газу та раптове збільшення густини потоку в статичній області впливають на траєкторію потоку та характеристики частинок порошку, які знаходяться в цьому потоці. Значний вплив це має частинки малого розміру, що рухаються з меншою інерцією. Зі збільшенням швидкості потоку збільшується сила ударної хвилі, що знову ж таки обмежує значення числа Маха газу до оптимальних в діапазоні від 2,0 до 3,0.

Вплив ударної хвилі на швидкість частинок можна зменшити за рахунок збільшення відстані від зрізу сопла до поверхні підкладки, що називається дистанцією напилювання. Чим більшою є дистанція напилювання, тим меншою є швидкість газу при натіканні на поверхню підкладки, і на певній відстані ударна хвиля може взагалі не утворюватися. Проте, незважаючи на те, що вплив головної ударної хвилі зменшується збільшенням дистанції напилювання, частинки, які рухаються довше в межах уповільненого потоку, також можуть відчувати різке падіння швидкості. Таким чином, оптимізація параметрів напилювання має відбуватися з урахуванням не лише початкових параметрів газу, а й дистанції напилювання та розмірів частинок порошку.

Результати розрахунків, які наведено в цьому розділі нижче, виконані з використанням ізоентропійних припущень. Проте на практиці на протікання потоку в соплі впливають також наявність тертя, втрат тепла та в'язкості газу [119]. Ці ефекти зменшують можливу ентальпію, яка перетворюється на кінетичну енергію, відповідно зменшуючи швидкість газу на виході. Наявність приграничного шару на стінках сопла може зменшити швидкість газу до 67 % від розрахункового ізоентропічного значення [120]. Використання в процесі ХГН сопел більшої довжини дозволяє зменшити збурення, які виникають через приграничний шар, і покращують швидкість потоку на виході з сопла [120].

3.1.2 Модель розрахунку параметрів частинки порошку в газовому потоці

На рисунку 3.1 узагальнено представлено характеристики, які описують потік, примежовий шар та частинки порошку в потоці, що пояснює рівняння, які використовуються для розрахунку температури та швидкості частинки в процесі ХГН.

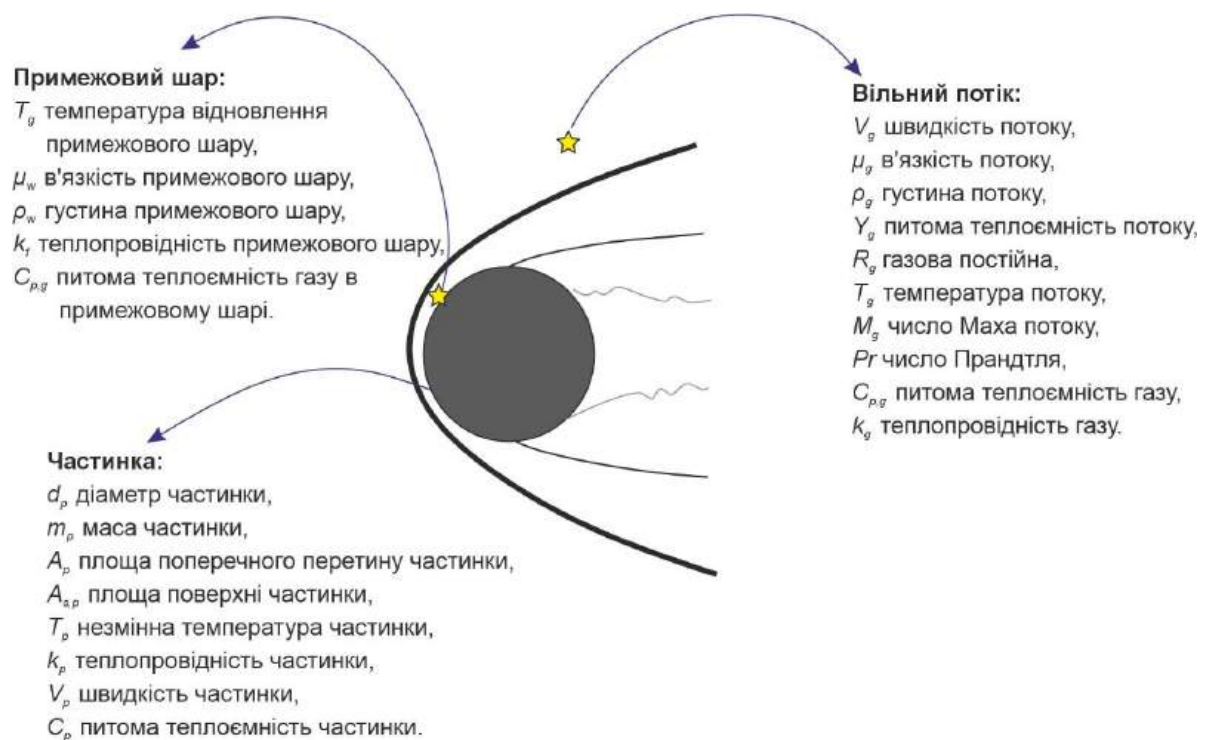


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення частинки порошку в газовому потоці та оточуючого середовища.

Для визначення швидкості частинки порошку в газовому потоці при ХГН можна використати залежність [121]

$$m_p \frac{dV_p}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho_g A_p (V_g - V_p)^2 + F_b, \quad (3.18)$$

де m_p , V_p , C_D , ρ_g , V_g , A_p і F_b – маса частинки, швидкість частинки, коефіцієнт лобового опору частинки, густина газу, швидкість газу, площа поперечного

перерізу частинки і масові сили відповідно. Масові сили можуть враховувати силу гравітації [122], підйомну силу [123], електростатичну силу [122], несприятливий градієнт тиску через ударну хвилю тощо [124].

Для визначення числа Рейнольдса Re_p і числа Маха M_p частинки можна скористатися наступними залежностями [121]

$$Re_p = \frac{\rho_g |V_g - V_p|}{\mu_g} \quad (3.19)$$

і

$$M_p = \frac{|V_g - V_p|}{c} = \frac{|\Delta V|}{\sqrt{\gamma R_g T_g}}, \quad (3.20)$$

де нижні індекси g і p відносяться до газу і частки відповідно;

μ – динамічна в'язкість газу

$$\mu = \frac{C_1 T_f^{3/2}}{T_f + C_2}, \quad (3.21)$$

де C_1 і $C_2 = 1,663 \cdot 10^{-5}$ кг/м с К^{1/2}.

Використовуючи рівняння для визначення швидкості звуку для ідеального газу (рівняння (3.3)), числа Маха (рівняння (3.4)) і закон ідеального газу, прискорення частинок можна виразити як

$$a_p = \frac{P_0}{2RT_0} \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-\frac{1}{\gamma-1}} \left(M \sqrt{\gamma RT_0 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2\right)^{-1}} - V_p \right)^2 C_D \frac{A_p}{2Vol_p \rho_p}. \quad (3.22)$$

Для того, щоб підвищити густину газу для кращого прискорення частинок порошку в практиці ХГН використовуються системи високого тиску, тиск гальмування газу яких досягає 5 МПа. Проте з рівняння видно, що імпульс частинок в газовому потоці також залежить від їх матеріалу та розміру [125].

Правильне визначення коефіцієнту лобового опору частинок у широкому діапазоні режимів течії газового потоку є необхідним для точнішого розрахунку швидкості частинок у процесі ХГН. В таблиці 3.2 наведено деякі рівняння для розрахунку коефіцієнту лобового опору, які були використано раніше різними авторами в дослідженнях газодинаміки процесу ХГН.

Таблиця 3.2 – Моделі розрахунку коефіцієнту лобового опору частинок при ХГН [126].

Автор	Рівняння	Умова використання	Потік	Посилання на джерела в яких модель була використана
[126]*	$C_D = \left(C_{D(\text{нестискаємий})} - 2 \right) \times$ $\times \exp \left(-3,07 \gamma^{1/2} \left(\frac{M_p}{Re_p} \right) g(Re) \right) +$ $+ \frac{h(M_p)}{\gamma^{1/2} M_p} \exp \left(\frac{-Re_p}{2M_p} \right) + 2$	$0,2 < Re_p <$ < 100000 $1 < M_p < 2$	Стисливий	[127], [128]
[129]	$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re_p} + \frac{a_3}{Re_p^2},$ <p>де $a_{1,2,3}$ – постійні</p>	$0,1 < Re_p <$ < 50000	Нестисливий	[130]
[131]	$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + 0,15 Re_p^{0,687} \right) +$ $+ \frac{0,42}{1 + 4,25 \times 10^4 Re_p^{-1,16}}$	$Re_p < 300000$ $M_p > 0,4$	Нестисливий / стисливий	[132], [133]
[134]**	C_{D1} для $M_p \leq 1$ C_{D2} для $1 < M_p < 1,75$ C_{D3} для $M_p \geq 1,75$	Будь-які значення M_p	Стисливий	[124], [135]
$*g(Re) = \frac{1 + Re_p (12,278 + 0,584 Re_p)}{1 + 11,278 Re_p} \text{ і } h(M_p) = \left[\frac{5,6}{(M_p + 1)} \right] + 1,7 \sqrt{\frac{T_p}{T}};$ <p>**Детальний опис рівнянь для визначення C_{D1}, C_{D2} і C_{D3} для різних режимів течії наведено в роботі [116].</p>				

Для визначення температури частинки в газовому потоці при ХГН необхідно визначити її сумарний середній коефіцієнт конвекційної теплопередачі \bar{h} , який

враховує всі характеристики потоку, який оточує поверхню частинки. Загальний теплообмін, що виникає на поверхні частинки, може бути записаний як [121]

$$q = \bar{h}A_s(T_w - T_p) \quad (3.23)$$

і

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h dA_s, \quad (3.24)$$

де A_s – поверхня частинки;

T_w – температура газу в примежовому шарі, тобто на стінці.

Безрозмірний градієнт температури, тобто число Нуссельта, може бути розраховано наступним чином

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}d_p}{k_g}, \quad \overline{Nu} = f(\text{Re}_p, M_p, \text{Pr}), \quad (3.25)$$

де k_g – теплопровідність газу;

d_p – діаметр частинки.

Після знаходження числа Нуссельта можна далі розрахувати коефіцієнт конвекційної теплопередачі. Для спрощення розрахунку числа Нуссельта можна використати залежність Ранца-Маршалла, яка є доволі розповсюдженою при дослідженнях процесу ХГН

$$Nu = 2 + 0.6\text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{0.33}, \quad (3.26)$$

де Pr – число Прандтля.

Однак залежність Ранца-Маршалла була розроблена для застосування при низьких числах Рейнольдса (від 0 до 200) і низьких числах Маха [125]. Отже, вона не враховує, серед багатьох інших особливостей потоку, вплив числа Маха, стисливості та розрідження на теплопередачу, які, як відомо, мають місце на

надзвукових режимах двофазного потоку. За результатами літературного аналізу можна виділити інші моделі, які враховують вплив числа Кнудсена Kn_p , Рейнольдса Re_p та Маха M_p на процеси нагрівання частинки, але складність експериментального вимірювання температури частинок у процесі ХГН унеможливило підтвердження їх точності та достовірності. У таблиці 3.3 наведено деякі моделі для розрахунку числа Нуссельта.

Таблиця 3.3 – Моделі розрахунку числа Нуссельда при ХГН [136].

Автор	Рівняння	Умова використання	Потік	Посилання на джерела в яких модель була використана
Kavanau* [137]	$Nu = \frac{Nu_0}{1 + 3,42Nu_0 \frac{M_p}{Re_p Pr}}$	Враховує розрідження і стисливість	Нестисливий / стисливий	[138]
Meingast**	$Nu = 2 + 0,4 Re_p^{0,5} Pr^{1/3} \times \exp(0,1 + 0,872M_p)$	$M_p > 0,24$ $T_g > T_p$	Стисливий	[138], [139]
Whitaker [140]	$Nu = 2 + (0,4 Re_\infty^{0,5} + 0,06 Re_\infty^{2/3}) \times Pr_\infty^{0,4} \left(\frac{\eta_\infty}{\eta_p} \right)^{1/4}$	$3,5 \leq Re_\infty \leq 7,6 \times 10^4$; $0,71 \leq Pr_\infty \leq 380$; $1,0 \leq \left(\frac{\eta_\infty}{\eta_p} \right) \leq 3,2$	Нестисливий / стисливий	[141]
Fiszdon та ін. [142]	$Nu = 2 + 0,6 Re_\infty^{1/2} Pr_\infty^{1/3} \left(\frac{\rho_\infty \eta_\infty}{\rho_p \eta_p} \right)^{0,6}$	Великі значення числа Маха	Стисливий	[141]
Lee і Pfender [141]	$u = 2 + 0,6 Re_\infty^{1/2} Pr_\infty^{1/3} \times \left(\frac{\rho_\infty \eta_\infty}{\rho_p \eta_p} \right)^{0,6} \left(\frac{C_{p,\infty}}{C_{p,p}} \right)^{0,38}$	Великі значення числа Маха	Стисливий	[141]
* Nu_0 – число Нуссельда для нестисливого потоку;				
**першоджерело відсутнє, опис в роботі [118].				

Якщо температуру частинки вважати рівномірною, з використанням першого закону термодинаміки можна записати наступне рівняння [116]

$$m_p C_p \frac{dT_E}{dt} = A_{s,p} \bar{h} (T_r - T_p), \quad (3.27)$$

де m_p , C_p , $A_{s,p}$ та T_r – маса частинки, питому теплоємність частинки, площу поверхні частинки і температура відновлення відповідно.

Температура відновлення є температурою всередині примежового шару, що оточує частинку під час її польоту в потоці газу

$$T_r = T_g \left(1 + r \frac{\gamma - 1}{2} M_p^2 \right), \quad (3.28)$$

де r – коефіцієнт відновлення, зазвичай близький до 1 для газів [121].

Коефіцієнт відновлення для числа Рейнольдса близького до 2000 може бути розрахований за допомогою залежності

$$r = \sqrt{Pr} = \sqrt{\left(\frac{\mu_{g,f} C_{p(g,f)}}{k_{g,f}} \right)}, \quad (3.29)$$

де Pr – число Прандтля;

k_g – теплопровідність газу, яка є функцією від температури [143]:

$$k = \frac{9\gamma - 5}{4} \frac{C_v}{\pi d^2} \sqrt{\frac{M k_B T_r}{N \pi}}, \quad (3.30)$$

де N – число Авоґрадо, $N = 6,022 \cdot 10^{23}$ молекул/моль;

k_B – стала Больцмана, $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К;

d – діаметр молекули газу;

M – молекулярна маса.

3.1.3 Результати розрахунків температурно-швидкісних параметрів газу та частинки в соплі СК-20

Нижче наведено результати розрахунків швидкості та температури газу та нікелевих частинок порошку в каналі надзвукового звужувально-розширеного сопла СК-20 (рисунок 2.2) установки холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405 за допомогою одновимірної ізоентропійної моделі.

Початкові дані для розрахунку подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Початкові дані для розрахунку температури та швидкості газу та частинок порошку за одновимірною ізоентропійною моделлю.

Параметр	Значення
Частинки порошку:	
- матеріал частинки порошку	Нікель
- густина матеріалу частинки ρ_p , кг/м ³	8874
- діаметр частинки порошку d_p , мкм	10; 25; 40
- питома теплоємність матеріалу частинки C_p , Дж/кг·К	446
- початкова температура частинки T_{p0} , К	293
Робочий газ (повітря):	
- газова стала R , Дж/кг·К	287,05
- показник адіабати γ	1,4
- температура гальмування T_0 , °С	713; 793; 893
- тиск гальмування P_0 , МПа	0,9

На рисунку 3.2 і 3.3 представлено результати розрахунку температури та швидкості газу та частинки нікелю відповідно в соплі СК-20.

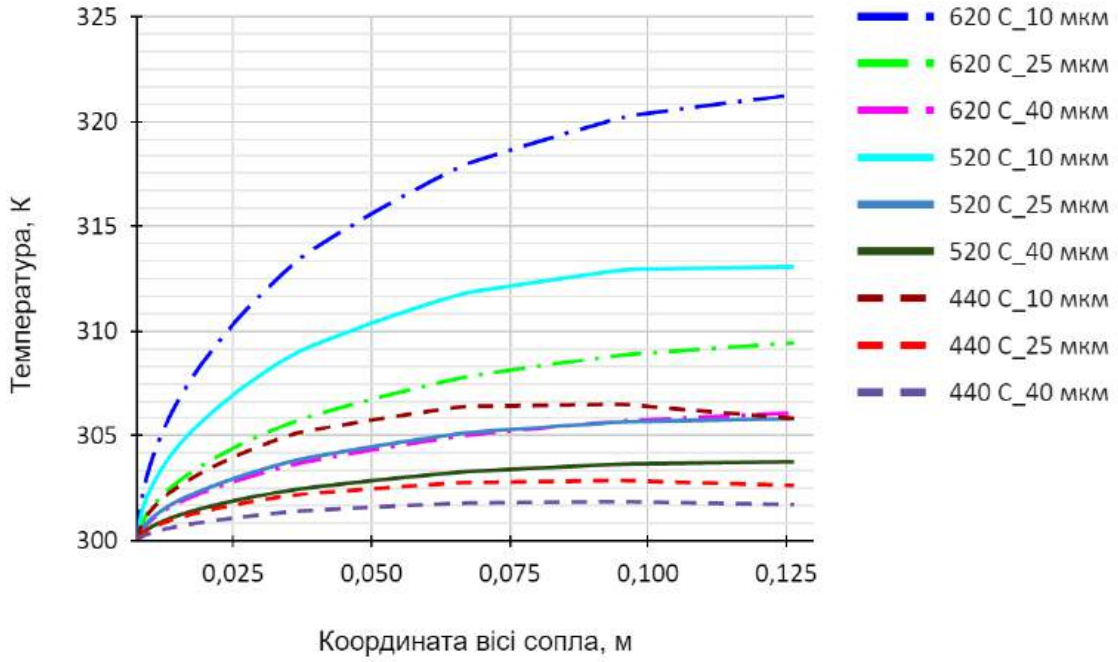


Рисунок 3.2 – Результати розрахунку температури частинки нікелю в соплі СК-20 за ізоентропійною моделлю.

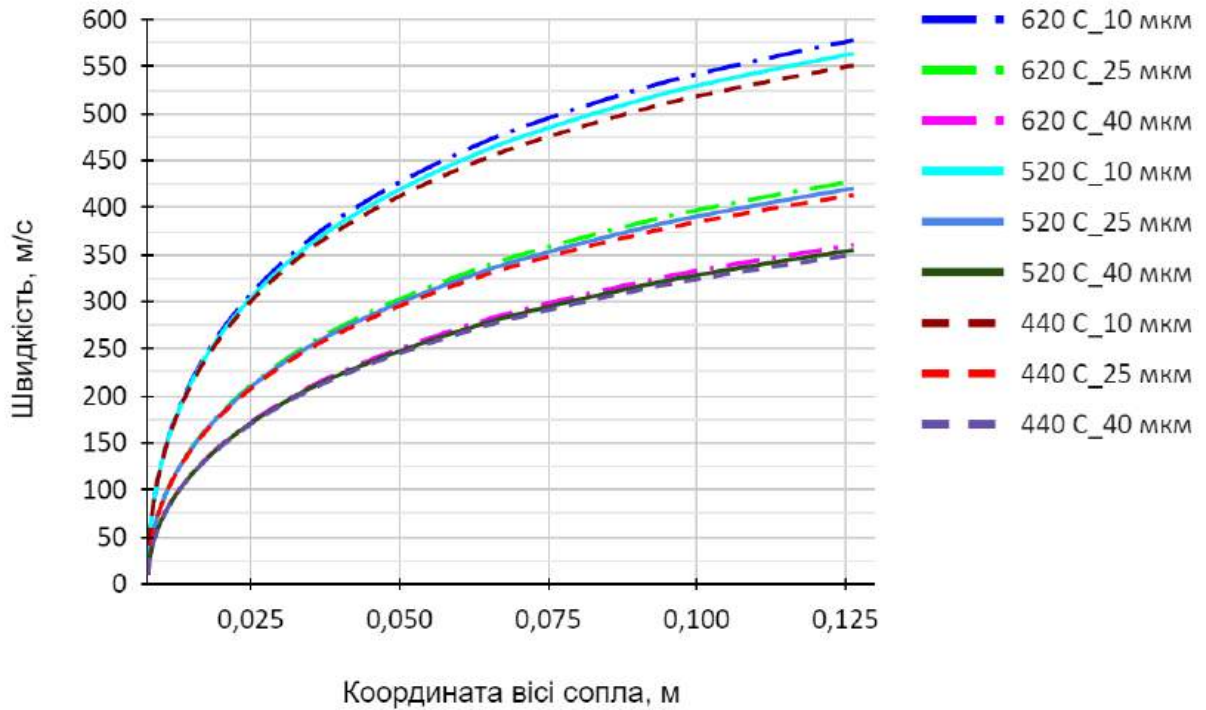


Рисунок 3.3 – Результати розрахунку швидкості частинки нікелю в соплі СК-20 за ізоентропійною моделлю.

Подача порошку в сопло СК-20 відбувається в розширну частину сопла, а її початкова точка лежить на осі сопла на координаті $X = 0,03$ м. Із зростанням швидкості газового потоку в розширній частині сопла зростає швидкість частинки. З рисунку 3.3 видно, що зі збільшення діаметру частинки її швидкість на виході з сопла падає. Так, швидкість частинок нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм на виході із сопла становить 551 м/с, 413 м/с і 350 м/с при тиску гальмування $P_0 = 0,9$ МПа і температурах гальмування 713 К відповідно. При збільшенні температури гальмування до 893 К та постійному тиску гальмування 0,9 МПа швидкість частинок нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм зростає до 558 м/с, 428 м/с і 360 м/с відповідно.

Температури частинок нікелю на виході з сопла залежить від їх діаметру – зі збільшенням останнього температура частинки зростає. Для діаметру частинки 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм температура становить 306 К, 303 К і 302 К при тиску гальмування $P_0 = 0,9$ МПа і температурах гальмування 713 К відповідно. При збільшенні температури гальмування до 893 К та постійному тиску гальмування 0,9 МПа температура частинок нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм зростає до 321 К, 309 К і 306 К відповідно [144, 145].

3.2 Чисельне моделювання газодинаміки двофазного потоку

3.2.1 Створення розрахункової моделі, розрахункової сітки, налаштування початкових та граничних умов

Чисельне моделювання газового потоку з частинками порошку в каналі надзвукового сопла та в затопленому просторі виконано з використанням програмного пакету ANSYS Fluent 18. Моделювання проводилося в двовимірній площині, розрахункова модель якого представлена на рисунку 3.4. Геометричні розміри сопла СК-20 установки для холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405 показано на рисунку 2.2.

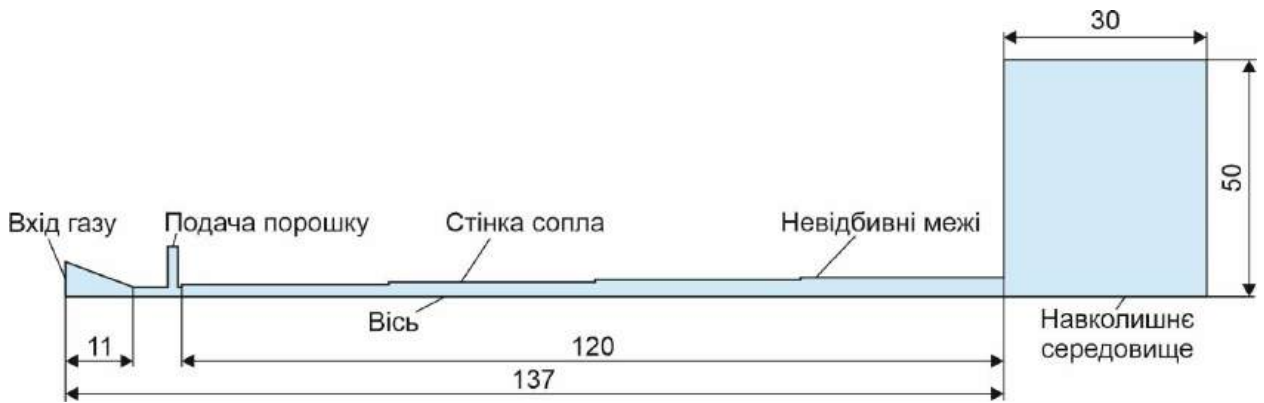


Рисунок 3.4 – Розрахункова модель для чисельного моделювання.

Загальна довжина сопла становить 137 мм; довжина затопленого простору від зрізу сопла – 30 мм. Подача порошку в сопло відбувається через канал за критичним перерізом сопла шляхом ежекції. Граничні умови наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Граничні умови для моделювання.

Місце	Тиск P	Швидкість V	Температура T
Вхідний перетин сопла	Заданий	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	Задана
Навколишній простір	Нормальні умови	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
Стінки сопла	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$	0	$\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
Вхідний перетин каналу подачі порошку	Нормальні умови	$\frac{\partial V}{\partial n} = 0$	Кімнатна температура

Створення сітки розрахункової області було виконано з використанням інструменту ANSYS WB Meshing Tool. Структурована чотирикутна неоднорідна сітка розрахункової області, яка характеризується високою здатністю конвергенції.

Для кращого вирішення в області приграничного шару на твердих стінках моделі вертикальні сторони сітки було задано з коефіцієнтом зростання 1,2. Було задано сітку мінімальної ортогональної якості рівної 0,7 і максимальним співвідношенням сторін рівним 30. Отримана щільність дозволяє забезпечити достатню точність розрахунків на ділянках із складним явищем течії.

3.2.2 Основні рівняння

Рух стисливого газового потоку може бути описаний за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса. Рівняння збереження маси та енергії, імпульсу та кінетичної енергії турбулентності наведено нижче [115].

Рівняння безперервності має вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (3.31)$$

де ρ – густина газового потоку;

t – час;

u_i – швидкість потоку в напрямку i і x_i координати в просторі.

Рівняння збереження імпульсу

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-P + \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M, \quad (3.32)$$

де P – тиск, який включає додатковий член через турбулентне нормальне напруження;

S_M – маса, додана до газової фази з дисперсної фази частинок або зміна імпульсу, яку вона створює для газової фази в кожній системі координат.

Параметр μ_{eff} враховує в'язкість при турбулентній течії, яка визначається як

$$\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (3.33)$$

де $C_\mu = 0,0845$ [146].

Складові k і ϵ отримані з використанням відповідного диференціального рівняння переносу:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \alpha_k \left(\frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \right] + G_k + G_b - Y_M + S_k - \rho \epsilon, \quad (3.34)$$

і

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \alpha_\epsilon \left(\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - \\ - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon - R_\epsilon, \end{aligned} \quad (3.35)$$

де $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ і $C_{3\epsilon}$ – постійні турбулентності, які обираються залежно від умов моделювання [146];

α_ϵ і α_k – обернені ефективні числа Прандтля для k і ϵ відповідно;

G_k і G_b – параметри, що відображають утворення турбулентної кінетичної енергії внаслідок градієнту середньої швидкості та підйомної сили, відповідно;

S_k і S_ϵ – задані користувачем величини.

Додатковий член R_ϵ , у рівнянні швидкості дисипації визначається як

$$R_\epsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right) \epsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{1}{k}, \quad (3.36)$$

де $\eta \equiv S_k/\epsilon$ в якому S відноситься до модуля тензора середньої швидкості деформації, $\eta_0 = 4,33$ і $\beta = 0,012$ [146].

Повна енергія системи або повна ентальпія (h_{tot}), модифікована для рівняння середньої енергії Рейнольдса, може бути записана у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h_{tot}) - \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_i (\tau_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \right] + S_T, \end{aligned} \quad (3.37)$$

де Pr_t – турбулентне число Прандтля;

S_T – параметр, що відображає теплопередачу між потоком і частинками;

τ – тензор напруження;

λ – теплопровідність.

Повна ентальпія пов'язана з повною енергією системи через врахування роботи в'язкості у вигляді

$$h_{tot} = C_v T + \frac{1}{2} (u_i u_j) + k. \quad (3.38)$$

Додатковими членами S_m і S_t , які включено в рівняння (3.32) і (3.37) можна знехтувати через малу концентрацію частинок в газовому потоці. Ці параметри не враховані для великого числа Стокса і малого параметру імпульсної взаємодії Π_{mom} [147]. Імпульс взаємодії, записаний нижче, використовується для оцінки впливу фази частинок порошку на газовий потік

$$\Pi_{mom} = \frac{z}{\frac{\rho_p d^2 V}{18 \mu_g L} + 1}, \quad (3.39)$$

де p і g – індекси, які відносяться до параметрів частинки і газу відповідно;

d – діаметр частинки;

L – наведена характеристична довжина, тобто діаметр сопла в певному місці;

Z – відношення маси порошку до газу. Крім того, багато хто використовував об'ємне (*Volume*) відношення потоку частинок до газу для оцінки значущості впливу фази частинок на газовий потік [148]

$$\frac{Volume_p}{Volume_g} = \frac{\dot{m}_p \dot{\rho}_g}{\dot{m}_g \dot{\rho}_p}, \quad (3.40)$$

де \dot{m} , $\dot{\rho}$ – витрати маси та густини відповідно.

За умови, що $\rho_g \ll \rho_p$ виконується і що швидкість подачі порошку, яка використовується в дисертаційному дослідженні, становить 0,6 г/с, отримано співвідношення менше 1% вказує відсутність впливу. Взаємодія між частинками також може впливати на поведінку двохфазного потоку. Рівень взаємодій між частинками можна описати як відношення середньої відстані між частинками, L_p , до їх середнього діаметру d_{av}

$$D = \frac{L_p}{d_{av}}. \quad (3.41)$$

Оскільки концентрація порошку, що подається в сопло, в одиницю об'єму потоку є незначною, то взаємодією між частинками можна знехтувати.

Моделювання твердої фази виконано за допомогою Лагранжевого процесу як одиничної частинки в просторі [147, 148, 149]. Для розрахунку використовувався вирішувач на основі тиску (Pressure-based). Розрахунок градієнтів виконувався методом Гріна-Гаусса на основі вузлів (Green-Gauss node-based). Для оцінки тиску використовувалася схема другого порядку; при цьому опція швидкого розрахунку була застосована (QUICK Scheme) для розв'язання рівнянь густини та імпульсу.

Для того, щоб врахувати ефект стискаємості для розрахунків було використано закон для ідеального газу. Коефіцієнт стисливості для повітря з тиском до 1,0 МПа і температурою 620 °С показує відхилення менше 4 %, що підтверджує можливість виконання розрахунків як для ідеального газу [146].

Для визначення в'язкості ідеального газу в залежності від температури було використано закон Сазерленда [124].

3.2.3 Модель турбулентності

Для надзвукового потоку через високі значення швидкості сили інерції очікувано переважають над впливом в'язкої дисипації, що призводить до одержання високих значень числа Рейнольдса. Тому потік розглядається як турбулентний. В розрахунках газового потоку при холодному газодинамічному напилуванні застосовують усереднені за Рейнольдсом системи рівнянь Нав'є-Стокса, а для замикання систем використовують моделі турбулентності. Всі ці моделі містять різне число емпіричних констант, які справедливі за певних умов. Відомо, що та чи інша модель, як правило, дозволяє отримати задовільні результати лише для певного класу течії. Для моделювання газодинаміки потоку при холодному газодинамічному напилуванні використовують такі моделі, як стандартна k - ε модель [150], RNG (Renormalization-group) k - ε модель [151], Realizable k - ε модель [152], диференціальні моделі для напружень Рейнольдса (RSM), модель переносу рейнольдсових напружень SST (Shear-stress transport) k - ω модель [153], модель Спаларта-Альмараса (Spalart–Allmaras) [154], та інші.

В дисертаційній роботі було обрано RNG k - ε модель, оскільки вона забезпечує достатньо високу точність результатів розрахунків газового потоку [155].

3.2.4 Дискретна фаза (частинки порошку)

Додавання частинок нікелевого порошку в газовий потік в соплі відбувається через канал подачі порошку, перпендикулярно осі сопла (рисунок

2.2). Розрахунок сил і теплопередачі від потоку до частинок було виконано з використанням закону Ньютона та рівняння балансу енергії. Розрахунок коефіцієнту лобового опору виконувався за допомогою рівнянь (3.40) і (3.41). Моделювання двофазного потоку виконано за допомогою комбінованого лагранжевого методу.

В таблиці 3.6 наведено властивості матеріалу частинок порошку нікелю та робочого газу, які було використано при моделюванні, а також інші параметри процесу напилювання.

Таблиця 3.6 – Властивості дисперсної та газової фаз.

Параметр	Значення
<i>Частинка порошку:</i>	
матеріал	нікель
густина ρ_p , кг/м ³	8874
діаметр d_p , мкм	10; 25; 40
питома теплоємність C_p , Дж/кг·К	446
початкова температура T_{p0} , К	293
<i>Робочий газ (повітря):</i>	
питома газова стала R , Дж/кг·К	287,05
показник адіабати γ	1,4
температура гальмування T_0 , К	713; 793; 893
тиск гальмування P_0 , МПа	0,9
<i>Транспортуючий газ для порошку (повітря):</i>	
питома газова стала R , Дж/кг·К	287,05
показник адіабати γ	1,4
температура гальмування T , К	293
тиск гальмування P , МПа	0,1

Швидкість і траєкторія дискретної фази, тобто частинок нікелю, у двофазному потоці були розраховані за допомогою балансу сили опору (див. рівняння (3.29))

В рівнянні (3.29) не включено інших додаткових сил, такі як сила гравітації, підйомна та електростатичні сили які суттєво не впливають на імпульс частинки в процесі холодного газодинамічного напилювання.

Для визначення коефіцієнту опору C_D в залежності від числа Маха частинки були використані рівняння, наведені в роботі [134]. Наведені в роботі [134] залежності, які охоплюють широкий діапазон чисел Маха та Рейнольдса частинок, показали точні результати на основі експериментальних досліджень двофазного потоку [116, 124, 147]. Для розрахунку перехідних процесів теплопередачі частинок використовується рівняння балансу енергії з першого закону термодинаміки [116, 156].

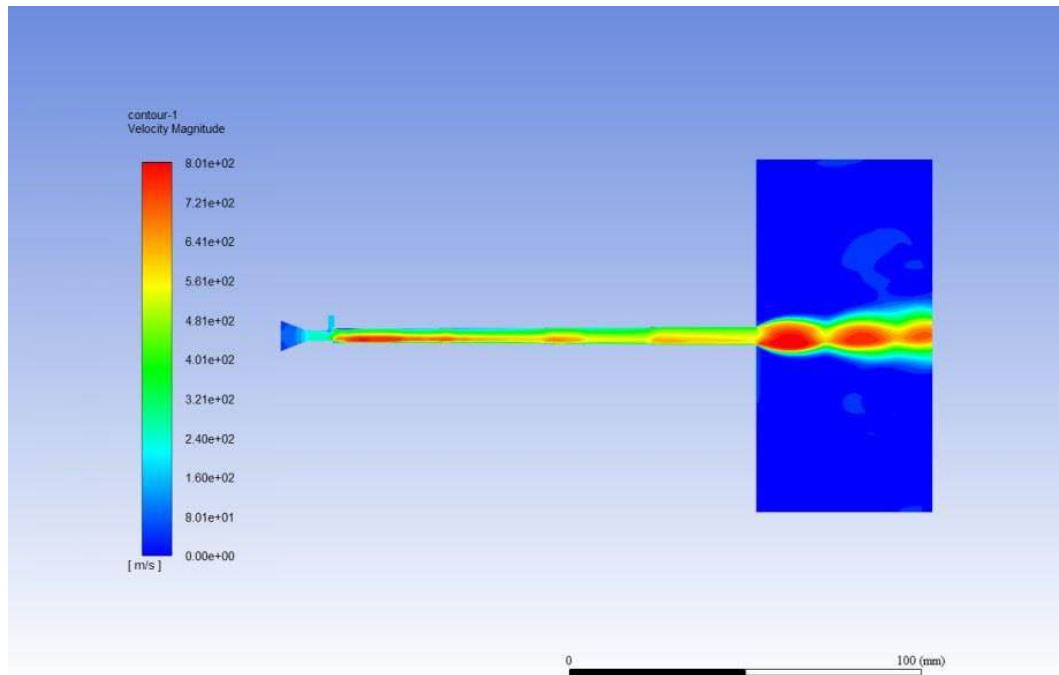
Для визначення середнього коефіцієнта конвективної теплопередачі використовується критерій Нуссельта

$$\overline{Nu} = 2 + 0,44 Re^{0,5} Pr^{0,33} \exp(0,1 + 0,872 M_p). \quad (3.42)$$

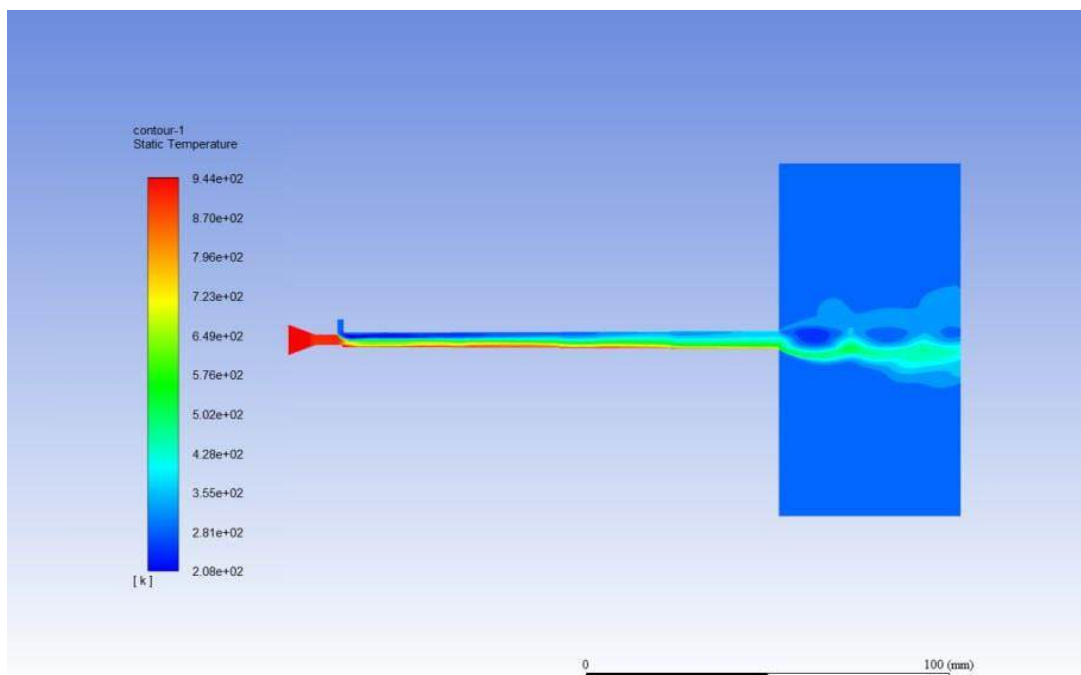
Рівняння (3.42) застосовується у випадку, коли число Маха частинок більше 0,24, у всіх інших випадках використовується загальна модель Ранца-Маршалла [139].

3.2.5 Результати чисельного моделювання

Нижче наведено результати чисельного моделювання газового потоку в соплі для холодного газодинамічного напилювання низького тиску СК-20 установки ДИМЕТ-405 та на виході з нього. В якості прикладів результатів розрахунків параметрів газового потоку на рисунку 3.5 показано контури швидкості (рисунок 3.5а) і температури (рисунок 3.5б) при температурі гальмування газу 893 К і тиску 0,9 МПа.



a



б

a – контур швидкості; *б* – контур температури

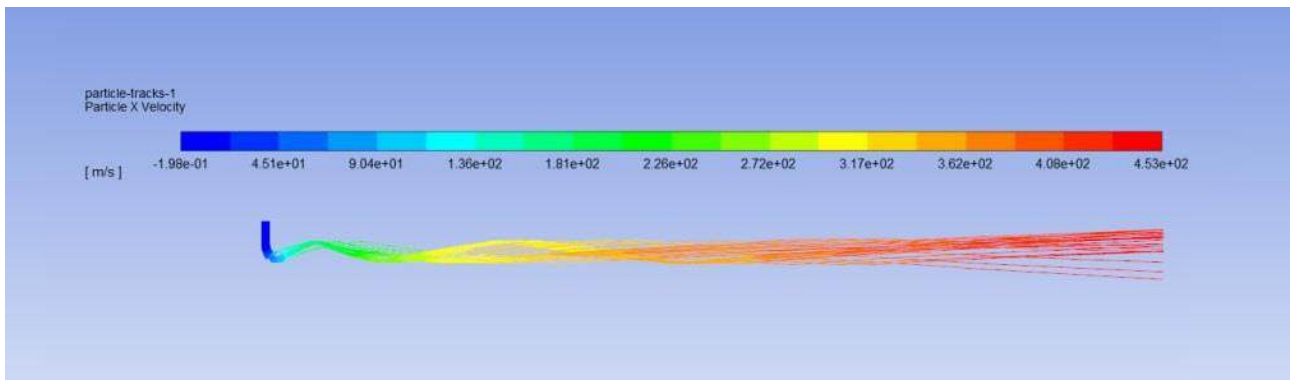
Рисунок 3.5 – Результати чисельного моделювання параметрів газу при

$$T_0 = 893 \text{ K і } P_0 = 0,9 \text{ МПа}$$

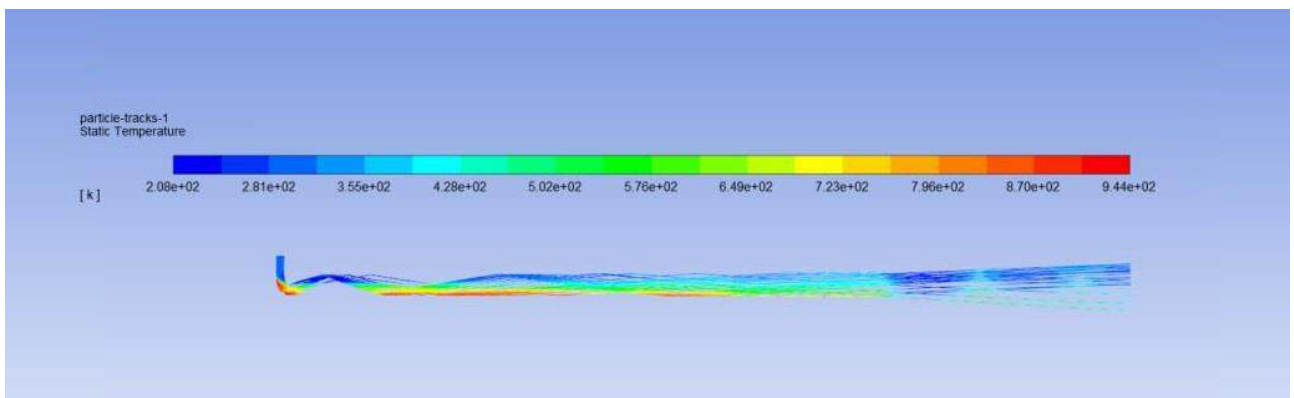
На наведених на рисунку 3.5 контурах чітко прослідковується вплив потоку, що ежектується через канал підводу частинок порошку, на фронт прискорення потоку в соплі, а також розподілу температур.

Також на рисунку 3.5 видно, що ступінчаста форма розширної частини сопла СК-20 ініціює виникнення серії стрибків ущільнення, що призводить до уповільнення газового потоку.

В якості прикладів на рисунках 3–5 представлено траєкторії руху інжекттованих частинок порошку нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм в соплі та на виході з нього та їх зміни швидкості та температури при температурі гальмування газу 893 К і тиску гальмування 0,9 МПа.



a

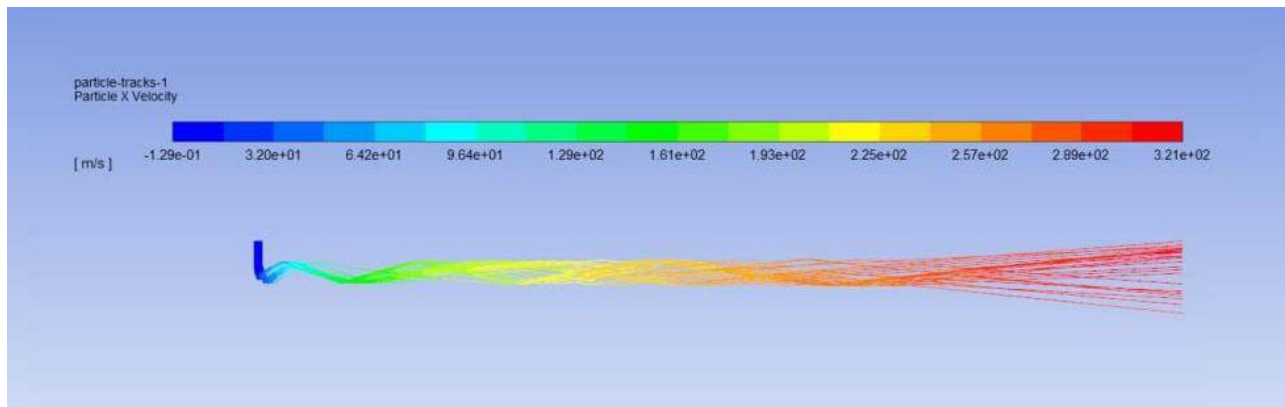


б

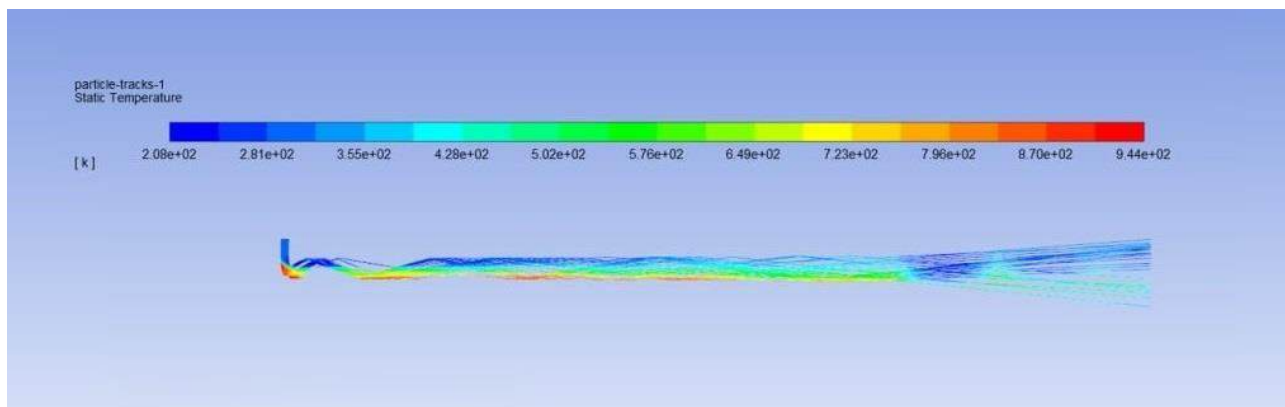
a – швидкість; *б* – температура

Рисунок 3.6 – Траєкторії руху та зміна швидкості та температури частинки нікелю діаметром 10 мкм при температурі гальмування газу $T_0 = 893$ К і тиску

$$P_0 = 0,9 \text{ МПа}$$



a



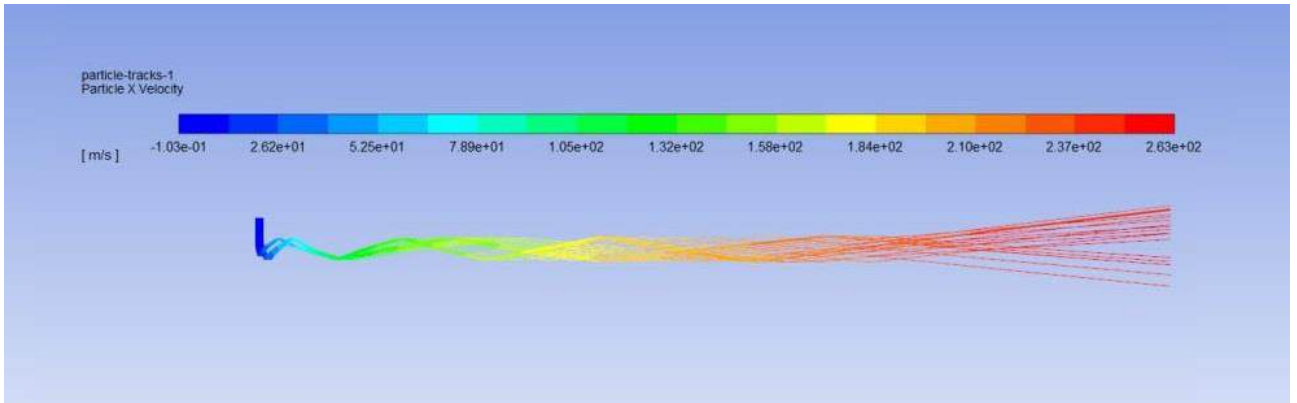
б

a – швидкість; *б* – температура

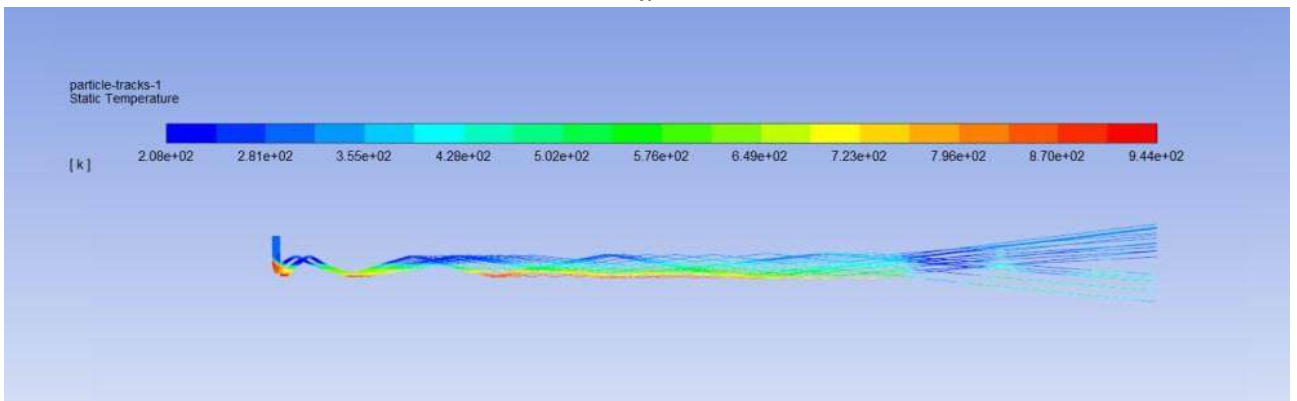
Рисунок 3.7 – Траєкторії руху, зміна швидкості та температури частинки нікелю діаметром 25 мкм при температурі гальмування газу $T_0 = 893$ К і тиску $P_0 = 0,9$ МПа

З рисунків 3.6–3.8 видно, що основна маса частинок рухається не суворо вздовж осі сопла. Оскільки на периферії потоку газ рухається повільніше, ніж в середині, то швидкість удару периферійних частинок нижча за розрахункові значення [157, 158].

На рисунках 3.9 і 3.10 подано закономірності зміни швидкості та температури частинок нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм при температурах гальмування 713 К, 793 К і 893 К і тиску 0,9 МПа.



a



б

a – швидкість; *б* – температура

Рисунок 3.8 – Траєкторії руху, зміна швидкості та температури частинки нікелю діаметром 40 мкм при температурі гальмування газу $T_0 = 893$ К і тиску $P_0 = 0,9$ МПа

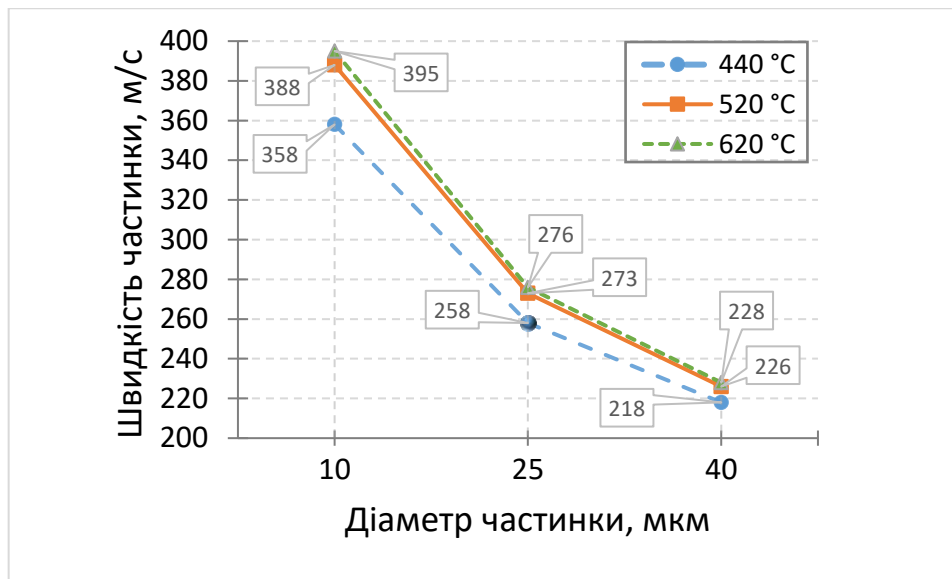


Рисунок 3.9 – Закономірності зміни швидкості частинки нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм при температурах гальмування 713 К, 793 К і 893 К і тиску 0,9 МПа.

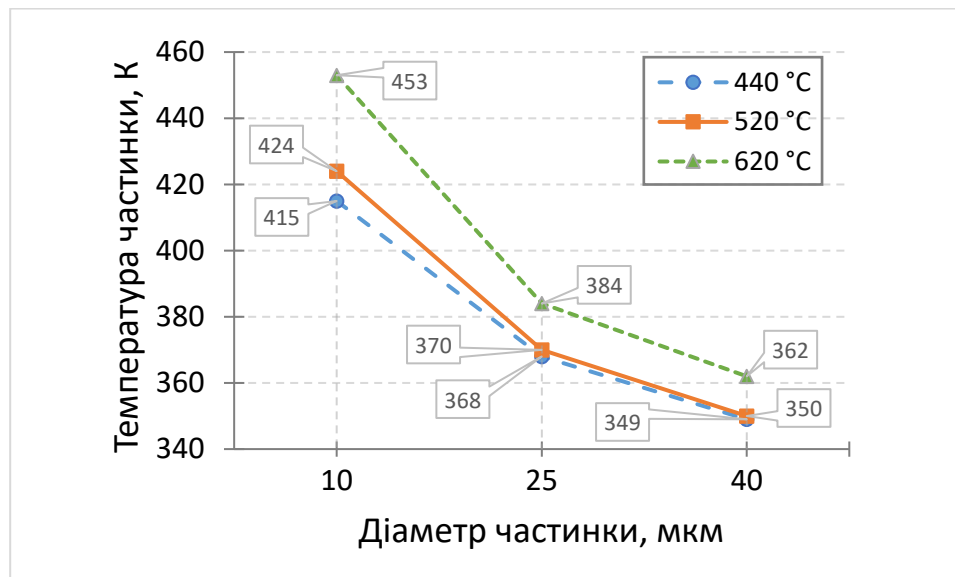


Рисунок 3.10 – Закономірності зміни температури частинок нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм при температурах гальмування 713 К, 793 К і 893 К і тиску 0,9 МПа.

При потраплянні частинок порошку в сопло спостерігається їх нагрівання та прискорення. Видно, що при збільшенні температури гальмування газу з 713 К до 893 К при постійному тиску гальмування 0,9 МПа швидкість частинок нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм на виході з сопла зростає з 358 м/с, 258 м/с і 218 м/с до 395 м/с, 276 м/с і 228 м/с відповідно [159]. При цьому спостерігається і зростання температури частинок з 415 К, 368 К і 349 К до 453 К, 384 К і 362 К відповідно. Зростання швидкості частинок порошку з підвищенням температури гальмування пов'язане з зростанням швидкості газового потоку.

Також за результатами чисельного моделювання отримано залежності швидкості та температури частинок порошку нікелю від їх діаметру. З рисунків 3.9 і 3.10 видно, що зі збільшенням діаметру частинок з 10 мкм до 40 мкм їх швидкість та температура на виході з сопла падає, що пов'язано із збільшенням їх маси та площі міделя.

3.3 Обговорення отриманих результатів

3.3.1 Порівняння результатів, отриманих за ізоентропійною моделлю та CFD-моделюванням

Параметри газу є функціями геометрії сопла, температури та тиску гальмування. Потік гальмується і прискорюється за рахунок зміни площі поперечного перетину сопла, що впливає на місцеве значення числа Маха. Швидкість частинок порошку, яка досягається в соплі для напилювання, обмежується швидкістю газу. Підвищення температури гальмування газу на вході в сопло при постійному тиску впливає на збільшення швидкості газового потоку в каналі сопла. Зв'язок швидкості газового потоку від його температури видно з рівняння (3.3). В свою чергу відповідно спостерігається зростання швидкості частинок порошку, що подаються в розширену частину сопла, незалежно від їх діаметру.

Беручи до уваги рівняння (3.18) можна також зробити висновок, що швидкість частинки не лише обмежена швидкістю газу, але й монотонно збільшується з часом знаходження її в потоці. Цим може бути обґрунтовано використання довгих сопел для холодного напилювання, оскільки з часом збільшується дистанція, яку пройшла частинка, а й, відповідно, її швидкість. Також варто зазначити, що оптимальні умови прискорення частинки визначаються умовою максимуму сили опору, тобто прискорення частинки залежить від густини газу – збільшується із зростанням останньої.

Що стосується діаметру частинок порошку, то в залежності від режимних параметрів газу і геометрії сопла існує оптимальний діаметр частинок, швидкість яких буде максимальною. Враховуючи той факт, що порошки характеризуються певним розподілом фракції з відомим середнім розміром частинок і середньоквадратичним відхиленням, то середні значення фракції мають відповідати оптимальному діаметру. В такому випадку може бути досягнуто максимальна ефективність напилювання порошку.

Порівнюючи отримані результати за аналітичною моделлю з результатами CFD-моделювання можна зробити висновок, що одномірна ізоентропійна модель дала істотно завищені значення швидкості частинок ($50 \pm 7\%$) і занижені температури ($22 \pm 7\%$) порівняно з результатами CFD-моделювання в ANSYS Fluent. Ці розбіжності пояснюються низкою припущень, що спрощують розрахунки, прийнятих в аналітичній моделі: одномірність та ізоентропійність течії потоку, відсутність взаємодії частинок з потоком, а також ідеальне розширення (тобто повне перетворення теплової енергії і кінетичну). Одномірність моделі передбачає виключно осьовий напрямок потоку без поперечних компонентів швидкості вздовж вісі сопла, а під ізоентропійністю розуміємо, що модель не враховує теплові втрати, в'язкість, теплопровідність, тертя, турбулентність та вихрі, що суттєво впливають на реальність течії.

На відміну від ізоентропійної моделі, CFD-модель враховує реальні фізичні процеси (це і теплообмін, в'язкість газу, інерція частинок, і тривимірна структура течії), що робить її результати більш наближеними до дійсності. Цим може бути пояснена суттєва відмінність в значеннях швидкості і температури частинок: в'язкість газу та примежовий шар на стінках сопла гальмують потік, турбулентність – це додаткова втрата енергії, теплообмін між потоком та стінками сопла, вплив геометрії сопла з появою локальних збуджень потоку тощо. Додатково, CFD-моделювання дозволяє дослідити двофазний характер потоку, що враховує теплообмін між газом і частинками. В ізоентропійній моделі часто передбачається, що частки ідеально йдуть за потоком (zero slip assumption), тобто. відразу ж розганяються до швидкості газу. У CFD-моделюванні враховується інерція частинок: вони миттєво адаптуються до швидкості газу, якщо вони досить важкі. Аналогічно з температурою – теплообмін між частинками та газом у CFD-моделюванні розраховується детально, а у спрощеній моделі часто приймається приблизно або ігнорується.

Вартує уваги також та умова, що параметри на виході із сопла не дорівнюють умовам в ідеальному вихідному перерізі. В ізоентропійній моделі вважається, що потік ідеально розширюється до розрахункового тиску.

Насправді може бути пере- або недорозширення, особливо якщо вихідний тиск не ідеально узгоджений з тиском навколишнього середовища.

Особливо важливим в поясненні суттєвих відмінностей в отриманих результатах CFD-моделювання та розрахунків з використанням аналітичної моделі, є наявність вторинної течії потоку, що подається з атмосфери разом з частинками порошку в основний потік в розширну частину сопла за критичним перерізом. В ізоентропійній моделі це не враховується, а для визначення температурно-швидкісних параметрів частинки задається координата на вісі сопла у місці введення порошку. Подача порошку в процесі напилювання відбувається без підігріву транспортуючого потоку за рахунок ежекції з порошкового живильника відкритого типу, тобто температура та тиск повітря відповідають значенням навколишнього середовища (нормальні умови) (див. рисунок 2.7б).

Наявність такого вторинного потоку в надзвукових соплах для холодного газодинамічного напилювання низького тиску, виконаних за ежекторною схемою (з подачею порошку в розширну частину сопла), впливає на характеристики основного потоку. Цей потік, що має температуру та тиск навколишнього середовища, порушує ізоентропійний характер течії, знижує температуру та швидкість основного газу за рахунок охолодження та турбулентного змішування, а також створює додаткові збурення та втрати енергії. В результаті параметри потоку та рух частинок поблизу вихідного перерізу сопла істотно відрізняються від передбачених одновимірною моделлю, що пояснює нижчі значення швидкості та підвищені температури, отримані при CFD-моделюванні.

3.3.2 Валідація результатів CFD-моделювання

Валідацію отриманих результатів чисельного моделювання виконано шляхом відтворення розрахункових умов, раніше представленої в рецензованих наукових публікаціях інших авторів в авторитетному періодичному виданні.

Всебічна валідація CFD-моделі та ґрунтовний аналіз результатів моделювання показана в роботі Nastic і Jodoін [116]. Автори статті виконували чисельне моделювання течії газу з частинками в соплі для холодного газодинамічного напилування, та порівнювали отримані результати з експериментальними дослідженнями швидкості та температури частинок, які показали високу точність та достовірність застосованих підходів. Експериментальні дослідження було виконано з використанням високошвидкісної високочутливої інфрачервоної (ІЧ) камери при різних параметрах гальмування газу з метою оцінки придатності та точності кореляцій для числа Нуссельта та коефіцієнта аеродинамічного опору, які широко застосовуються в моделюванні газодинаміки процесу ХГН. Значення швидкості частинок отримано на основі обробки відеоданих з ІЧ-камери за допомогою методів аналізу слідів і трекінгу частинок. Крім того, авторами додатково було досліджено параметри частинок, виміряні за допомогою приладу Cold Spray Meter (CSM) eVolution (Tecnar Automation Ltd., Сен-Бруно-де-Монтарвіль, Канада) [160]. Було встановлено, що лише одна з поширених кореляцій для числа Нуссельта, які зазвичай використовуються в моделюванні ХГН, забезпечує точне передбачення температури частинок. Дослідження також показує, що для адекватного прогнозування швидкості частинок у кореляцію коефіцієнта опору необхідно включати число Маха частинки.

В цьому дисертаційному дослідженні було відтворено розрахункові умови з вищезазначених публікацій: геометрію сопла, граничні умови, а також фізичні властивості газу та частинок. На рисунку 3.11 наведено порівняння результатів моделювання авторів роботи [116] (червоні точки), власних повторних моделювань здобувача (зелені точки) та експериментальних досліджень авторів роботи [116], де PSV (Particle streak velocimetry) – вимірювання швидкості частинок за слідами (стрічкове візуалізаційне вимірювання швидкості частинок); PTV (Particle tracking velocimetry) – відстеження швидкості частинок (візуалізаційне відстеження траєкторії частинок) і CSM (Cold Spray Meter) – вимірювальний прилад для холодного напилування [160].

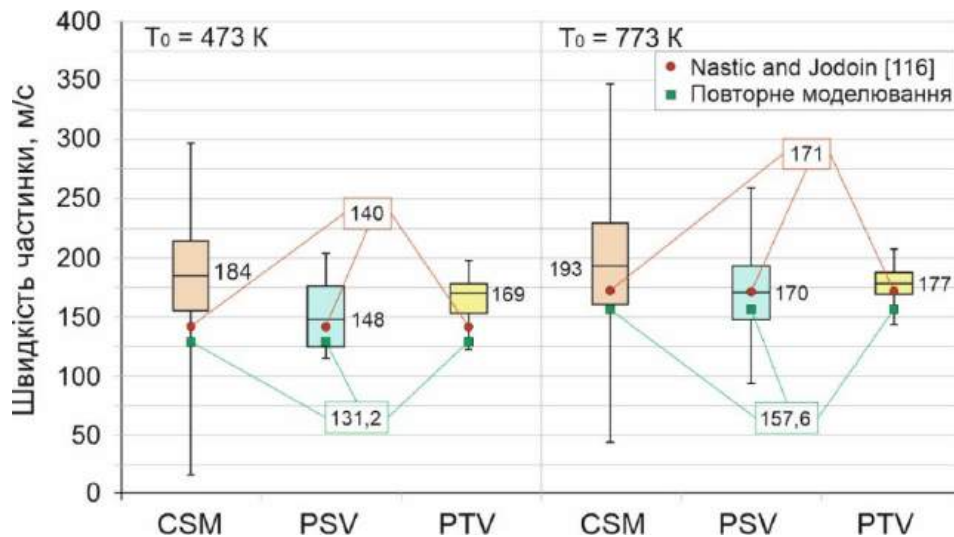


Рисунок 3.11 – Результати повторних моделювань та їх порівняння з оригінальними даними.

Повторне моделювання в ANSYS Fluent показало співпадіння отриманих результатів швидкості частинок як з результатами CFD-моделювання та експериментальними даними, показаними в роботі [116] (рисунок 3.11). Результати, подані на рисунку 3.11 підтверджують коректність використаності чисельної моделі, а також обраних фізичних і розрахункових параметрів. Базуючись на цьому зроблено висновок, що застосована CFD-модель адекватно описує течію газу та поведінку частинок в потоці, та може бути використана для розрахунків в межах розглянутої задачі.

3.4 Висновки до розділу 3

1. Побудовано графіки зміни температури та швидкості частинки порошку нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм від температури газу на вході в сопло установки ХГН низького тиску ДИМЕТ-405, значення якої становили 713 К, 793 К і 893 К при постійному тиску 0,9 МПа, в каналі сопла та на виході з нього за допомогою одновимірної ізоентропійної газодинамічної моделі. Показано, що зі збільшенням робочої температури газу швидкість і температура частинок нікелю зростають, при цьому частинки меншого діаметру (10 мкм) мають більші значення цих параметрів в порівнянні з частинками більшого діаметру (40 мкм).

2. Виконано чисельне моделювання газодинаміки двофазного потоку в надзвуковому соплі для холодного газодинамічного напилювання низького тиску установки ДИМЕТ-405, виконаного за ежекторною схемою. Отримано поля швидкостей та температури газу в соплі та на виході з нього при різних значеннях температури газу на вході в сопло – 713 К, 793 К і 893 К . Досліджено вплив температури газу на швидкість та температуру частинок порошку нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм в цьому потоці. Отримано траєкторії руху інжекттованих частинок в каналі сопла та на виході з нього.

3. Порівняння результатів за аналітичною моделлю та результатів CFD-моделювання показало, що одномірний ізентропійний модель дала істотно завищені значення швидкості частинок ($50 \pm 7\%$) і занижені температури ($22 \pm 7\%$). Ці розбіжності пояснюються низкою припущень, що спрощують розрахунки, прийнятих в аналітичній моделі: одномірність та ізентропійність течії потоку, відсутність взаємодії частинок з потоком, а також ідеальне розширення. На відміну від ізентропійної моделі, CFD-модель враховує реальні фізичні процеси (теплообмін, в'язкість газу, інерція частинок, і тривимірний структура течії тощо), що робить її результати більш наближеними до дійсності. Також в CFD-моделюванні враховано вплив на температурно-швидкісні параметри потоку в соплі вторинної течії потоку, що подається з атмосфери разом з частинками порошку в основний потік в розширну частину сопла за критичним перерізом.

4. Валідація отриманих результатів чисельного моделювання виконана шляхом відтворення розрахункових умов, раніше представлених в рецензованих наукових публікаціях інших авторів, перевірених експериментальним шляхом. Відтворені результати дозволили зробити висновок, що CFD-модель адекватно описує течію газу та поведінку частинок в потоці, та може бути використана для розрахунків в межах розглянутої задачі.

5. Для напилювання нікелевих покриттів холодним газодинамічним напилюванням низького тиску з використанням досліджуваного сопла для забезпечення максимальної швидкості частинок порошку на виході з сопла, рекомендовано при тиску гальмування газу 0,9 МПа обирати максимальний температурний режим роботи, при якому температура газу на вході в сопло становить 893 К та діаметр частинок порошку від 10 мкм до 25 мкм.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРИТТІВ

Одними з основних характеристик якості газотермічних покриттів, зокрема і холодного газодинамічного напилювання, що визначають можливість використання виробів з покриттями, їх механічне оброблення, а також економічність процесу, є адгезійна міцність і ефективність напилювання (коефіцієнт використання порошку).

Для дослідження багатофакторних систем найбільш доцільним є використання статистичних методів планування експерименту, які дозволяють при мінімальній кількості дослідів отримати моделі багатофакторних процесів [161–163].

Для розроблення технології відновлення зношених поверхонь необхідно виконати пошук оптимальних параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання, а саме температури газу на вхід в сопло, дистанції напилювання і витрати порошку, які в значній мірі впливають на вихідні характеристики процесу – адгезійну міцність і коефіцієнт використання порошку. В цьому розділі наведено результати досліджень з визначення такої комбінації вищезазначених параметрів, які дозволять отримати максимальні значення адгезійної міцності при максимальному коефіцієнті використання метал-керамічної композиційної порошкової суміші Ni + Al₂O₃. Також наведено результати з дослідження впливу температури газу на вході в сопло на мікротвердість та мікроструктуру покриттів.

4.1 Планування багатофакторного експерименту

Експериментальні дослідження проводять в багатьох областях науки та техніки. Метою таких експериментів є або встановлення нових фактів про об'єкт дослідження, або порівняння впливу різних умов на досліджуваний процес. Переважну кількість досліджень проводять з метою встановлення за допомогою

експерименту функціональних або статистичних зв'язків між декількома величинами або для вирішення екстремальних задач. Класичний метод постановки експерименту передбачає фіксування на прийнятих рівнях усіх змінних факторів, крім одного, значення якого певним чином змінюють в обраному діапазоні. Цей метод є основою однофакторного експерименту [164].

Однофакторні експерименти мають місце при дослідженні процесу холодного напилювання, коли дослідника цікавить залежність шуканої величини лише від одного фактору. Використання однофакторного експерименту для дослідження багатфакторних процесів потребує проведення дуже великої кількості дослідів. Їх проведення потребує матеріальних ресурсів та часу, на протязі якого вплив неконтрольованих факторів на результати дослідів може суттєво змінитися. Тому дані численних дослідів виходять неспівставні. Звідси можна зробити висновок, що результати однофакторних експериментів, отримані при дослідженні багатфакторних систем, часто малоприматні для практичного застосування. Окрім того, при вирішенні екстремальних задач дані великої кількості дослідів виявляються зайвими, оскільки є отриманими для області, далекої від оптимума.

Для дослідження багатфакторних систем найбільш доцільним є використання статистичних методів планування експерименту. Під плануванням експерименту розуміють процес визначення кількості та умов проведення дослідів, необхідних і достатніх для вирішення поставленої задачі з достатньою точністю. Статистичні методи планування експерименту дозволяють при мінімальній кількості дослідів отримати моделі багатфакторних процесів.

Методологія поверхні відгуку – це поєднання математичних і статистичних методів, які використовуються для аналізу задач, в яких декілька незалежних змінних (x_1, x_2, \dots, x_n) впливають на залежну змінну або відгук (y), а метою дослідження є оптимізація цього відгуку [164]. У більшості випадків при дослідженні поверхні відгуку вид залежності між змінними та відгуком невідомий. Проте відомо, що процес холодного газодинамічного напилювання характеризується нелінійним зв'язком між вхідними незалежними змінними та

відгуком, тому поліном першого порядку буде описувати процес неадекватно. В такому випадку коли в системі спостерігається кривина, потрібно використовувати поліном другого або вищого порядку. RSM широко використовується в промисловості для вирішення практичних завдань зі встановлення функціональних залежностей між відгуком та незалежними змінними, підвищення якості продукції, оптимізації режимів роботи тощо [165].

Поверхня відгуку апроксимується найбільш ефективним чином, якщо ретельно підійти до питання вибору плану експерименту. Для того, щоб при виборі моделі другого порядку можна було оцінити її параметри, план експерименту має містити щонайменше три рівні кожного фактору. Центральний композиційний план є найбільш поширений при побудові моделей другого порядку [166]. Він дозволяє в дослідженнях спочатку спробувати побудувати лінійну модель, а після за необхідності, додав спостереження, перейти до моделей другого порядку, використовуючи раніше отримані результати.

4.1.1 Вибір незалежних змінних процесу напилювання

Першим етапом при плануванні експерименту є визначення параметрів процесу (незалежні змінні або фактори), що найбільше впливають на характеристики покриттів. Добре відомо, що якість та ефективність напилювання покриттів залежать від великої кількості робочих параметрів та їх комплексному впливу. За результатами літературного аналізу та попередніх досліджень, проведених в нашій лабораторії, головними параметрами процесу холодного газодинамічного напилювання, від яких в значній мірі залежать адгезійна міцність і ефективність напилювання покриттів (змінні відгуку), є початкові температура газу на вході в сопло, витрата порошку, а також дистанція напилювання. Ці параметри впливають на нагрівання та прискорення частинок, їх розплющування при зіткненні з підкладкою, і, як наслідок, забезпечують їх зчеплення з останньою з формуванням певного комплексу фізико-механічних характеристик.

4.1.2 Визначення рівнів та інтервалів варіювання незалежних змінних

Вирішення задачі оптимізації починається з вибору області експерименту. Вибір цієї області проводиться на основі аналізу апіорної інформації. В області експерименту визначають основні рівні та інтервали їх варіювання. Основним або нульовим рівнем фактору є його значення, прийняте за вихідне в плані експерименту. Вибір основних рівнів виконується таким чином, щоб їх поєднання відповідало значенню параметра оптимізації, за можливістю більш близького до оптимального. Кожне поєднання рівнів факторів є багатомірною точкою в факторному просторі. Для визначення верхнього і нижнього рівня для кожного фактору було обрано інтервал варіювання фактору, симетричний відносно основного рівня.

В таблиці 4.1 представлено параметри процесу ХГН та їх рівні.

Таблиця 4.1 – Змінні фактори та рівні їх варіювання.

Змінні	Позначення	Одиниці вимірювання	Рівень		
			-1	0	+1
Фактор А: Температура	T_0	°C	450	500	550
Фактор В: Витрата порошку	G_p	г/с	0.2	0.5	0.8
Фактор С: Дистанція напилювання	S	мм	5.0	10.0	15.0

4.1.3 Розроблення матриці експерименту

В цьому дослідженні відгуки є функціями від початкових температури газу на вході в сопло $T_0(x_1)$, витрати порошку $G_p(x_2)$, і дистанції напилювання $S(x_3)$, та можуть бути представлені у вигляді

$$\text{Відгук} = f(T_0, G_p, S). \quad (4.1)$$

Використано три рівні для досліджуваних параметрів: низький (-1), середній (0), та високий (+1). Поліном другого порядку застосовується для опису залежностей в методології поверхні відгуку та прогнозування параметру

оптимізації від вхідних параметрів. Для експерименту з трьома вхідними параметрами (x_1, x_2, x_3) рівняння регресії має вигляд

$$y(x_1; x_2; x_3) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \\ + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2, \quad (4.2)$$

де β_0 – постійна;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – коефіцієнти змінних $x_1, x_2, i x_3$ відповідно;

$\beta_{11}, \beta_{12}, \beta_{13}$ – коефіцієнти квадратів змінних $x_1, x_2, i x_3$ відповідно;

$\beta_{21}, \beta_{22}, \beta_{23}$ – коефіцієнти взаємодії змінних $x_1, x_2, i x_3$ відповідно.

З урахуванням досліджуваних параметрів, можна замінити змінні $x_1, x_2, i x_3$, а рівняння (4.2) записати як

$$y = \beta_0 + \beta_1(T_0) + \beta_2(G_p) + \beta_3(S) + \beta_{12}(T_0 G_p) + \beta_{13}(T_0 S) + \beta_{23}(S G_p) + \\ + \beta_{11}(T_0^2) + \beta_{22}(G_p^2) + \beta_{33}(S^2). \quad (4.3)$$

Як видно з рівняння, модель включає в себе вплив основних факторів та їх взаємодії. В дослідженні при плануванні експерименту використано центральний композиційний план (ЦКП). В такому плані для трьох факторів до повного факторного експерименту 2^3 додають 6 «зіркових» точок з координатами $(+\alpha; 0; 0), (-\alpha; 0; 0), (0; +\alpha; 0), (0; -\alpha; 0), (0; 0; +\alpha), i (0; 0; -\alpha)$, і деяке число n_0 точок в центрі плану. Величина «зіркового» плеча $\alpha = 1$ (центральний композиційний план з центрами на гранях), а кількість паралельних дослідів в центрі плану $n = 6$ (рисунок 4.1) [166]. Таким чином, загальна кількість дослідів становить 20, що є достатнім для оцінки лінійного, квадратичного, а також двофакторного впливу змінних параметрів на цільові функції.

В таблиці 4.2 показано матрицю планування, що складається з 20 експериментів з закодованими та початковими значеннями. Статистичне планування експерименту дозволить отримати необхідні дані, застосувати для їх аналізу статистичні методи і зробити правильні і об'єктивні висновки.

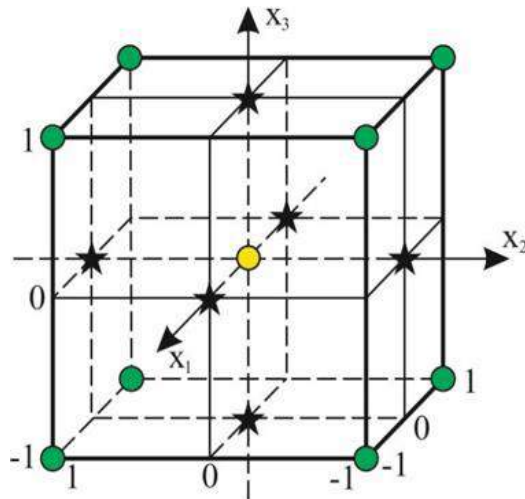


Рисунок 4.1 – Центральний композиційний план з центрами на гранях.

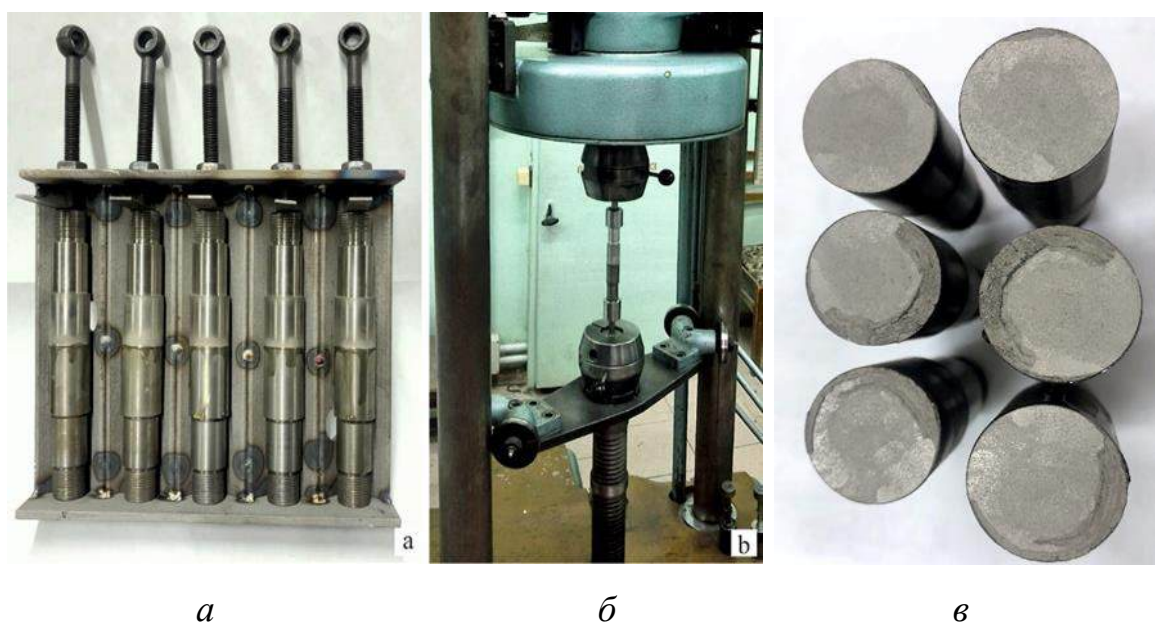
Таблиця 4.2 – Матриця планування та результати експериментів.

Точки на плані	№ п/п.	№ експ.	Дійсні значення			Закодовані значення			Відгук	
			T_0	G_p	S	T_0 (°C)	G_p (г/с)	S (мм)	Адгезійна міцність (МПа)	Коефіцієнт використання порошку (%)
План 2^3	1	5	-1	-1	-1	450	0,2	5	9,1	14,1
	2	2	+1	-1	-1	550	0,2	5	26,0	17,9
	3	3	-1	+1	-1	450	0,8	5	12,3	19,9
	4	1	+1	+1	-1	550	0,8	5	28,6	23,3
	5	17	-1	-1	+1	450	0,2	15	16,1	17,5
	6	18	+1	-1	+1	550	0,2	15	30,2	24,9
	7	8	-1	+1	+1	450	0,8	15	17,1	21,0
	8	13	+1	+1	+1	550	0,8	15	31,5	27,7
«Зіркові» точки	9	12	-1	0	0	450	0,5	10	22,9	22,5
	10	19	+1	0	0	550	0,5	10	34,3	28,1
	11	20	0	-1	0	500	0,2	10	29,1	20,7
	12	4	0	+1	0	500	0,8	10	32,9	27,3
	13	16	0	0	-1	500	0,5	5	27,3	20,0
	14	10	0	0	+1	500	0,5	15	30,9	24,4
Нульові точки	15	9	0	0	0	500	0,5	10	32,0	25,5
	16	15	0	0	0	500	0,5	10	31,4	24,0
	17	14	0	0	0	500	0,5	10	33,1	26,2
	18	11	0	0	0	500	0,5	10	32,5	25,6
	19	7	0	0	0	500	0,5	10	32,0	25,1
	20	6	0	0	0	500	0,5	10	32,4	26,1

4.1.4 Проведення експериментів

Після вибору плану експерименту, основних рівнів та інтервалів варіювання факторів було проведено експеримент. Кожний рядок матриці (див. таблицю 4.2) є режимами напилювання для окремого досліду. Відповідно до плану експерименту було напилено покриття по три зразки для кожної комбінації режимів напилювання з подальшим визначенням середнього значення параметру відгуку. Експерименти проводилися в довільному порядку для запобігання виникнення систематичної похибки експерименту (порядок проведення дослідів показано у другому стовпці таблиці 4.2) [167]. Параметри процесу холодного напилювання, що не змінювалися впродовж проведення всіх дослідів, наступні: швидкість сканування – 20 мм/с; тиск повітря на вході в сопло – 0,9 МПа; кількість проходів при визначені коефіцієнту використання порошку становила 2 рази.

Фотографії процесу дослідження адгезійної міцності покриттів показано на рисунку 4.2.



a – процес склеювання зразків; *б* – закріплення в розривній машині; *в* – зразки після розривання

Рисунок 4.2 – Фотографії процесу дослідження адгезійної міцності покриттів.

Процес зважування зразків до та після напилювання показано на рисунку 4.3.



a

б

a – зважування зразка до напилювання покриття; *б* – зважування зразка з покриттям після напилювання

Рисунок 4.3 – Зважування зразків для визначення коефіцієнту використання порошку.

4.1.5 Отримання емпіричних залежностей

Покриття з порошку $Ni + Al_2O_3$ відповідно до розробленого плану експерименту було напилено на підготовлені зразки з титанового сплаву ВТ9 з використанням установки холодного газодинамічного напилювання низького тиску ДИМЕТ-405. Результати розрахунків адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку наведено в таблиці 4.2.

Розрахунок коефіцієнтів регресії виконано в програмному пакеті для оброблення статистичних даних Stat-Ease 360. Значущість кожного з коефіцієнтів оцінено за допомогою параметричного *t*-критерію Стьюдента та *p*-значень, наведених в таблицях 4.3 і 4.4.

Модель *F*-величини становить 242,39, що вказує на її значущість. Імовірність того, що таке велике значення *F*-величини може виникнути через шум, становить лише 0,01 %. *P*-величина менше 0,05, що вказує на значущість

Таблиця 4.3 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) експериментальних даних для адгезійної міцності покриттів.

Параметр	Сума квадратів	Ступінь свободи	Середнє квадратичне	<i>F</i> -величина	<i>p</i> -величина	Примітки
Модель	3,481E+05	6	3,481E+05	242,39	<0,0001	значущій
А-Температура	1,705E+05	1	1,705E+05	712,38	<0,0001	--
В-Витрата порошку	4794,86	1	4794,86	20,03	<0,0001	--
С-Дистанція	14324,58	1	14324,58	59,85	<0,0001	--
A ²	19727,39	1	19727,39	82,43	<0,0001	--
B ²	4259,57	1	4259,57	17,80	<0,0001	--
C ²	18544,65	1	18544,65	77,49	<0,0001	--
Залишок (Residual)	3111,22	13	239,32	–	–	–
Невідповідність (Lack of Fit)	2183,69	8	272,96	1,47	0,3484	не значущій
Чиста похибка (Pure Error)	927,53	5	185,51	–	–	–
Сума	3,512E+05	19	–	–	–	–

показників моделі. Для адгезійної міцності покриття видно, що *A*, *B*, *C*, *A*², *B*², *C*² є значущими показниками моделі. Значення, що перевищують 0,1000, означають, що показники моделі не є значущими, і вони не були включені до моделі.

Значення невідповідності *F*-величини становить 1,47 і означає, що цей показник не є значущим відносно чистої похибки. Існує 34,84 % ймовірності того, що таке велике значення невідповідності *F*-величини може статися через шум. Не значущість невідповідності є позитивним сигналом для оцінки моделі.

Модель *F*-величини становить 126,99, що вказує на її значущість. Імовірність того, що таке велике значення *F*-величини може виникнути через шум, становить лише 0,01 %. *P*-величина менше 0,05, що вказує на значущість показників моделі. Для адгезійної міцності покриття видно, що *A*, *B*, *C*, *AB*, *AC*, *BC*, *B*², *C*² є значущими показниками моделі. Значення, що перевищують 0,1, означають, що показники моделі не є значущими, і вони не були включені до моделі.

Таблиця 4.4 – Результати дисперсійного аналізу (ANOVA) експериментальних даних для коефіцієнту використання порошку.

Параметр	Сума квадратів	Ступінь свободи	Середнє квадратичне	F-величина	p-величина	Примітки
Модель	0,0056	8	0,0007	126,99	<0,0001	значущій
А-Температура	0,0014	1	0,0014	255,82	<0,0001	--
В-Витрата порошку	0,0013	1	0,0013	234,52	<0,0001	--
С-Дистанція	0,0009	1	0,0009	158,65	<0,0001	--
AB	0,0000	1	0,0000	8,13	0,0157	--
AC	0,0000	1	0,0000	7,96	0,0166	--
BC	0,0001	1	0,0001	25,92	0,0003	--
B ²	0,0002	1	0,0002	29,63	0,0002	--
C ²	0,0006	1	0,0006	109,88	<0,0001	--
Залишок (Residual)	0,0001	11	5,549E-06	–	–	–
Невідповідність (Lack of Fit)	0,0000	6	3,321E-06	0,4038	0,8498	не значущій
Чиста похибка (Pure Error)	0,0000	5	8,223E-06	–	–	–
Сума	0,0057	19	–	–	–	–

Значення невідповідності F -величини становить 0,4 і означає, що цей показник не є значущим відносно чистої похибки. Існує 84,98 % ймовірності того, що таке велике значення невідповідності F -величини може статися через шум. Не значущість невідповідності є позитивним сигналом для оцінки моделі.

Після визначення значущих величин (при рівні достовірності 95 %), були отримані емпіричні залежності для прогнозування адгезійної міцності і ефективності напилювання.

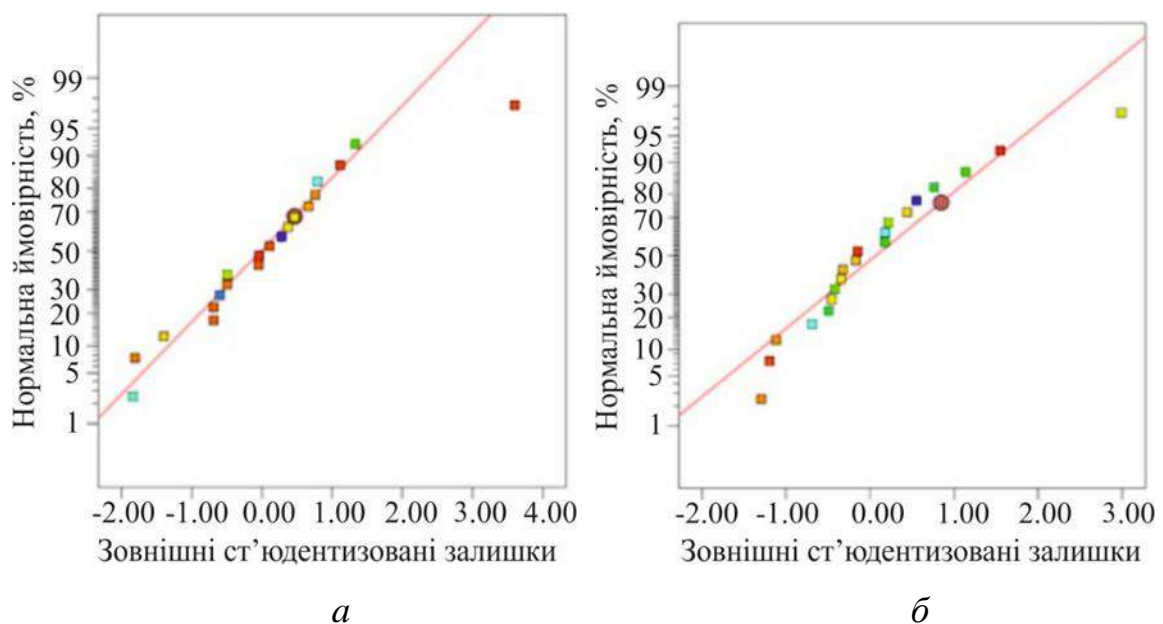
Для адгезійної міцності покриттів:

$$\begin{aligned} \text{Адгезія}^{1,75} \text{ (МПа)} = & -9884,692 + 36,49(T_0) + 510,285(G_p) + 73,265(S) - \\ & -0,034(T_0)^2 - 437,295(G_p)^2 - 3,285(S)^2. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Для коефіцієнту використання порошку:

$$\frac{1}{\sqrt{(KBП+1,9)}} (\%) = 0,4302 - 0,0002(T_0) - 0,2251(G_p) - 0,0096(S) + 0,0001(T_0G_p) - 9,3992E-06(T_0S) + 0,0029(G_pS) + 0,0796(G_p)^2 + 0,0006(S)^2 \quad (4.5)$$

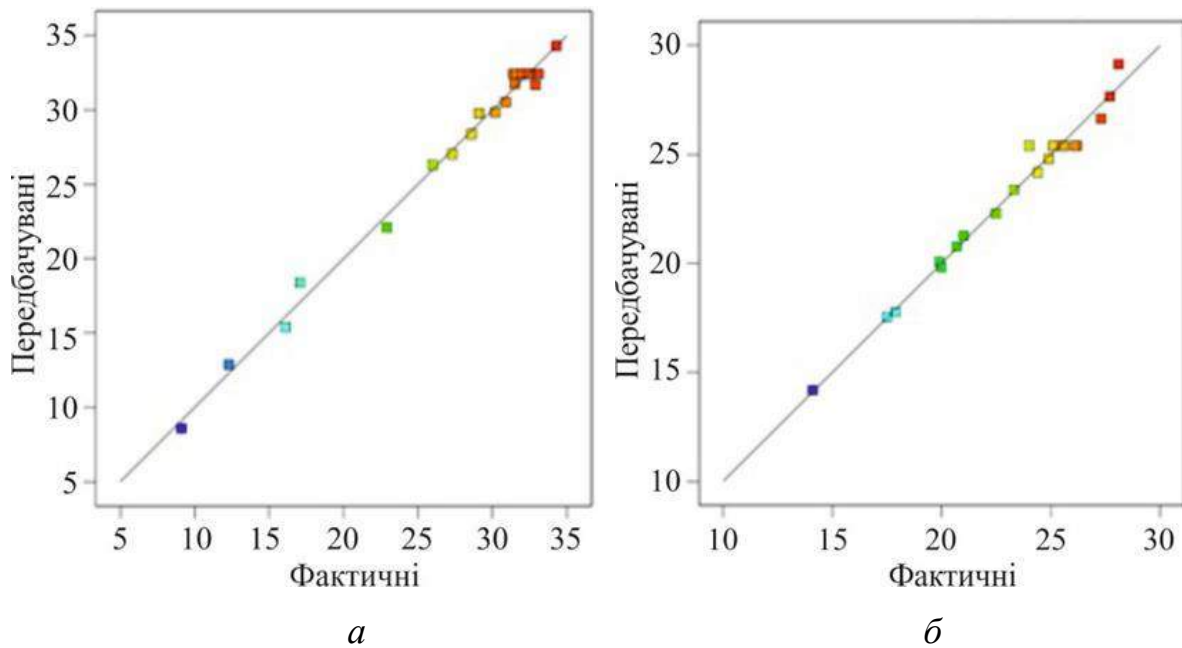
Значення коефіцієнту детермінації R^2 для адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку склали 0,9911 і 0,9893 відповідно. Це означає, що 99,11% і 98,93% експериментальних результатів описуються вищенаведеними емпіричними рівняннями (4.4) і (4.5) відповідно. Значення R^2 прагне до 1,0, що означає високу точність отриманих моделей. Графіки нормальної вірогідності для досліджуваних відгуків показані на рисунку 4.4. З графіків видно, що залишки регресії для адгезійної міцності покриттів та коефіцієнту використання порошку припадають на пряму лінію, що означає нормальний розподіл похибок [167].



а – для адгезійної міцності; *б* – для коефіцієнту використання порошку

Рисунок 4.4 – Графік нормальної ймовірності.

Діаграми розсіювання експериментальних та розрахункових даних показані на рисунку 4.5.



а – для адгезійної міцності; *б* – для коефіцієнту використання порошку

Рисунок 4.5 – Діаграма розсіювання.

З графіку видно, що фактичні та розрахункові результати як для адгезійної міцності, так і ефективності напилювання, мають тісний взаємозв'язок. Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що розроблені емпіричні залежності можуть бути використанні для прогнозування адгезійної міцності та ефективності напилювання покриттів від температури газу на вході в сопло, витрати порошку, а також дистанції напилювання в досліджуваних діапазонах значень.

4.2 Аналіз впливу досліджуваних параметрів процесу на адгезійну міцність і коефіцієнт використання порошку

Використовуючи отримані рівняння (4.4) і (4.5) були побудовані тривимірні графіки залежності адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку нікелевих покриттів з порошкової суміші Ni + Al₂O₃ в залежності від температури газу на вході в сопло, витрати порошку, а також дистанції напилювання, в досліджуваних діапазонах значень (див. таблицю 4.1), які

показано на рисунках 4.6 і 4.7. Для полегшення візуального пошуку оптимальних значень відгуку наведено контурні діаграми. За допомогою отриманих діаграм можна визначити значення цільової функції (адгезійної міцності і коефіцієнту використання порошку) в будь-якій точці в межах заданих вхідних параметрах [167].

Як видно з рисунку 4.6, температура газу на вході в сопло має найбільший вплив на значення адгезійної міцності покриттів. З аналізу рисунку 4.6 і таблиці 4.2 спостерігається суттєве зростання адгезійної міцності покриття $Ni + Al_2O_3$ при збільшенні температури газу з $450\text{ }^\circ\text{C}$ до $550\text{ }^\circ\text{C}$.

Із зростанням температури газу на вході в сопло зростає швидкість газового потоку в каналі цього сопла, що безпосередньо впливає на швидкість частинок в потоці. Зв'язок швидкості газового потоку від його температури видно з рівняння (3.3) [139, 168].

Окрім того, спостерігається не лише збільшення швидкості частинок, а й їх температури. Обидва фактори – збільшення швидкості і температури зіткнення частинки з підкладкою – в значній мірі впливають на зростання адгезійної міцності покриття. Вплив температури частинок на адгезію можна пояснити їх більшою інтенсивністю деформації при зіткненні з підкладкою через температурне розм'якшення. Відомо, що між температурою частинок в момент зіткнення з підкладкою і критичною швидкістю напилювання існує певна залежність – зменшення останньої з підвищенням температури частинок [97]:

$$V_{crit} = 667 - 14\rho + 0,08T_m + 0,1\sigma_{UTS} - 0,4T_{pi} \quad (4.6)$$

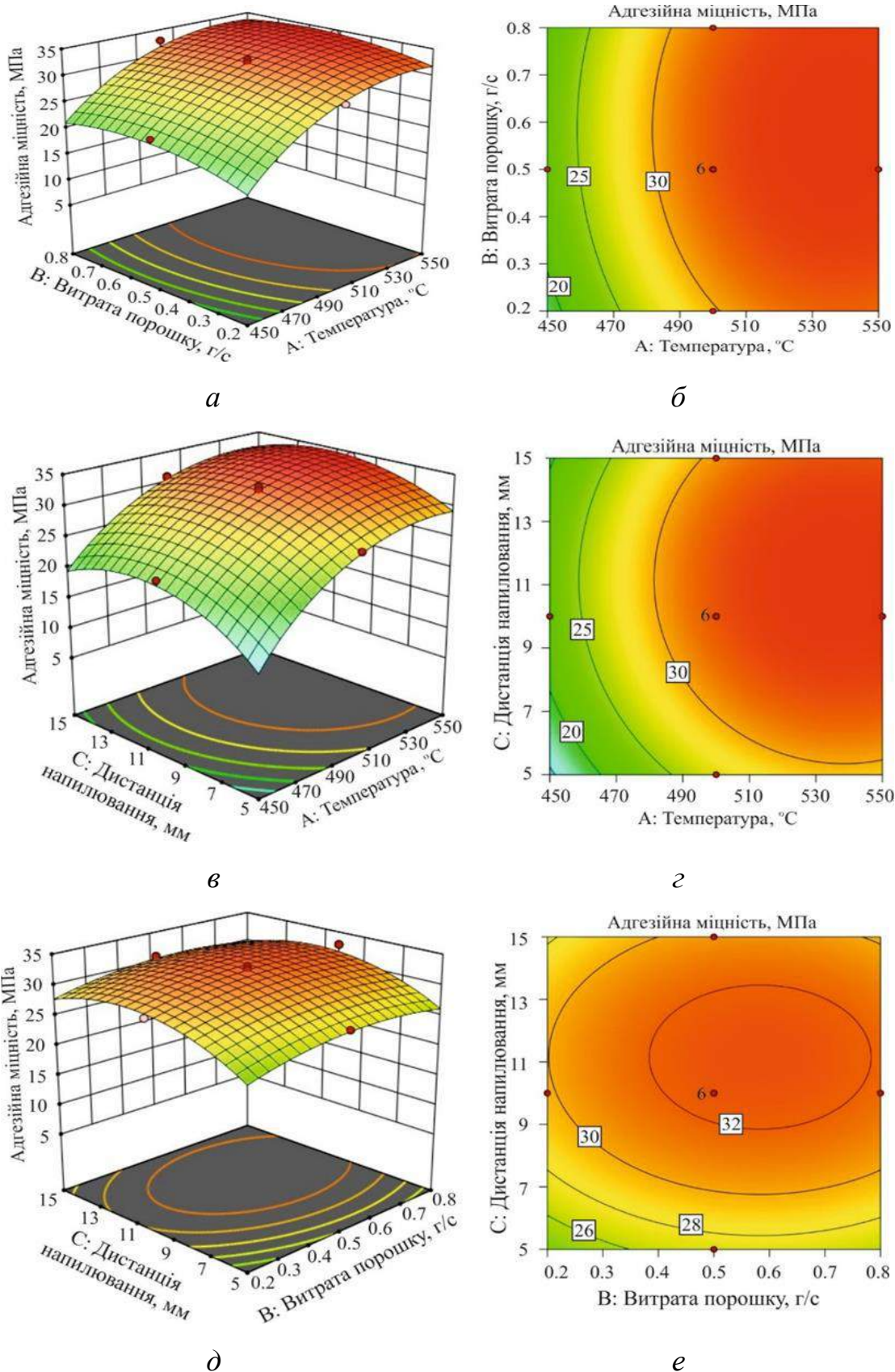
де V_{crit} – критична швидкість напилювання;

T_m – температура плавлення матеріалу порошку;

ρ – густина матеріалу порошку;

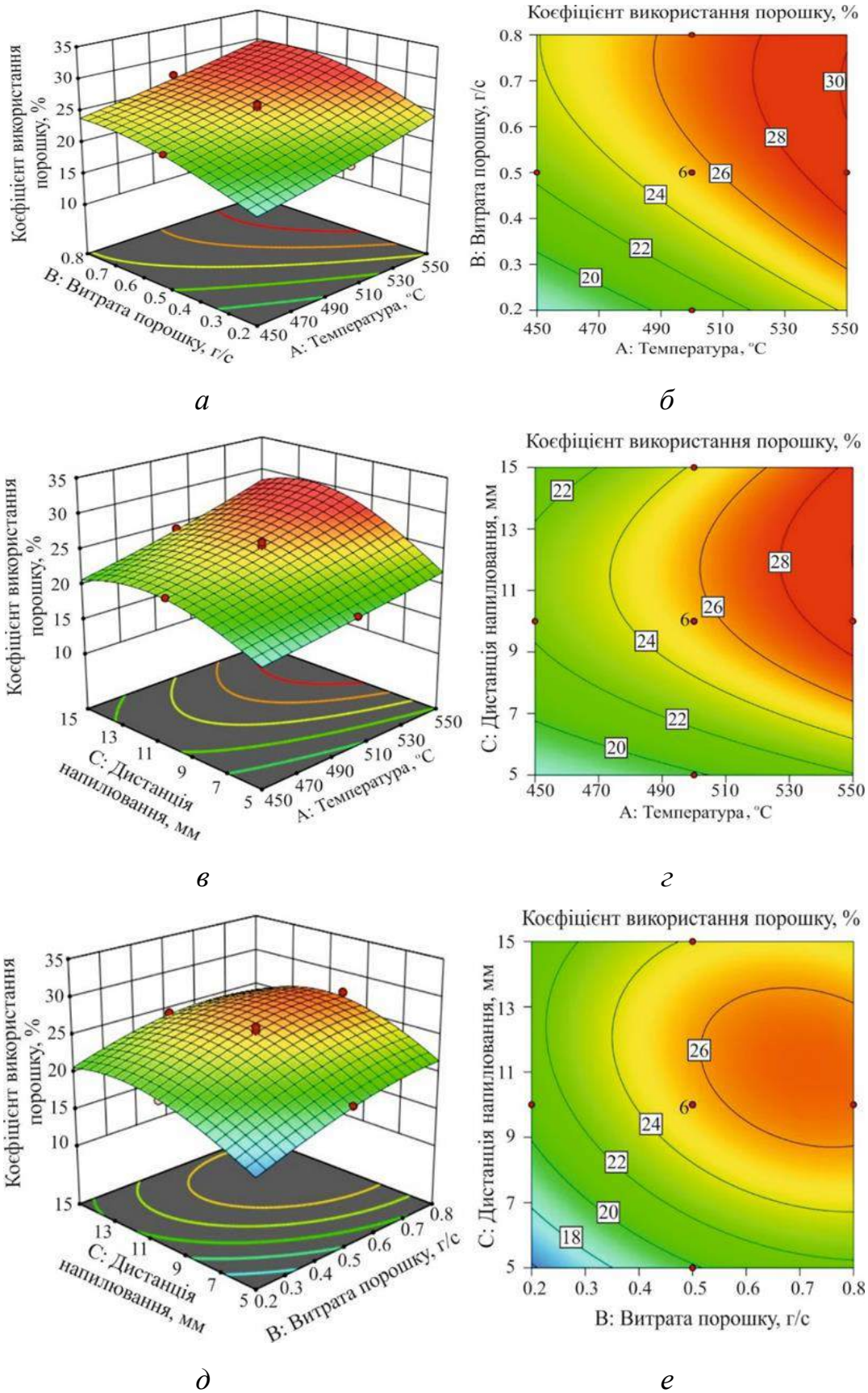
σ_{UTS} – межа міцності на розтяг матеріалу порошку;

T_{pi} – температура частинки порошку при зіткненні з підкладкою.



а, в, д – поверхня відгуку; *б, г, е* – контурна діаграма

Рисунок 4.6 – Залежності адгезійної міцності покриття з порошкової суміші $Ni + Al_2O_3$ від досліджуваних параметрів напилювання.



а, в, д – поверхня відгуку; *б, г, е* – контурна діаграма

Рисунок 4.7 – Залежності коефіцієнту використання порошку $\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3$ від досліджуваних параметрів напилювання.

Залежність критичної швидкості напилювання від температури частинок була показана в роботі [139]. Зменшення необхідної критичної швидкості напилювання приводить до отримання більших значень відношення швидкості частинки до критичної швидкості, що як було показано в роботі [50], позитивно впливає на ступінь розплющування частинок порошку, покращення властивостей покриття (зменшення пористості, підвищення мікротвердості, адгезійної та когезійної міцності, тощо), підвищення коефіцієнту використання порошку.

Тенденція збільшення адгезійної та когезійної міцності із зростанням температури газу на вході в сопло при холодному газодинамічному напилюванні також підтверджується в роботах багатьох дослідників [169–172].

Максимальна адгезійна міцність покриття була отримана при дистанції напилювання, яка приблизно дорівнює 10 мм (див. рисунок 4.6) [173]. З рисунку 4.6 видно, що зі збільшенням дистанції напилювання з 5 мм до 10 мм адгезія покриттів зростає. Проте подальше збільшення дистанції до 15 мм призводить до її зменшення.

Дистанція напилювання впливає на газовий потік між вихідним перетином сопла та поверхнею підкладки. При натікання потоку на перешкоду на її поверхні утворюється область підвищеного тиску – стрибок ущільнення. Товщина цього шару залежить від дистанції напилювання – чим більша відстань від виходу сопла до підкладки, тим товщина трибка ущільнення є меншою. За результатами комп'ютерних моделювань та експериментальних досліджень різними авторами було встановлено, що при проходженні частинок через стрибок ущільнення спостерігається їх гальмування [162, 171]. Для частинок порошку діаметром 5 мкм це взагалі є суттєвим, що навіть може впливати на зміну їх траєкторії [172]. Зі збільшенням дистанції від зрізу сопла до підкладки з 5 мм до 10 мм, збільшується час знаходження частинок в цьому потоці, швидкість і температура яких продовжує зростати. При цьому зменшується вплив стрибка ущільнення на швидкість частинок при зіткненні з підкладкою. Проте при подальшому збільшенні дистанції напилювання і досягнення певного значення спостерігається

гальмування частинок в потоці, падіння їх температури, що і впливає на зменшення адгезійної міцності покриттів.

Вплив витрати порошку на адгезійну міцність покриттів показано на рисунку 4.6. Збільшення витрати порошку незначним чином впливає на збільшення адгезії покриттів.

Зростання адгезійної міцності спостерігається зі зростанням витрати порошку до певного значення, в даному випадку – 0,5 г/с. Подальше збільшення витрати порошку майже не впливає на міцність зчеплення покриттів з підкладкою. Збільшення концентрації частинок порошку в газовому потоці відповідно збільшує їх взаємодію між собою, що в свою чергу впливає на процес їх прискорення. Зменшення дистанції між частинками підвищує кількість їх зіткнень між собою та з внутрішніми стінками сопла, зменшуючи їх швидкість. Експериментальні дослідження з визначення дистанції між частинками та концентрації частинок в одиниці об'єму неможливі; результати чисельних розрахунків наведені авторами в роботах [174–176].

На рисунку 4.6 показано вплив температури газу на вході в сопло, дистанції напилювання, і витрати порошку на коефіцієнту використання порошку $Ni + Al_2O_3$. З рисунку можна побачити, що температура газу та витрата порошку найбільшим чином впливають на цю характеристику процесу холодного напилювання низького тиску. Зі збільшенням температури газу збільшується відсоток закріплених частинок в покритті, тобто спостерігається зростання коефіцієнту використання порошку. Аналогічно як і у випадку адгезійної міцності, головною причиною цього є зростання швидкості частинок при зіткненні з підкладкою при зростанні швидкості газу в соплі (рівняння (3.3)). Окрім того, з підвищенням температури газу зростає температура частинок, які знаходяться в цьому потоці, що забезпечує їх кращу пластичну деформацію при зіткненні з підкладкою [177].

Також з рисунку 4.7 видно вплив дистанції напилювання на ефективність напилювання, а саме зростання останньої при збільшенні дистанції з 5 мм до 10 мм. Максимальне значення коефіцієнту використання порошку $Ni + Al_2O_3$ в

цьому дослідженні було досягнуто на рівні 28,1% при дистанції напилювання 10 мм. Подальше зростання дистанції до 15 мм приводить до зменшення коефіцієнту використання порошку. Така тенденція також як і для впливу дистанції напилювання на адгезійну міцність обумовлена гальмуванням потоку і частинок порошку відповідно. При збільшенні дистанції з 5 мм до 10 мм зменшується товщина стрибка ущільнення на поверхні підкладки при натіканні на неї потоку і його вплив на швидкість частинок.

Покриття з порошку $Ni + Al_2O_3$ показали найкращі результати з точки зору забезпечення максимальних значень коефіцієнту використання порошку при витраті порошку 0,8 г/с. На рисунку 4.7 показано залежність коефіцієнту використання порошку від його витрати. На початку зі збільшенням витрати порошку спостерігається підвищення ефективності напилювання. Поясненням цього є збільшення концентрації частинок порошку в газовому потоці, що зменшує час активації поверхні перед напилюванням. В цьому дослідженні час активації поверхні з моменту початку взаємодії газового потоку з частинками порошку та поверхнею до початку формування першого шару покриття не замірявся. Проте, візуально було помітно, що зі збільшенням витрати порошку зростання покриття відбувається швидше. Взаємозв'язок між витратою порошку та часом активації показано в роботах [178]

Збільшення витрати порошку до певного значення в процесі холодного напилювання низького тиску впливає на товщину шару покриття за один прохід сопла, а отже, і коефіцієнту використання порошку. Окрім того вважається, що збільшення концентрації частинок в потоці призводить до збільшення відповідно їх концентрації в нормальній ударній хвилі, що виникає при натіканні двофазного потоку на перешкоду (поверхню підкладки) [176]. Частинки порошку, які не закріплюються та відбиваються від поверхні, при занадто високій витраті порошку сильно зменшують кінетичну енергію (швидкість) підлітаючих частинок, що негативно впливає на їх деформацію при зіткненні та закріпленні при формуванні покриття. Висновки щодо тенденції зменшення коефіцієнту використання порошку зі зростанням витрати порошку при

холодному напилюванні через зменшення швидкості налітаючих частинок зроблено в роботах інших дослідників [175]. І навіть якщо при високій витраті порошку може спостерігатися збільшення коефіцієнту використання порошку, слід уважно контролювати інші параметри якості покриття, як то пористість, мікротвердість, значення яких може погіршитися [114].

4.3 Пошук оптимальних параметрів напилювання

З метою пошуку оптимальних значень температури на вході в сопло, дистанції напилювання і витрати порошку, які б забезпечували максимальні значення адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку $Ni + Al_2O_3$, було застосовано метод багатокритеріальної оптимізації. Модуль оптимізації в програмі Stat-Ease 360 виконує пошук оптимальної комбінації факторів, які будуть забезпечувати одночасне отримання кращих результатів для кожної з цільових функцій (відгуку). В програмі реалізовано два методи пошуку оптимальних значень – чисельний і графічний. При багатокритеріальній оптимізації на контурному графіку знаходять області, які одночасно задовольняють критичним властивостям кожного окремого відгуку. Графічна оптимізація відображає область допустимих значень відгуку в факторній площині. При чисельній оптимізації можуть бути задані граничні значення для кожного з відгуків (верхня та/або нижня межа), які будуть враховані для цієї процедури, або задано бажане значення відгуку.

Метою процесу оптимізації цього дослідження є забезпечення максимальних значень цільових функцій – адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку. Окрім того, було вказано мінімальну допустиму нижню межу адгезійної міцності – 15 МПа, що є критерієм можливості практичного використання покриття. На рисунку 4.8 наведено результати чисельної оптимізації режимів напилювання порошкової суміші $Ni + Al_2O_3$ в програмному пакеті Stat-Ease 360 з урахуванням встановлених критеріїв.

Як видно з рисунку 4.8, розрахункові максимальні значення адгезійної міцності (34,78 МПа) і коефіцієнту використання порошку (29,46%) Ni + Al₂O₃ з достовірністю 95% можна отримати задавши температуру газу на вході в сопло 537 °С, витрату порошку 0,6 г/с, і дистанцію напилювання 11 мм [187].

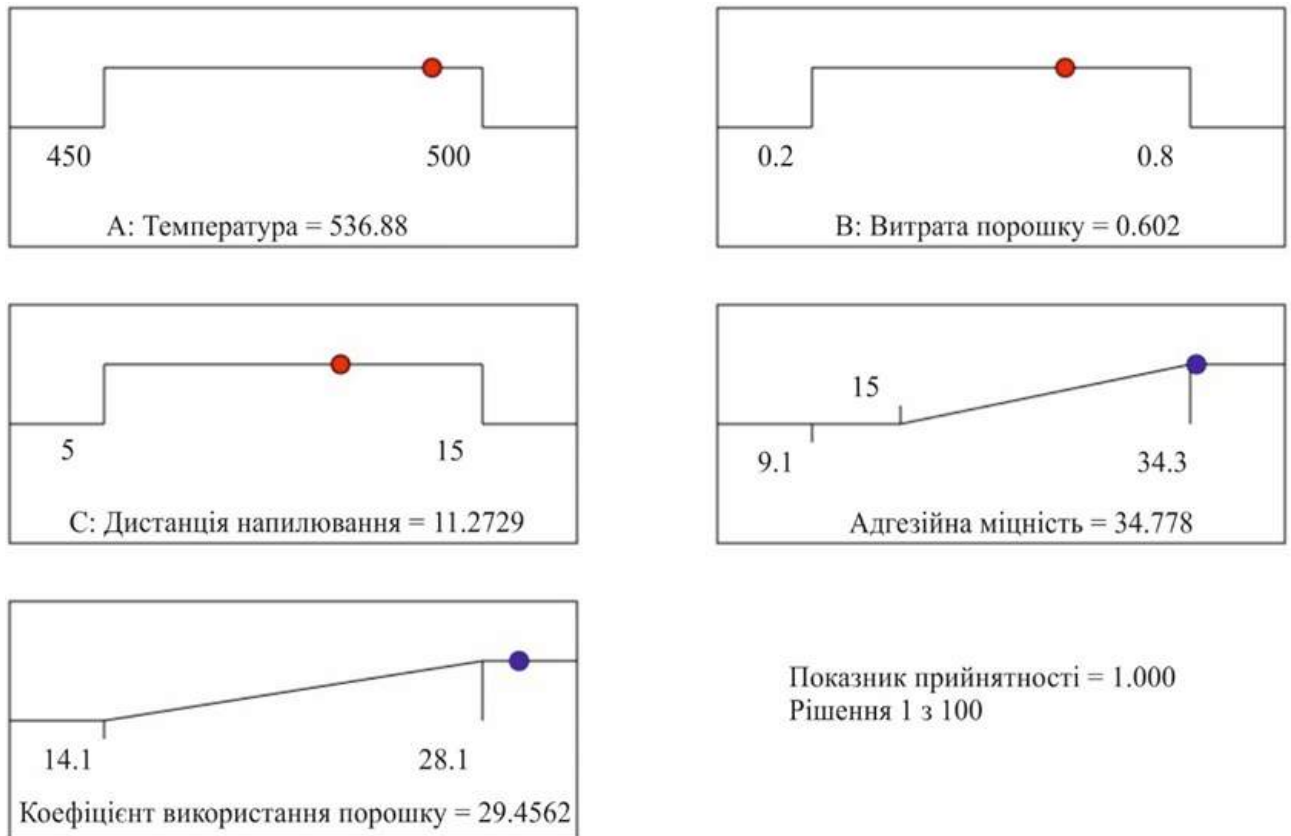


Рисунок 4.8 – Оптимальні параметри напилювання.

4.4 Перевірка достовірності моделі

Важливим етапом процесу оптимізації є перевірка отриманих емпіричних залежностей на можливість їх використання для прогнозування цільової функції, тобто ступеня відповідності значень прогнозованої характеристики – дійсній. З цією метою додатково було проведено три експерименти, з довільно обраними режимами напилювання, які наведені в таблиці 4.5.

В таблиці 4.5 подано результати експериментальних досліджень адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку, а також їх розрахункові

Таблиця 4.5 – Результати перевірки достовірності моделі прогнозування адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку.

№ з/п	Режими напилювання			Адгезійна міцність, МПа				Коефіцієнт використання порошку, %			
	$T_0, ^\circ\text{C}$	$G_p, \text{г/с}$	$S, \text{мм}$	Експеримент	Модель	95% інтервал вірогідності (нижнє значення)	95% інтервал вірогідності (верхнє значення)	Експеримент	Модель	95% інтервал вірогідності (нижнє значення)	95% інтервал вірогідності (верхнє значення)
1	500	0,5	10	31,1	32,43	30,92	33,89	24,5	25,4	23,89	27,01
2	540	0,7	11	33,9	34,55	33,02	36,03	28,8	29,81	27,82	31,98
3	470	0,3	7	21,5	23,31	21,31	25,21	17,7	18,44	17,42	19,53

значення, отримані за допомогою емпіричних залежностей. З аналізу таблиці можна зробити висновок, що отримані залежності можуть бути використані для прогнозування адгезійної міцності та коефіцієнту використання порошку в досліджуваних діапазонах робочих режимів.

4.5 Результати досліджень мікроструктури покриттів

Для аналізу мікроструктури були напилені покриття з порошкової суміші $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$ на підкладках з титанового сплаву ВТ9 на режимах, наведених в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Режимы напилювання покриттів, використані для мікроструктурних досліджень.

Параметр	Значення
Температура гальмування газу $T_0, ^\circ\text{C}$	450; 500; 550
Тиск гальмування газу $P_0, \text{МПа}$	0,8
Витрата порошку $G_p, \text{г/с}$	0,6
Дистанція напилювання $S, \text{мм}$	11,0

Напилювання покриттів проводилося на фіксованих параметрах, крім температури газу на вході в сопло, що найбільш суттєво впливає на фізико-механічні характеристики покриттів при холодному газодинамічному напилюванні.

Підготовлені для металографічних досліджень поперечні шліфи покриттів за методикою, описаною в п. 2.3, показано на рисунку 4.9.

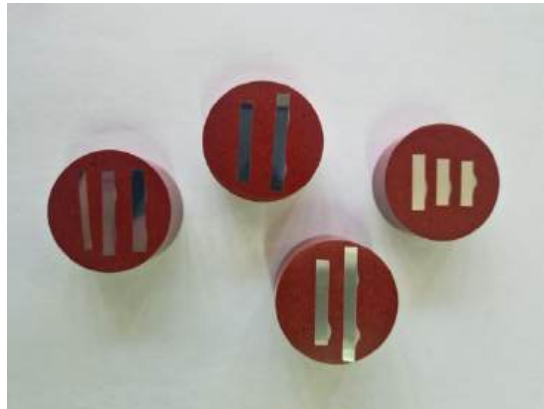
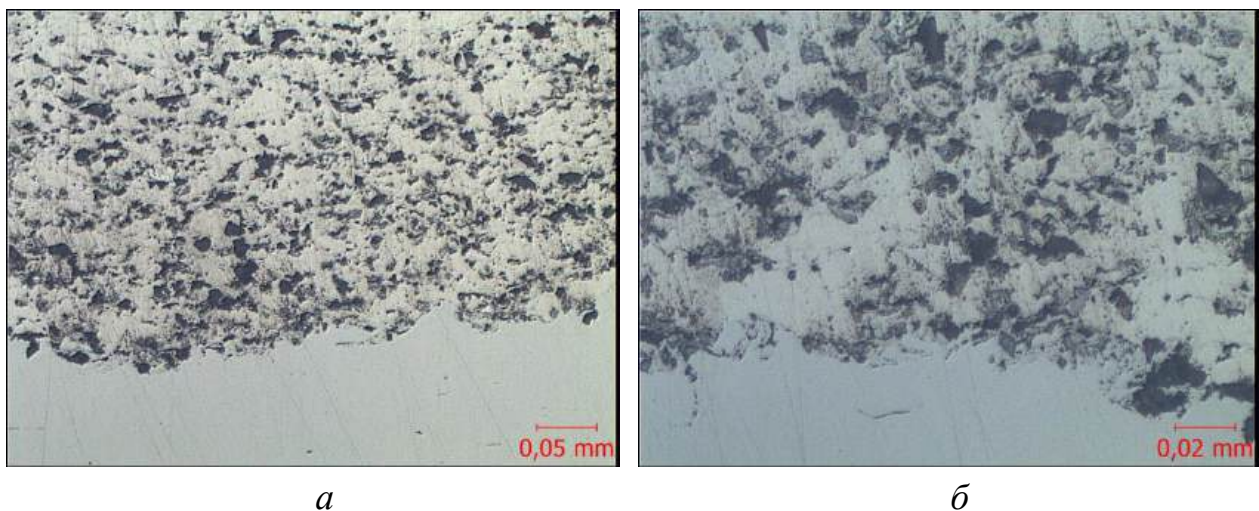


Рисунок 4.9 – Підготовлені поперечні шліфи покриття $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$ для мікроструктурного аналізу.

На рисунках 4.10–4.12 показано фотографії межі розподілу покриття з підкладкою при збільшенні 50х, 200х і 500х, напилених при температурах газу на вході в сопло 450 °С, 500 °С і 550 °С.



$a - 200\times; b - 500\times$

Рисунок 4.10 – Мікроструктура покриттів з порошкової суміші $\text{Ni} + \text{Al}_2\text{O}_3$ при температурі напилювання 450 °С.

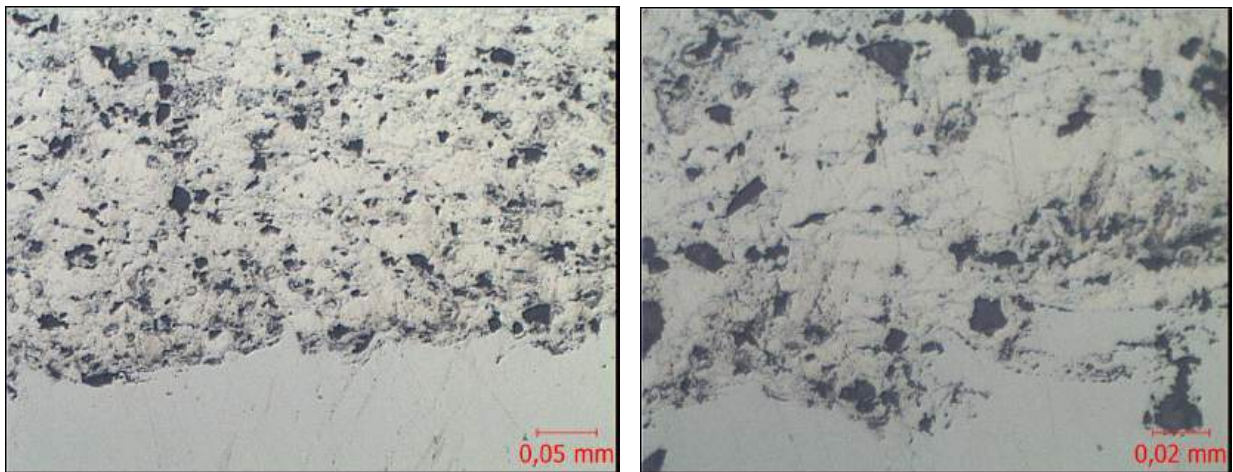
*a**б**a* – 200x; *б* – 500x

Рисунок 4.11 – Мікроструктура покриттів з порошкової суміші Ni + Al₂O₃ при температурі напилювання 500 °С.

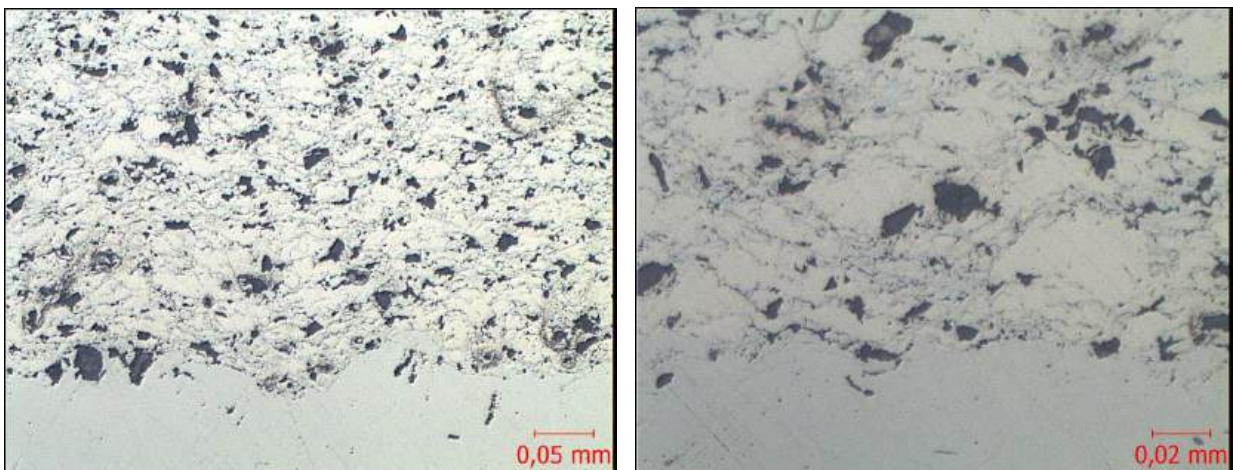
*a**б**a* – 200x; *б* – 500x

Рисунок 4.12 – Мікроструктура покриттів з порошкової суміші Ni + Al₂O₃ при температурі напилювання 550 °С.

З аналізу знімків, наведених на рисунках 4.10–4.12, можна зробити висновок, що в покриттях відсутні тріщини й відшарування покриття від поверхні підкладки. Виявлено наявність щільного контакту матеріалу покриття з підкладкою. Окрім того, в покриттях важко відслідкувати межі окремих шарів, що забезпечує достатньо високі значення когезійної міцності покриттів. Відсутність значного температурного впливу потоку на частинки металевого

порошку запобігає змінам та перетворенням в матеріалі з якого вони отримані. Тим самим це дозволяє формувати одиничні шари покриття з частинок з майже однаковим фізичним станом. Товщину окремих шарів визначити неможливо.

Двокомпонентні покриття системи нікель-оксид алюмінію складаються з двох структурних складових світлого та темного кольорів. Структурні складові світлого кольору розділені на окремі фрагменти різного розміру тонкими сірими лініями (межами). При відносно малих збільшеннях (200x) за допомогою звичайної оптичної металографії можна зафіксувати будову напиленого покриття, характерну для холодного газодинамічного напилювання низького тиску – витягнуті деформовані в результаті зіткнення частинки нікелю, розташовані паралельно підкладці. Темні включення неправильної форми з гострими вершинами – частинки корунду, які достатньо рівномірно розподілені в покритті. Спостерігається зменшення середнього розміру частинок корунду в покритті відносно їх розміру в початковій порошковій суміші, що пов'язано з їх розбиванням при високошвидкісному зіткненні. Частинки нікелю під впливом потоку падають на підкладку в основному не торцевою частиною, а поверхнею і закріплюються на ній. Також внаслідок бомбардування частинками корунду утвореного металевому шару покриття відзначається сильніша деформація частинок нікелю. В зоні контакту спостерігається більш рихла дрібнозерниста структура.

Аналіз межі покриття-підкладки показує наявність механічного зчеплення анкерного типу. Формування шорсткої поверхні підкладки перед напилюванням струминно-абразивним обробленням позитивно впливає на збільшення площі контакту покриття з підкладкою і, відповідно, адгезії.

В структурі покриття спостерігаються пори, кількість і розмір яких візуально зменшується при збільшенні робочої температури газу з 450 °C до 550 °C. Це може бути пояснено збільшенням швидкості потоку в надзвуковому соплі та на виході з нього і, як наслідок, частинок порошку, що подаються в цей потік. Чим більшою є швидкість частинки при зіткненні, тим більш високою є вірогідність утворення зони сильної деформації, видалення поверхневого

оксидного шару з контактних поверхонь і утворення адгезійних зв'язків. Більші значення швидкості частинок приводять до їх більшої пластичної деформації і збільшенню площі контакту між частинками в покритті та частинками з підкладкою [179].

Параметри напилювання і характеристики порошоків впливають на ступінь пластичної деформації частинок металу. Для кожного металу існує певний діапазон швидкостей в якому можливе його напилювання – вікно напилювання. Цей діапазон обмежений нижнім значенням критичної швидкості V_{crit} і верхнім граничним значенням V_{er} , при якому спостерігається ерозія поверхні [84]. Кінетична енергія частинки при зіткненні з підкладкою в цьому діапазоні продукує силу для її пластичного деформування. Пластичне деформування протікає дуже швидко і також може спровокувати нестійкий адіабатичний зсув на межі контакту частинки та підкладки, що супроводжується термічним розм'якшенням і поліпшенням пластичного деформування [84]. Пластичне деформування частинки при зіткненні приводить до механічного зчеплення, можливості утворення металургійних зв'язків та утворенням щільного шару покриття.

Відомо, що збільшення температури частинки дозволяє зменшити критичну швидкість, необхідної для її зчеплення з підкладкою та раніше напиленого шару покриття [84]. Це зменшення критичної швидкості позитивно впливає на більші значення коефіцієнту використання порошку, вперше запропонованого *Assadi* та ін., що відображає відношення швидкості частинки до значень критичної швидкості напилюємого матеріалу. Зі збільшенням цього коефіцієнту спостерігається покращення показників якості покриттів: адгезійної і когезійної міцності, мікротвердості, пористості, коефіцієнту використання порошку тощо.

Окремої уваги заслуговує дослідження процесу утворення покриттів методом ХГН з сумішей, що містять крихкі частинки (оксиди, карбіди тощо). Інтерес пов'язан як з можливістю отримання нових унікальних властивостей покриттів, так і з розширенням (або поглибленням) знань про природу ХГН,

оскільки звичайні теорії, побудовані на пластичності частинок, в даному випадку неприйнятні. Окрім того, ерозійно-адгезійна конкуренція при цьому проявляється найбільш сильно.

Згідно класичної уяви про ерозію, додавання ерозійних частинок у порошок пластичного матеріалу (Al, Cu, Ni, Zn тощо) повинно було б призвести до ерозії зростаючого покриття, і як наслідок, зменшення ефективності напилювання, або повної ерозії поверхні підкладки. Проте цього не спостерігається. В тому чи іншому ступені крихкий компонент присутній в покриттях, що позитивно впливає на збільшення ефективності напилювання і покращення якості покриттів. Додавання керамічних частинок до металевої матриці дозволяє забезпечити властивості покриттів, які перевищують за показниками такі, що отримані лише з однієї металевої фази [178].

Напилювання метал-матричних композитів має кращі показники ефективності напилювання (коефіцієнту використання порошку) та фізико-механічних властивостей в порівнянні з напилюванням чистих металів. Наявність керамічних частинок в порошковій суміші збільшує шорсткість попередньо напилених шарів при високошвидкісному зіткненні з поверхнею. Збільшення шорсткості позитивно впливає на кількість “анкерів” між покриттям та поверхнею підкладки, а також між шарами покриття, що в свою чергу впливає на підвищення значень адгезійної та когезійної міцності покриттів.

Для усіх покриттів спостерігаються ділянки з більше або менше деформованими частинками. Частинки, що знаходяться в покритті на межі покриття-підкладка мають більш розплющену форму, а сама ділянка покриття характеризується мінімальною пористістю. По мірі віддалення від межі розподілу ступінь деформації частинок зменшується, а в покритті розмір і кількість пор збільшується. Гетерогенність деформації приводить в результаті до бімодальності структури зерен ХГН покриттів, що також відмічається в роботах [180, 181]. Ущільнення внутрішніх шарів відбувається за рахунок ефекту трамбування налітаючими частинками порошку раніше сформованого шару.

4.6 Результати досліджень мікротвердості покриттів

Для аналізу мікроструктури були напилені покриття з порошкової суміші $Ni+Al_2O_3$ на підкладках з титанового сплаву ВТ9 на режимах, наведених в таблиці 4.6. Напилювання покриттів проводилося на фіксованих параметрах, крім температури газу на вході в сопло, що найбільш суттєво впливає на фізико-механічні характеристики покриттів при холодному газодинамічному напилюванні. На рисунку 4.13 показана фотографія процесу дослідження мікротвердості отриманих покриттів, методика якого описана в п. 2.8.

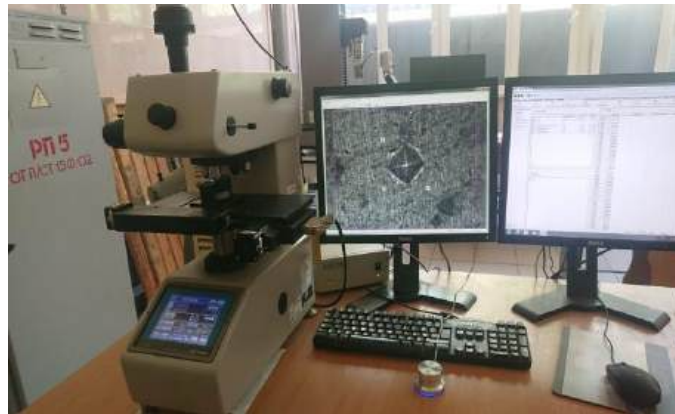


Рисунок 4.13 – Процедура дослідження мікротвердості покриттів.

Отримані середні значення мікротвердості покриттів по товщині, починаючи від підкладки, наведено на рисунку 4.14.

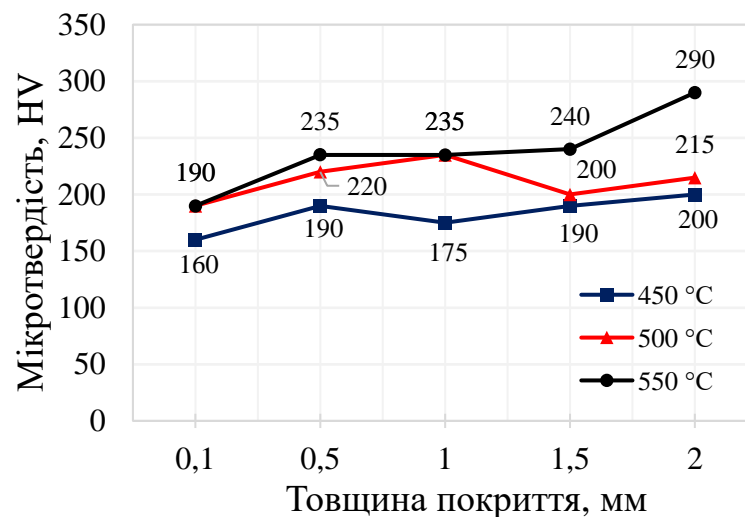


Рисунок 4.14 – Результати дослідження мікротвердості покриттів.

На графіку, представленому на рисунку 4.14 видно, що з підвищенням температури газу на вході в сопло з 450 °С до 550 °С спостерігається зростання мікротвердості покриттів. Це може бути пояснено більш щільною структурою покриття, отриманого при робочій температурі газу 550 °С.

Вплив температури газу на вході в сопло на швидкість частинок в момент зіткнення з підкладкою, і як наслідок на характеристики покриттів, детально описано в п. 4.2.

4.7 Висновки до розділу 4

1. Виконано дослідження впливу параметрів холодного газодинамічного напилювання низького тиску, а саме температури на вході в сопло, дистанції напилювання, і витрати порошку, на адгезійну міцність та ефективність напилювання метал-матричного композиційного порошку на нікелевій основі Ni + Al₂O₃. Метою дослідження було пошук оптимальних параметрів напилювання, що забезпечують досягнення максимальних значень адгезійної міцності та ефективності напилювання, з використанням методології планування експерименту та поверхні відгуку.

2. З аналізу експериментальних даних були отримані емпіричні залежності для прогнозування адгезійної міцності та ефективності напилювання покриттів при зміні параметрів напилювання в досліджуваних діапазонах значень. Відхилення розрахункових значень від фактичних становить не більше 5 %.

3. За результатами варіаційного аналізу (ANOVA) встановлено, що температура і дистанція напилювання є найбільш важливими параметрами, що впливають на адгезійну міцність, а температура газу і витрата повітря – на ефективність напилювання покриттів, отриманих холодним напилюванням.

4. Оптимальні параметрами напилювання покриття Ni + Al₂O₃ були встановлені наступні: температура газу на в ході в сопло – 537 °С, дистанція напилювання – 11 мм, витрата порошку – 0,6 г/с. З використанням цих

параметрів прогнозовані значення адгезійної міцності та ефективності напилювання становлять 34,78 МПа і 29,46 % відповідно.

5. Показано вплив температури газу на вході в сопло на мікроструктуру покриттів $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$. Межа розподілу покриття-підкладка не містить дефектів (пор, тріщин, відшарувань тощо), що забезпечує достатньо високі значення адгезійної міцності. Дослідження структури покриттів по товщині (на поперечних шліфах) показало, що частинки корунду рівномірно розподілені в шарі покриття. Покриття суцільне, без тріщин і дефектів, з щільним контактом між частинками нікелю.

6. Досліджено вплив температури газу на вході в сопло на мікротвердість покриттів $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$. Показано, що з ростом робочої температури з 450 °С до 550 °С відбувається зростання мікротвердості покриттів. Отримано значення мікротвердості покриттів по товщині шару покриття від підкладки до поверхні покриття в діапазоні від 0,1 до 2,0 мм. Суттєвих змін мікротвердості по товщині покриття не спостерігалось. Так, наприклад, на відстані 0,5 мм від межі розподілу мікротвердість покриття становила 190 HV, 220 HV і 235 HV, а на відстані 2,0 мм – 200 HV, 215 HV, 290 HV при робочих температурах 450 °С, 500 °С і 550 °С відповідно.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ ТА ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Розвиток сучасного ремонтного виробництва в напрямку універсальних мобільних технологій відновлення деталей, що реалізуються в умовах виробництв, з невеликою програмою, різноманітною номенклатурою й найменуванням деталей, які підлягають відновленню, передбачають використання недорогого мобільного технологічного обладнання для нанесення покриттів. Технологія ХГН, яка реалізується при значеннях робочого тиску до 1,0 МПа, добре зарекомендувала себе для таких цілей, зокрема в авіа- та двигунобудуванні, та має потенціал для подальшого розвитку.

У розділі наведено практичні рекомендації щодо процесу відновлення пошкоджених поверхонь холодним газодинамічним напилюванням, який охоплює етапи підготовки поверхні до напилювання, нанесення покриття та його подальшого оброблення. Показано приклад реального застосування результатів дисертаційного дослідження – розроблено технологічний процес відновлення зношеної поверхні деталі авіаційного двигуна з титанового сплаву з подальшим відпрацюванням технології та техніко-економічним аналізом її промислового використання.

5.1 Практичні рекомендації щодо ведення технологічного процесу ХГН

Технологічна схема процесів отримання газодинамічних покриттів (рисунок 5.1) в залежності від конкретних умов і типу виробництва, конструктивних особливостей виробів і покриттів, що оброблюються, в реальних технологічних процесах може містити різну кількість операцій і технологічних прийомів. Можливе також суміщення окремих прийомів і операцій. Технологічні операції можуть виконуватись в окремих цехах (дільницях), на окремих робочих

місцях або на одному робочому місці. В умовах крупносерійного і масового виробництва доцільне створення поточних і автоматичних ліній, спеціальних багатоопераційних верстатів тощо.



Рисунок 5.1 – Технологічна схема отримання газодинамічних покриттів.

5.1.1 Підготовка поверхні деталей перед напилюванням

До виробів, підготовлених до газодинамічного напилювання покриттів, висувають такі вимоги [68, 202, 203]:

- 1) розміри поверхонь деталей, на які буде нанесено покриття, мають бути зменшені (або збільшені) на товщину покриття;
- 2) на поверхнях виробів не повинно бути поверхневих дефектів; вони мають бути очищені від окалини, іржі, оксидів і різних забруднень;
- 3) розміри внутрішніх поверхонь, що напилюються (діаметр, довжина), повинні відповідати технічним характеристикам установки для напилення;
- 4) покриття на виїмки і глухі отвори слід наносити при відношенні довжини або діаметру отвору до його глибини не менше 2,0;
- 5) ділянка поверхні виробу, що підлягає напиленню, повинна мати конфігурацію, яка виключає можливість утворення порожнин між покриттям та поверхнею;

б) діапазон товщини покриттів, що наносяться, в цілому визначається властивостями матеріалів покриття і виробу, різновтовщинність покриттів – дисперсністю порошку, що використовується, стабільністю роботи порошкового живильника і рівнем механізації процесу. Зазвичай наносяться покриття товщиною від 15 мкм до 3 мм (в окремих випадках до 10 мм і навіть більше) з допустимою максимальною різновтовщинністю від 10 мм до 150 мкм.

Допустимі поєднання матеріалів основи та покриття для уникнення контактної корозії визначають відповідно до ДСТУ 2639-94 [112].

Вибір способу підготовки поверхні залежить від виду покриття, його товщини, методу напилювання, конфігурації та розмірів виробу, виду оброблення напиленого покриття та інших чинників тощо.

Забрудненні деталі і заготовки перед нанесенням газодинамічних покриттів підлягають ретельному очищенню. Особливу увагу приділяють зношеним, пошкодженим або іншим ділянкам, які підлягають напилюванню, мають забруднення, залишки палива, змащувальних матеріалів, застарілу змазку, нагар, накіп, залишки корозії, старі лакофарбові покриття тощо.

Методи очищення металічних виробів від забруднень поділяються на [204]: механічне (змивання, оббивання, стирання та ін.), хімічне (травлення в розчинах і розплавах та ін.); колоїдно-хімічне (знежирювання), електрохімічне; ультразвукове; термічне – вогневе, прокалювання в окислювальній, відновлювальній та нейтральній атмосферах; комбіноване.

При підготовленні поверхні до нанесення будь-яких покриттів їх знежирюють органічними розчинниками (бензин, уайт-спірит, ацетон, тетрахлоретилен, трихлоретилен та інші), засобами для миття, лужними розчинами та різними емульсіями. Від частоти поверхні деталі в значному ступені залежить якість напиленого покриття. Наявність на поверхні бруду, окисних плівок, мастила зменшують міцність зчеплення покриття з металом деталі.

Очищення і миття деталей виконують загальноприйнятими методами (машинним або ручним способом розчинниками, очищення скребками,

обдування стисненим повітрям). Необхідно ретельно очищати не лише ділянки, які підлягають напилюванню, але і поверхні та ділянки, які прилягають до них (з метою попередження переносу забруднення на оброблювальну поверхню). Шпонкові канавки, отвори для доступу змазки ретельно очищають, промивають і продувають стисненим повітрям. Деталі, які працюють довгий час у масляному середовищі, для видалення мастила з пор металу нагрівають до 250 °С в нагрівальних шафах або печах. Після знежирення деталей водними або емульсійними розчинами їх промивають водою, сушать в сушильних шафах при температурі від 60 °С до 150 °С або обдувають стисненим повітрям.

Майже всі відомі способи механічного оброблення різанням можуть бути використані для попереднього оброблення поверхонь, що підлягають напилюванню. Ця операція проводиться для забезпечення необхідної технологічності деталі стосовно технології напилювання.

Ділянка поверхні виробу, яка підлягає напилюванню, повинна мати потрібну конфігурацію по відношенню радіусів заокруглених крайок, кутів, підготовці виїмок. Часто на поверхнях деталей нарізають дрібну різьбу з кроком від 0,5 мм до 0,6 мм і кутом профілю 60° [183].

З метою активації та надання потрібної шорсткості поверхням, які підлягають напилюванню, найбільш часто проводять струминно-абразивне оброблювання. В залежності від джерела енергії, що приводить в рух зерна абразиву, розрізняють абразивно-пневматичний, абразивно-центробіжний та абразивно-гравітаційний способи очищення поверхні. Окрім того, в промисловості використовують комбіновані методи очищення, наприклад абразивно-пневморідинний, абразивно-пневоцентробіжний та інші. Широко розповсюджені абразивно-пневматичний та абразивно-центробіжний, відомі як дробеструминний та дробометний способи очищення.

Одним з найбільш продуктивних та економічних способів очищення деталей складної форми з усіх матеріалів, які використовуються в машинобудуванні, є абразивно-пневматичний. Параметри технологічного процесу очищення поверхні металічним піском залежать від фізико-механічних

властивостей абразиву, параметрів носія абразиву (тиску стиснутого повітря, швидкості його витікання із сопла, дистанції від сопла до поверхні, що оброблюється, кута атаки), а також від фізико-механічних властивостей оброблювального матеріалу [184, 185].

Рекомендовані режими струминно-абразивного оброблення порошком електрокорунду на механізованих дільницях наведено в таблиці 5.1 [182].

Таблиця 5.1 – Рекомендовані режими струминно-абразивного оброблення порошком електрокорунду.

Параметр	Значення
Тиск стиснутого повітря, МПа	від 0,4 до 0,6
Кут атаки струменю, град	від 60 до 90
Дистанція від зрізу сопла пістолету до поверхні виробу, мм	від 100 до 120
Швидкість обертання деталей, м/хв – сталевих (HRC > 40); – сталевих (HRC < 40); – алюмінієвих	від 6 до 8 від 8 до 10 від 10 до 12
Подача, мм/об	від 4 до 6
Витрата абразиву, кг/год	від 3 до 5
Число проходів, шт	2

5.1.2 Ізоляція поверхонь, що не підлягають напилюванню

Поверхні, що не підлягають напилюванню, мають бути захищені від попадання на них напилювального матеріалу. Тому ці частини деталей захищають обгортаючи картоном або азбестом, який закріплюють дротом. З цією метою використовують також металеві екрани. Шпонкові канавки та отвори для змащення закупорюють дерев'яними пробками, що виступають над рівнем поверхні покриття. Якщо за технологією передбачається струминно-абразивне оброблення, то ізоляція поверхонь проводиться перед нею. В іншому випадку при струминно-абразивному обробленні можуть бути пошкоджені різьбові отвори, канавки та інші елементи. Абразивні частинки, що потрапили в отвір для

мастила, важко видалити, а це може викликати серйозні пошкодження робочих поверхонь деталі при експлуатації [184, 185].

При струминно-абразивному обробленні для захисту поверхонь зазвичай застосовують металеві екрани (маски) та спеціальні настановні пристрої. Іноді деталі встановлюють у пристосуванні так, що незахищеними залишаються тільки поверхні, що підлягають напилюванню. При необхідності використовують додаткові екрани [184, 185].

5.1.3 Основні вимоги до порошків для напилювання

Вимоги до порошків для газодинамічного напилювання складаються з двох основних положень: форма і розмір частинок мають забезпечувати, з одного боку, стабільну та регульовану подачу порошку в газовий потік, а з іншого – формування покриття заданими експлуатаційними властивостями.

Важливою характеристикою порошків на стадії їх подачі в сопло є плинність. Вона визначає стабільність подачі матеріалів, можливість точного регулювання витрати. Визначення плинності порошків проводять за ДСТУ 2640-94. Формування частинок композиційних порошків (плакованного та конгломерованого типів) призводить до зміни їх густини та характеристик поверхні (конфігурація, коефіцієнт тертя) – факторів, які визначають плинність порошків. Для забезпечення рівномірної подачі порошку бажано використовувати частинки сферичної форми (або близької до такої) розміром не менше 10 мкм.

До числа важливих показників відноситься максимально можливий діаметр частинок, які приймають участь у формуванні покриття при напилюванні. Вважається, що умовою цього є нагрівання частинки, її прискорення, досягнення необхідних значень критичної швидкості тощо. Мінімальний діаметр частинок, з однієї сторони, визначається умовами транспортування порошку до сопла, з іншої – наявністю найменшого критичного розміру частинок, які здатні досягати поверхні для напилювання, і, відповідно,

приймати участь у формуванні покриттів. Тому, однією з найважливіших характеристик порошкових матеріалів є середній розмір частинок порошку (середній розмір фракції).

Порошковий матеріал також підлягає контролю на вміст оксидів та інших домішок, які обмежують можливість формування щільних покриттів. Окрім того, важливим параметром, який визначає сипучість порошку, є вологість. Операція сушіння є необхідною у випадку зберігання порошку при розгерметизації тари та доступу повітря. Сушінням поліпшується сипучість порошку та зменшується кількість зв'язаної та адсорбованої вологи. Для сушіння металевих порошоків використовують сушильні шафи або печі, при цьому операцію проводять при температурі до 150 °С з витримкою від двох до п'яти годин. У випадку відкривання герметизованої тари безпосередньо перед напилюванням та засипанням порошку до бункеру порошкового живильника, просушування дозволяється не проводити.

5.1.4 Загальні рекомендації щодо механічного оброблення газодинамічних покриттів

Технологія розмірного оброблення захисних і відновлювальних покриттів і кількість переходів залежить від співвідношення допусків на розміри заготовки $\delta'_{заг}$, деталі з покриттям $\delta_{дет}$, і покриття δ_n . При цьому можливі три випадки [182]:

1) $\delta'_{заг} > \delta_{дет}$ – при будь-яких значеннях δ_n покриття підлягає розмірному обробленню;

2) $\delta'_{заг} = \delta_{дет}$ – покриття також підлягає розмірному обробленню;

3) $\delta'_{заг} < \delta_{дет}$ – $\delta_{дет} - \delta'_{заг} \geq \delta_n$ не має потреби в розмірному обробленні покриттів за умови відсутності короблення деталі в процесі напилювання (окрім спеціальних вимог), при $\delta_{дет} - \delta'_{заг} \leq \delta_n$ покриття підлягає розмірному обробленню.

Вибір оптимального співвідношення міжперехідних розмірів при виготовленні деталей з покриттями повинна супроводжуватись техніко-економічним аналізом. У випадку нанесення захисних шарів з дорогих матеріалів при значних витратах на їх нанесення, більш економічним може бути зменшення поля допуску $\delta'_{заг}$, що супроводжується збільшенням витрат на попереднє оброблення заготовки.

Особливості оброблення напилених покриттів ріжучим інструментом обумовлені наступними обставинами [185]:

1) при обробленні деталі з покриттям виникає більш складний, ніж при обробленні однорідного матеріалу, напружено-деформований стан, пов'язаний з особливостями структури напилених покриттів, наявністю перехідної зони між покриттям і основним матеріалом, а також виникненням термічних напружень в результаті різних коефіцієнтів термічного розширення покриття і основного матеріалу;

2) різні теплофізичні властивості матеріалів покриття і основи створюють більш складну картину розповсюдження теплових потоків;

3) природа фізико-хімічних явищ в зоні контакту інструменту і покриття, що оброблюється, пов'язана з особливостями шаруватої будови матеріалу покриття та його структури (наявність оксидних включень, слабкість зв'язків між частинками), відрізняється від такої при обробленні компактних однорідних матеріалів.

При виборі методу і режимів оброблення різанням покриттів важливо оцінити можливий їх вплив не лише на властивості матеріалу покриття і поверхневих шарів основи, але й на міцність зчеплення покриття з основою.

Специфіка оброблення газодинамічних покриттів різанням пов'язана з їх структурою. Необхідно забезпечити зрізання частинок без виривання їх з покриття, виключити пошкодження (подряпування) поверхні, що обробляється, відірваними частинками. При оцінюванні жорсткості обробленої поверхні враховують вплив пористості покриття. Трапляються випадки, коли на базовій

довжині, на якій контролюється шорсткість поверхні, розташовано декілька пор. Це впливає на оцінку параметрів шорсткості обробленої поверхні. В окремих випадках може знадобитись спеціальне оброблення покриттів для усунення пор.

5.1.5 Контроль якості газодинамічних покриттів

Контроль якості продукції є необхідним елементом технології, що забезпечує її надійність в умовах промислового виробництва. Багатофакторність процесу газодинамічного напилювання обумовлена його чутливістю до відхилень в режимах і підвищує значущість елементу контролю якості покриттів.

Існуючі методи контролю якості газодинамічних покриттів поділяються на неруйнівні та руйнівні. До неруйнівних методів контролю відносяться контроль зовнішнього виду, вимірювання товщини, шорсткості поверхні покриття тощо.

Контроль зовнішнього виду виконується шляхом огляду з метою виявлення наявності або відсутності здутин, тріщин, сколів або відшарування покриття. Огляд проводять з використанням лупи ЛІ-3 або ЛІ-4 за ГОСТ 25706-83. Геометричні розміри деталі з покриттям контролюють звичайним вимірювальним інструментом (лінійкою, штангенциркулем, мікрометром).

Товщина покриття може бути визначена як різниця між поперечними розмірами деталі з покриттям і без нього, а також прямим визначенням за допомогою товщиномірів різних класів - магнітні, індукційні, індуктивні (для немагнітних і слабомагнітних покриттів на феромагнітній основі), і вихреструмінні (для немагнітних і слабомагнітних металічних і неметалічних покриттів на діелектричній основі).

Шорсткість покриттів в напиленому стані в порівнянні з еталоном слугує показником відповідності призначеного технологічного режиму. Її визначають за допомогою профілографа-профілометра "Калібр" або аналогів.

Одним з методів оцінювання якості напилених покриттів та виявлення дефектів їх структури (пори, тріщини, місцеві відшарування тощо) є

ультразвуковий метод. Крім цього, цей метод дозволяє також виконати якісне оцінювання адгезійної міцності покриттів за такими критеріями, як добра, помірна, дуже слабка тощо.

Руйнівні методи контролю якості газодинамічних покриттів використовуються переважно при дослідженнях зразків-свідків, напилених одночасно з партією виробів, або зразків покриттів і дослідних деталей при відпрацюванні оптимального технологічного режиму. До основних показників якості газодинамічних покриттів відносяться міцність зчеплення (на відрив, на згин, на зріз), пористість (загальна, відкрита й наскрізна), зносостійкість, макро- і мікротвердість. Крім того, в залежності від технічних вимог до виробу з покриттям може виникати необхідність в визначенню стійкості до корозії, термостійкості, теплопровідності, втомної міцності та інших спеціальних властивостей.

5.2 Розроблення технологічного процесу відновлення корпусу сателіту

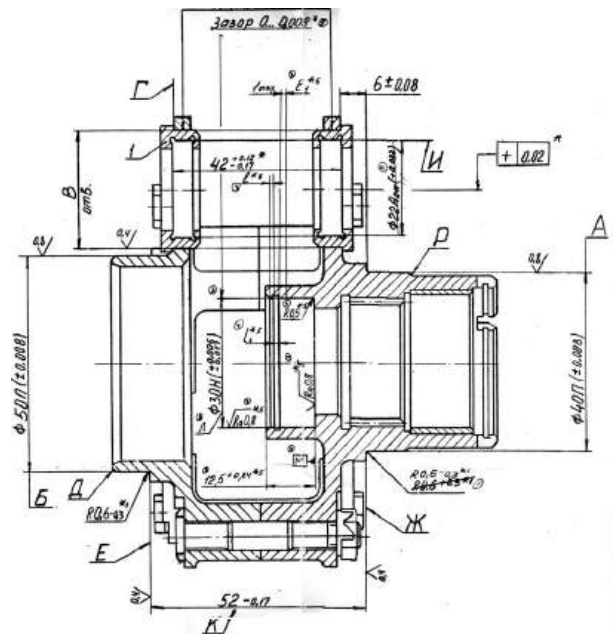
Розроблено маршрут технологічного процесу відновлення корпусу сателіту (рисунок 5.2) з титанового сплаву ВТ5Л ОСТ 1-90060-92 шляхом відновлення розмірів зношеної поверхні холодним газодинамічним напилюванням (таблиця 5.2). В процесі розроблення технологічного процесу були відпрацьовані режими та технологічні прийоми операцій нанесення відновлювальних покриттів методом ХГН та їх механічного оброблення різанням [186].

Корпус сателіту входить до складу редуктора планетарного типу, який в свою чергу входить до складу повітряного стартеру турбовального двигуна ТВ3-117ВМ. Двигун використовується на вертольотах Мі-14, Мі-17, Мі-8АМТ, Мі-8МТ, Мі-80МТ, Мі-28, Мі-171, Мі-172, Мі-8МТВ та ін.

Холодним газодинамічним методом було відновлено поверхню $\varnothing 30_{-0,017}^{+0,006}$ мм покриттям з порошку на основі нікелю. Відповідно до вимог міцність зчеплення



а



б

а – зовнішній вигляд; б – складальний кресленик

Рисунок 5.2 – Корпус сателіту з титанового сплаву ВТ5Л.

покриття з основою – не менше 15 МПа [187]. Товщина шару покриття після механічного оброблення – від 0,08 мм до 0,20 мм. Допускається зменшення діаметру L до 30,225 мм на довжині L , L_1 з відсутністю покриття (*5). Також допускається збільшення розміру L_2 до 1,55 мм (*5).

Таблиця 5.2 – Технологічний процес нанесення покриття для відновлення розмірів зношених поверхонь корпусу сателіту з титанового сплаву ВТ5Л методом ХГН.

№ оп	Найменування та зміст операції	Обладнання, пристрої та матеріали
05	<p style="text-align: center;">Контрольна</p> <p>1) Перевірити в супроводжувальних документах номер деталі та штамп БТК, на деталі або бирці, прикріпленої до неї індивідуальний номер.</p> <p>2) Заміряти розміри деталі під напилювання з записом в журналі.</p> <p>3) Перевірити деталь візуально для виявлення раковин, механічних пошкоджень, тріщин, інших дефектів.</p>	<p style="text-align: center;">Стіл контрольний, штангенциркуль</p>

Продовження таблиці 5.2

10	<p style="text-align: center;">Складання</p> <p>1) Зібрати деталь в захисний пристрій відповідно до карти ескізу деталі. В процесі складання деформації, удари, механічні пошкодження не допускаються.</p>	Пристрій захисний
15	<p style="text-align: center;">Обдування</p> <p>1) Перевірити стиснене повітря на наявність вологи та мастила. Встановити напроти сопла на відстані від 150 мм до 200 мм фільтрувальний папір, обдути його стисненим повітрям протягом від 30 с до 40 с, наявність слідів мастила, вологи на фільтрувальному папері не допускається. За необхідності продути повітропровід протягом однієї хвилини до повного видалення вологи.</p> <p>2) Обдути деталь сухим електрокорундом з тиском повітря від 0,4 МПа до 0,5 МПа, з дистанцією обдування від 90 мм до 100 мм, з кутом таки від 70° до 90°. Записати в журнал час закінчення обдування. Час між закінченням обдування та початком напилювання не більше двох годин. У випадку перевищення цього часу або потрапляння забруднень на робочі поверхні операцію повторити.</p> <p>3) Обдути деталь сухим стисненим повітрям. Допускається виконувати обдування в камері для напилювання.</p>	Електрокорунд д 14А, зернистість F100, стиснене повітря
20	<p style="text-align: center;">Контрольна</p> <p>1) Встановити корпус сателіту на контрольний стіл. Перевірити візуально якість обдування деталі. Поверхня після обдування повинна мати рівномірно матовий колір, без світлих і темних плям.</p>	Стіл контрольний
25	<p style="text-align: center;">Напилювання газодинамічне</p> <p>1) Встановити захисний пристрій для напилювання з деталлю на поворотний стіл.</p> <p>2) Перевірити відповідність режиму на установці та таблиці в журналі, інтервал часу між обдуванням деталі та початком напилювання має бути не більше двох годин, у випадку перевищення цього часу операцію обдування потрібно повторити. Записати час початку напилювання в журнал.</p> <p>3) Нанести покриття на деталь товщиною згідно карті</p>	Установка Димет-403, порошок Ni+Al ₂ O ₃ , захисний шолом, респіратор, чисті бавовняні рукавички,

Продовження таблиці 5.2

	<p>ескізу деталі. Режими напилювання: тиск повітря – 0,9 МПа; температурний режим – №5; витрата порошку – 0,8 г/с; дистанція напилювання – від 5 мм до 15 мм; кут атаки – від 70° до 90°.</p> <p>4) Обдути деталь з пристроєм сухим стисненим повітрям з тиском від 0,4 МПа до 0,5 МПа, з дистанцією обдування від 90 мм до 100 мм, з кутом таки від 70° до 90°.</p> <p>При викиді згустку порошку з утворенням краплини на поверхні, на яку наноситься покриття, більш темного кольору, необхідно видалити дефект обдуванням електрокорундом F320 або механічним способом.</p> <p>У випадку виявлення при механічному обробленні місцевого недопилу, шар необхідно видалити з подальшим перенанілюванням. Допускається при механічному обробленні залишити припуск від 0,2 мм до 0,3 мм напиленого шару з подальшим місцевим нанесенням покриття на місця, де його не вистачає. Перед напилюванням покриття необхідне обдування місць напилювання електрокорундом фракцією від F100 до F320.</p> <p>У випадку поломки установки, манометрів, відключення вентиляції, зриву і/або розриву шлангів, необхідно зупинити ведення технологічного процесу, відключити обладнання та повідомити про аварійний стан. Деталь дозволяється донапилити протягом двох годин (не більше) за умов не потрапляння на поверхню напилювання забруднень та знаходження деталі в сухому приміщенні при кімнатній температурі. У випадку перевищення цього часу або потрапляння забруднень на поверхню для напилювання – видалити напилений шар покриття механічним способом до основного металу з подальшим перенанілюванням.</p>	шумозахисні навушники
30	<p style="text-align: center;">Контрольна</p> <p>1) Провести візуальний контроль поверхні деталі після напилювання.</p> <p>Допускається наявність покриття на прилеглих поверхнях. Тріщини, забоїни, риски, вм'ятини на деталі не допускаються. Заміряти товщину покриття та записати в журнал.</p>	Стіл контрольний, штангенциркуль, бавовняні рукавички

Закінчення таблиці 5.2

35	<p style="text-align: center;">Розбирання</p> <p>1) Розібрати захисний пристрій. В процесі розбирання деформації, удари, механічні пошкодження не допускаються.</p> <p>2) Обдути деталь стисненим повітрям з тиском від 0,4 МПа до 0,5 МПа, з дистанцією обдування від 90 мм до 100 мм, з кутом таки від 70° до 90°.</p> <p>3) Перевірити захисний пристрій на відсутність покриття на поверхнях, які прилягають до поверхні напилювання.</p> <p>Операцію виконувати в чистих бавовняних рукавичках.</p>	Бавовняні рукавички
----	---	---------------------

Підготовка поверхні та напилювання покриття проводилося на спеціалізованій дільниці яка включає: компресор стисненого повітря, захисну камеру для струминно-абразивного оброблення (рисунок 5.3), камеру для напилювання (рисунок 5.4), систему витяжної вентиляції та сепарації відпрацьованого порошку, установку ХГН низького тиску ДИМЕТ-403 (рисунок 5.5).



Рисунок 5.3 – Камера для струминно-абразивного оброблення.

*a**б**a* – вид ззовні; *б* – вид зсередини

Рисунок 5.4 – Камера для напилювання.



Рисунок 5.5 – Установка ХГН ДИМЕТ-403.

Напилювання зовнішньої зношеної поверхні корпусу проводилося з його встановленням в спеціальне пристосування та обертанням в процесі напилювання з частотою 30 об/хв. Кресленик пристосування показано на рисунку 5.6.

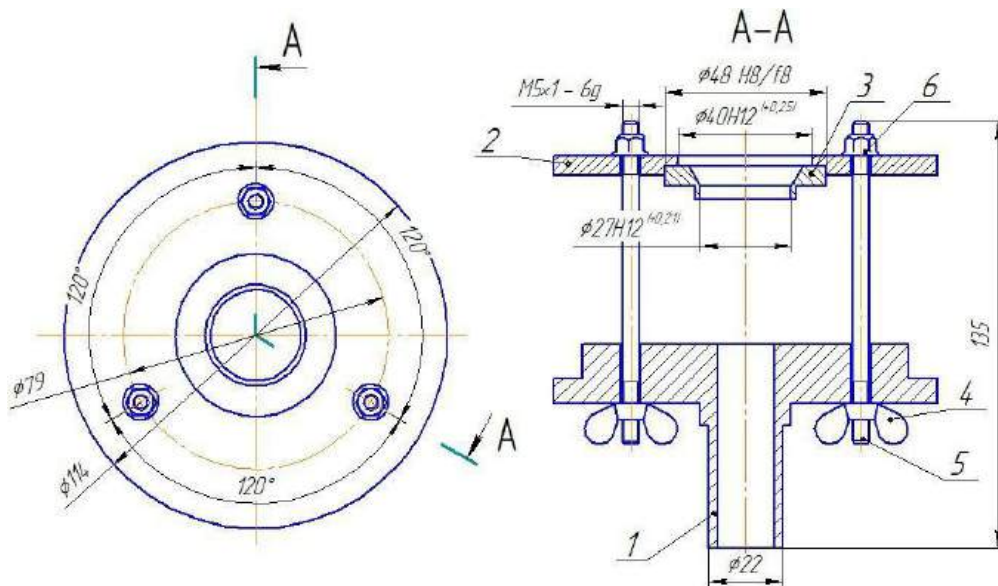


Рисунок 5.6 – Кресленик пристосування для встановлення корпусу для напилювання.

Відновлений сателіт в подальшому підлягав проведенню технологічних випробувань. Після напрацювання 2000 циклів за паспортом відновлений холодним газодинамічним напилюванням корпус сателіту було досліджено та обміряно в лабораторії. Розмір і шорсткість відновленої поверхні відповідає робочому креслену, що підтверджується відповідними актами та протоколами. Корпус було досліджено без розрізання. На відновленій поверхні тріщин, сколів при візуальному огляді та ЛЮМ1-ОВ не виявлено. На поверхні було видно сліди припрацювання без зміни геометричних розмірів (рисунок 5.7). За результатами було зроблено висновок, що на відремонтованому корпусі сателітів по поверхні $\varnothing 30$ мм методом холодного газодинамічного напилювання покриття на основі нікелю після технологічних досліджень стан поверхні задовільний і відповідає вимогам, а корпус придатний до подальшої експлуатації [188].

Запропонована технологія може бути використана як типова для усунення основних експлуатаційних дефектів – зносу, ерозійних і корозійних пошкоджень, подряпин, рисок, забоїв та інших локальних дефектів на деталях з титанових сплавів.



Рисунок 5.7 – Зовнішній вигляд відновленої поверхні корпусу сателіту після випробувань.

5.3 Розрахунок економічної ефективності від впровадження розробленої технології

Розрахунок економічної ефективності від впровадження типового технологічного процесу відновлення корпусних деталей з титанових сплавів виконано на прикладі корпусу сателіту із сплаву ВТ5Л з дефектом у вигляді зносу внутрішньої циліндричної поверхні методом холодного газодинамічного напилювання за умови наявності на підприємстві дільниці відновлення з необхідним обладнанням за тарифами станом на 2024 рік.

Відсутність ефективної та недорогої технології відновлення корпусних деталей з титанових сплавів з аналогічними дефектами (зокрема критичними) призводить до їх заміни на нові. Відповідно, визначення економічної ефективності проведено в порівнянні з вартістю нової деталі:

$$E_{ef} = \left(C_{нов} - C_{від} \frac{P_2}{P_1} \right) H_{рем}, \quad (5.1)$$

де $C_{нов}$ – вартість нової деталі, $C_{нов} = 8552,2$ грн;

$C_{від}$ – собівартість відновленої деталі, грн;

P_1 – середнє значення міжремонтного ресурсу відновленої деталі, год;

P_2 – середнє значення міжремонтного ресурсу нової деталі, год;

$H_{рем}$ – річна програма ремонту, $H_{рем} = 1$ шт.

Виконані експлуатаційні випробування показали, що передбачуваний міжремонтний ресурс відремонтованих запропонованою технологією корпусів щонайменше відповідає нормативному міжремонтному ресурсу нової деталі, тобто $P_1 = P_2$.

Собівартість відновлення одного корпусу сателіту запропонованою технологією визначається за формулою

$$C_{від} = Z_{нкв} + C_m + C_{вир} + ЗП, \quad (5.2)$$

де $ЗП$ – заробітна плата залучених робітників, грн;

C_m – витрати на матеріали, грн;

$C_{вир}$ – витрати на виробничі потреби, грн;

$Z_{нкв}$ – питомі витрати для капітальних вкладень, $Z_{нкв} = 0$ грн.

Заробітна плата робітників на виробництві визначається за формулою

$$ЗП = (ЗП_0 + H_{ЗП}) t_{від}, \quad (5.3)$$

де $ЗП_0$ – погодинний тариф робітника 6-го розряду, $ЗП_0 = 76,55$ грн/год;

$H_{ЗП}$ – нарахування на заробітну плату, $H_{ЗП} = 0,22(ЗП_0)$;

$t_{від}$ – тривалість всіх операцій відновлення одного корпусу, год (визначалася на основі хронометражу).

Час, який було використано на відновлення одного корпусу сателіту:

$$t_{від} = t_{обр} + t_{нан}, \quad (5.4)$$

де $t_{обр}$ – час, який було витрачено на підготовку поверхні до напилювання та оброблення покриття, $t_{обр} = 2,0$ год;

t_{nan} – час, який було витрачено на нанесення покриття холодним газодинамічним напилюванням, $t_{nan} = 0,25$ год.

$$t_{вiд} = 2,0 + 0,25 = 2,25 \text{ год.} \quad (5.5)$$

Основна заробітна плата робітників на виробництві складала:

$$ЗП = (76,55 + 16,8)2,25 = 210,1 \text{ год.} \quad (5.6)$$

Вартість порошкового матеріалу, який було використано на відновлення з урахуванням середнього коефіцієнту використання порошку $K_{вп} = 0,25$, було визначено за формулою

$$C_m = M_{пор} \times C_{пор} = 0,25 \times 3700,0 = 925,0 \text{ грн,} \quad (5.7)$$

де $M_{пор}$ – маса порошку, що було використано для формування покриття, $M_{пор} = 0,25$ кг;

$C_{пор}$ – вартість порошку, $C_{пор} = 3700,0$ грн/кг.

Виробничі витрати визначалися за формулою

$$C_{вир} = C_{ел} + C_{око} + (ЗП_0 + Н_{ЗП})t_{ТО}, \quad (5.8)$$

де $C_{ел}$ – вартість електроенергії, яка була використана в процесі ремонту, грн;

$C_{око}$ – середньорічна вартість опалення, комунальних послуг, освітлення, грн;

$t_{ТО}$ – час налаштування обладнання та його технічне обслуговування, $t_{ТО} = 0,25$ год.

Вартість електроенергії, яка була використана в процесі ремонту, визначалася за формулою

$$C_{ел} = (W_{сао} \times t_{сао} + W_{ток} \times t_{ток} + W_{нан} \times t_{нан}) T_{ел}, \quad (5.9)$$

де $W_{сао}$ – потужність апарату струминно-абразивного оброблення та витяжки, $W_{сао} = 4,0$ кВт-год;

$t_{сао}$ – час на виконання операції струминно-абразивного оброблення, $t_{сао} = 0,1$ год;

$W_{ток}$ – потужність токарного верстату, $W_{ток} = 11,0$ кВт-год;

$t_{ток}$ – час на виконання операції токарного оброблення поверхні перед напилюванням та оброблення напиленого покриття в розмір, $t_{ток} = 0,4$ год;

$W_{нан}$ – потужність установки для холодного газодинамічного напилювання, компресора та витяжки, $W_{нан} = 7,3$ кВт-год;

$t_{нан}$ – час, який було витрачено на нанесення покриття холодним газодинамічним напилюванням, $t_{нан} = 0,25$ год;

$T_{ел}$ – тариф електричної енергії, $T_{ел} = 6,333$ грн/кВт-год.

Вартість електроенергії склала

$$C_{ел} = 55,1 \text{ грн.}$$

Середньорічна вартість опалення, комунальних послуг та освітлення визначалася за формулою

$$C_{око} = (П_{пр} \times T_{он}) + (П_{пр} \times T_{ком}) + (W_{осв} \times t_{осв} \times T_{ел}), \quad (5.10)$$

де $T_{он}$ – середньорічна тарифна плата за опалення, $T_{он} = 13,99$ грн/м³;

$П_{пр}$ – площа ділянки відновлення, $П_{пр} = 15,0$ м²;

$T_{ком}$ – середньорічна тарифна плата за комунальні послуги, $T_{ком} = 34,56$ грн/м²;

$W_{осв}$ – потужність освітлювальних пристроїв, $W_{осв} = 0,06$ кВт-год;

$t_{осв}$ – час роботи освітлювальних пристроїв, $t_{осв} = 2,25$ год.

Середньорічна вартість опалення, комунальних послуг та освітлення складала

$$C_{око} = 729,1 \text{ грн.}$$

Виробничі витрати на відновлення одного корпусу на місяць з урахуванням середньорічної вартості опалення, комунальних послуг та освітлення склали

$$C_{від} = 1934,6 \text{ грн,}$$

а без урахування середньорічної вартості опалення, комунальних послуг та освітлення

$$C'_{від} = 1205,5 \text{ грн,}$$

Таким чином, економічна ефективність від впровадження розробленої технології відновлення одного корпусу сателіту з титанового сплаву ВТ5Л холодним газодинамічним напилюванням складала

$$E_{ef} = 6617,6 \text{ грн.}$$

За умови річної програми ремонту 20 корпусів сателіту, очікуваний річний економічний ефект може становити 166 244,0 грн.

5.4 Практична реалізація та впровадження результатів дослідження

Розроблені технологічні рекомендації та технологію відновлення зношеної поверхні корпусу сателіту з титанового сплаву шляхом нанесення покриття на основі нікелю холодним газодинамічним методом впроваджено на АТ “Мотор

Січ” (м. Запоріжжя). На запропонований спосіб відновлення зношених поверхонь деталей отримано патент України на корисну модель (патент № 156794) [189].

Теоретичні та практичні результати дослідження впроваджені в навчальний процес і науково-дослідну частину Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут”, зокрема в дисципліну «Технологія виробництва та ремонту двигунів та енергетичних установок».

Акти впровадження результатів дослідження подані в Додатку Б.

5.5 Висновки до розділу 5

1. Запропоновано використання холодного газодинамічного напилювання покриттів на основі нікелю для відновлення геометричних розмірів пошкоджених поверхонь деталей газотурбінних двигунів з титанових сплавів.

2. Наведено технологічні рекомендації щодо ведення технологічного процесу відновлення пошкоджених поверхонь деталей, що охоплюють підготування поверхні до напилювання, зокрема різанням та струминно-абразивним обробленням, захисту ділянок, які не підлягають напилюванню, підготування порошкового матеріалу, напилювання покриття, контролю отриманого покриття, його оброблення різанням (патент України на корисну модель № 156794).

3. Розроблено типовий технологічний процес відновлення пошкоджених поверхонь корпусних деталей з титанових сплавів. Результати роботи впроваджено у виробничий процес АТ «Мотор Січ» для відновлення розмірів зношеної внутрішньої поверхні корпусу сателіту з титанового сплаву ВТ5Л. За результатами технологічних випробувань встановлено, що після напрацювання 2000 циклів стан поверхні задовільний і відповідає вимогам, а корпус придатний до подальшої експлуатації. Зроблено висновок, що передбачуваний міжремонтний ресурс відремонтованих запропонованою

технологією корпусів відповідає нормативному міжремонтному ресурсу нової деталі.

4. Собівартість відновлення одного корпусу склала менше 25% від ціни нової деталі. За умови річної програми ремонту 20 корпусів сателіту, очікуваний річний економічний ефект може становити 166 244,0 грн. (Додаток Б).

5. Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі та науково-дослідній частині Національного аерокосмічного університету “Харківський авіаційний інститут” (Додаток Б).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлені нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, які узагальнюють і забезпечують вирішення важливого науково-технічного завдання – подовження ресурсних показників деталей авіаційних двигунів з титанових сплавів за рахунок удосконалення технології нанесення відновлювальних покриттів холодним газодинамічним напилюванням.

Під час виконання поставлених завдань дослідження дисертаційної роботи отримано наступні результати.

1. Отримано закономірності температурно-швидкісних характеристик частинок нікелевого порошку в каналі сопла, виконаного за ежекторною схемою, для холодного газодинамічного напилювання з робочим тиском до 1,0 МПа, від температури повітря на вході в сопло та діаметру частинок, що дозволило обрати оптимальні температурний режим напилювання та розмір фракції порошку за критерієм максимальної швидкості частинки на виході з сопла.

2. Побудовано графіки зміни температури та швидкості частинки порошку нікелю діаметром 10 мкм, 25 мкм і 40 мкм від температури газу на вході в сопло установки ХГН низького тиску ДИМЕТ-405, значення якої становили 713 К, 793 К і 893 К при постійному тиску 0,9 МПа, в каналі сопла та на виході з нього за допомогою одновимірної ізоентропійної газодинамічної моделі та чисельного моделювання. Показано, що чисельне моделювання дає більші значення температури та менші значення швидкості нікелевих частинок в порівнянні з розрахунковими, оскільки модель описує реальний потік, враховує його турбулентність, в'язкість, наявність примежового шару на внутрішніх стінках сопла, а також вплив ежектованого вторинного потоку з частинками на основний потік. Отримані результати можуть бути в використанні для оптимізації геометрії каналу сопла для підвищення коефіцієнту використання порошку в процесі напилювання та характеристик покриттів шляхом забезпечення більших значень швидкості частинок, а також для подальшого

розвитку аналітичної моделі та її застосування в розрахунках температурно-швидкісних параметрів частинок порошку в соплах для холодного газодинамічного напилювання низького тиску, виконаних за ежекторною схемою.

3. Для напилювання нікелевих покриттів холодним газодинамічним напилюванням низького тиску з використанням досліджуваного сопла для забезпечення максимальної швидкості частинок порошку на виході з сопла, рекомендовано при тиску гальмування газу 0,9 МПа обирати максимальний температурний режим роботи, при якому температура газу на вході в сопло становить 620 °С та діаметр частинок порошку від 10 мкм до 25 мкм.

4. Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість використання композиційної порошкової суміші на основі нікелю з додаванням оксиду алюмінію для формування захисних і відновлювальних покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням з робочим тиском повітря до 1,0 МПа, застосування якої підвищує ресурс деталей при їх відновлювальному ремонті. Запропоновані початкові режимні параметри повітря на вході в сопло заданої геометрії та розмір фракції порошку дозволяють наблизитись до необхідних значень швидкості, необхідних для зчеплення з поверхнею підкладки.

5. На базі експериментальних даних одержано закономірності впливу режимів холодного газодинамічного напилювання з робочим тиском повітря до 1,0 МПа (температура повітря, витрата порошку, дистанція напилювання) на характеристики покриттів (адгезійна міцність, мікротвердість, мікроструктура, коефіцієнт використання порошку), нанесені на титанові сплави. Отримані емпіричні залежності описуються поліномом другого порядку і дають змогу прогнозувати адгезійну міцність покриттів і коефіцієнт використання порошку на титанових сплавах з композиційних порошкових сумішей. Відхилення розрахункових значень від фактичних становить не більше 5 %.

6. Виконано оптимізацію режимів холодного газодинамічного напилювання для досягнення максимальних значень адгезійної міцності

покривів та коефіцієнту використання композиційної порошкової суміші на основі нікелю з додаванням оксиду алюмінію: температура газу на вхід в сопло – 537 °С, дистанція напилювання – 11 мм, витрата порошку – 0,6 г/с. З використанням цих параметрів прогнозовані значення адгезійної міцності та ефективності напилювання становлять 34,8 МПа і 29,5 % відповідно.

7. Отримано експериментальні дані щодо впливу температури повітря на вхід в сопло на мікроструктуру та мікротвердість покривів, отриманих з композиційної порошкової суміші на основі нікелю з додаванням оксиду алюмінію. Структура покривів суцільна, без тріщин і дефектів, з щільним контактом між частинками нікелю та рівномірним розподілом частинок оксиду алюмінію по товщині покриття. Межа розподілу покриття-підкладка не містить дефектів, таких як пори, тріщини і відшарування. На оптимізованих режимах напилювання мікротвердість покривів по товщині шару від підкладки до поверхні покриття в діапазоні від 0,1 мм до 2,0 мм становила від 235 HV до 290 HV.

8. Розроблено типовий технологічний процес відновлення холодним газодинамічним напилюванням пошкоджених поверхонь корпусних деталей з титанових сплавів на прикладі зношеної поверхні корпусу сателіту з сплаву ВТ5Л. За результатами технологічних випробувань встановлено, що після напрацювання 2000 циклів стан поверхні задовільний і відповідає вимогам, а корпус придатний до подальшої експлуатації.

9. Передбачуваний міжремонтний ресурс відремонтованих запропонованою технологією корпусів відповідає нормативному міжремонтному ресурсу нової деталі. При цьому собівартість відновлення одного корпусу склала 25% від ціни нової деталі, а очікуваний річний економічний ефект за умови річної програми ремонту 20 деталей може становити 166244,0 грн. Розроблені рекомендації та основні наукові положення дисертації використовуються на АТ «Мотор Січ», в навчальному процесі та науково-дослідній частині Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Williams J. C. Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components / J. C. Williams, R. R. Boyer // *Metals*. – Basel. – 2020. – Vol. 10. – No. 6. – 705 p.
2. ОСТ 1 90013-81. Сплави титанові. Марки. – Введ. 01.01.1982. – [Київ]: Держстандарт СРСР. – 1981. – 12 с.
3. Адаскін А. М. Матеріалознавство в машинобудуванні / А. М. Адаскін // Херсонський національний технічний університет. – Херсон. – 2013. – 612 с.
4. Єпіфанов С. В. Конструкція авіаційних газотурбінних двигунів : підручник / С. В. Єпіфанов, В. С. Чигрин. – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2023. – 320 с.
5. Інженерні основи функціонування і загальна будова аерокосмічної техніки/ В. С. Кривцов, Я. С. Карпов, М. М. Федотов. – Підручник для вищих навчальних закладів (напрямок «Авіація і космонавтика»). Ч. 1. – Х. : Нац. аерокосмічний ун-т «ХАІ». – 2002. – 468 с.
6. Інженерні основи функціонування і загальна будова аерокосмічної техніки / В. С. Кривцов, Я. С. Карпов, М. М. Федотов. – Підручник для вищих навчальних закладів (напрямок «Авіація і космонавтика»). Ч. 2. – Х. : Нац. аерокосмічний ун-т «ХАІ». – 2002. – 723 с.
7. Металознавство: підручник / О.М. Бялік, В.С. Черненко, В.М. Писаренко, Ю.М. Москаленко. – К.: «Політехніка» ІВЦ. – 2001. – 375 с.
8. Peters M. Titanium Alloys for Aerospace Applications / M. Peters, J. Kumpfert, C. H. Ward, C. Leyens // *Advanced Engineering Materials*. – Weinheim. – 2003. – Vol. 5. – No. 6. – P. 419–427.
9. Studies on Titanium Alloys for Aerospace Application / A. Gomez-Gallegos, P. Mandal, D. Gonzalez, [et al.] // *Defect and Diffusion Forum*. – 2018. – Vol. 385. – P. 419–423.

10. Santhosh R. Recent Developments in Heat Treatment of Beta Titanium Alloys for Aerospace Applications / R. Santhosh, M. Geetha, R. M. Nageswara // Transactions of the Indian Institute of Metals. – 2017. – Vol. 70. – P. 1681–1688.
11. Pushp P. Classification and applications of titanium and its alloys / P. Pushp, S. M. Dasharath, C. Arat // Materials Today: Proceedings. – 2022. – Vol. 54, Part 2. – P. 537–542.
12. Павленко Д. В. Розвиток наукових основ і удосконалення процесів виготовлення деталей газотурбінних двигунів з порошкових матеріалів із застосуванням інтенсивної пластичної деформації : дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском / Д. В. Павленко. – Запоріжжя : Нац. ун-т «Запорізька політехніка», – 2021. – 373 с.
13. A Review on Additive Manufacturing of Titanium Alloys for Aerospace Applications: Directed Energy Deposition and Beyond Ti-6Al-4V / Z. Liu, B. He, T. Lyu [et al.] // JOM. – 2021. – Vol. 73. – P. 1804–1818.
14. Srinivasan D. Recent Advances in Alloy Development for Metal Additive Manufacturing in Gas Turbine/Aerospace Applications: A Review / D. Srinivasan, K. Ananth // J Indian Inst Sci. – 2022. – Vol. 102. – P. 311–349.
15. Духота О. І. Проблемні питання використання титанових сплавів у вузлах тертя авіаційної техніки / О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К. : НАУ, 2008. – Вип. 49. – Т. 1. – С. 14–26.
16. Дмитріченко М. Ф. Триботехніка та основа надійності машин / М. Ф. Дмитріченко, Р. Г. Мнацаканов, О. О. Мікосянчик. – К. : ІНФОРМАВТОДОР, 2006. – 216 с.
17. Дворук В. І. Трибофізика: підручник / В. І. Дворук, В. А. Войтов. – Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – 2014. – 374 с.
18. Ahmed R. Book Chapter: Friction and Wear of Titanium Alloys / R. Ahmed, H. de Villiers-Lovelock // In: Friction, Lubrication, and Wear Technology / ed. G. E. Totten. – ASM International, 2017. – Vol. 18. – P. 502–508.

19. Research Progress in Electrospark Deposition Coatings on Titanium Alloy Surfaces: A Short Review / J. Wang, M. Zhang, S. Dai, L. Zhu // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13, № 8. – Article 1473.
20. Студент М. М. Модифікація поверхні алюмінієвих і титанових сплавів для підвищення їх зносостійкості та трибологічних характеристик / М. М. Студент, І. М. Погрелюк // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2021. – Т. 57, № 3. – С. 84–94.
21. Трибологічна поведінка поруватого титану після термічного оксидування / С. М. Лаврись, І. М. Погрелюк, О. Г. Лук'яненко, О. А. Джуган // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2021. – Т. 57, № 6. – С. 95–101.
22. Review of micro-arc oxidation of titanium alloys: Mechanism, properties and applications / G. Li, F. Ma, P. Liu [et al.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2023. – Vol. 948. – Article 169773.
23. Tribological and surface morphological characteristics of titanium alloys: a review / M.K. Gupta, H.E. Etri, M.E. Korkmaz [et al.] // *Archiv. Civ. Mech. Eng.* – 2022. – Vol. 22. – Article 72.
24. Comprehensive Review on Machining of Titanium Alloys / M. Hourmand, A. A. D. Sarhan, M. Sayuti, M. Hamdi // *Arab J Sci Eng.* – 2021. – Vol. 46. – P. 7087–7123.
25. Зносостійкість титанового сплаву ВТ1-0 з модифікованою поверхнею в умовах абразивного впливу / А. В. Рутковський, С. І. Маркович, С. О. Магопець, В. С. Маркович // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. – 2023. – Вип. 8(39), ч. II. – С. 41–47.
26. Review of Research on Improving Wear Resistance of Titanium Alloys / Y. Chen, H. Zhang, B. Wang [et al.] // *Coatings*. – 2024. – Vol. 14, № 7. – Article 786.
27. Defects as a root cause of fatigue failure of metallic components. III: Cavities, dents, corrosion pits, scratches / U. Zerbst, M. Madia, C. Klinger [et al.] // *Eng. Fract. Mech.* – 2019. – Vol. 97 (3). – P. 134–157.
28. Погребна Н. Е. Механічна стабільність матеріалів : навч. посіб. / Н. Е. Погребна, В. З. Куцова, Т. В. Котова. – Дніпро : НМетАУ, 2021. – 109 с.

29. Дмитриченко М. Ф. Триботехніка та основи надійності машин: навч. посіб. / М.Ф. Дмитриченко, Р.Г. Мнацаканов, О.О. Мікосянчик // – К.: ІНФОРМАВТОДОР, 2006. — 216 с.
30. Research on wear resistance coating of aircraft titanium alloy parts by cold spraying technology / W. Hu, S. Markovych, K. Tan [et al.] // *Aerospace Technic and Technology*. – Харків. – 2020. – № 6. – С. 51–56.
31. Організація та триботехнології авіаремонтного виробництва / А. П. Кудрін, О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, Г. М. Зайвенко // – К. : НАУ. – 2015. – 212 с.
32. Закалов О. В. Основи тертя і зношування в машинах: навч. посіб. / О. В. Закалов, І. О. Закалов // Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя. – Тернопіль. – 2011. – 322 с.
33. Марчук В. Є. Науково-методологічні основи підвищення зносостійкості робочих поверхонь деталей з текстурованою лунковою структурою в екстремальних умовах експлуатації : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.04 / В. Є. Марчук; Нац. авіац. ун-т. – Київ, 2017. – 460 с.
34. Erosion wear characteristics of the aero-compressor blades in full speed range / C.Li, G. Bin, J. Li, P. Yang // *Powder Technology*. – 2023. – Vol. 418. – Paper No. 116861.
35. Духота О. І. Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.04 – Тертя та зношування в машинах / О. І. Духота. – Київ : Нац. авіац. ун-т, – 2019. – 415 с.
36. Surface engineering design on alleviating fretting wear: a review / M.-H. Zhu, X.-Q. Fan, Z.-B. Cai [et al.] // *Surface Science and Technology*. – 2023. – Vol. 1. – P. 1–15.
37. Tribological behavior of grooves textured thrust cylindrical roller bearings under dry wear / Z. Pan, Z. Jin, Y. Zhang [et al.] // *Advances in Mechanical Engineering*. – 2021. – Vol. 13(12). – P. 1–12.

38. Хімічна корозія та захист металів: навч. посіб. / П. І. Стоєв, С. В. Литовченко, І. О. Гірка, В. Т. Грицина // ХНУ імені В.Н. Каразіна. – Харків. – 2019. – 216 с.
39. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування : монографія / Є. А. Фролов, С. І. Кравченко, С. В. Попов, С. М. Гнітько // ПолтНТУ. – Полтава. – 2019. – 204 с.
40. Вібраційна навантаженість та руйнування зубчастих передач вертолітних редукторів / О. І. Пилипенко, Д. М. Колесник, А. М. Березняк, В. М. Шоха // Вісник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – 2019. – Том 2, № 2. – С. 18–25.
41. Степаненко С. М. Опір руйнуванню елементів конструкцій авіаційних газотурбінних двигунів та енергоустановок при екстремальних умовах навантаження : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.09 – динаміка та міцність машин / С. М. Степаненко ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків, 2004. – 210 с.
42. Шляхи підтримання справності авіаційних двигунів для забезпечення застосування за призначенням парку літаків Повітряних Сил / А. Бондар, С. Устінов, Р. Агамова, О. Мартиросян // Вісник Державного науково-дослідного інституту авіації. – 2024. – № 20 (27). – С. 20–30.
43. Визначення факторів, які знижують показники надійності дисків ГТД та розробка заходів по їх підвищенню / В. І. Масягін, А. М. Григоренко, К. М. Конох, О. А. Хахалкіна // Наука та інновації. – 2021. – Том 3, № 65 – С. 50–60.
44. Качан О. Я. Модель процесу обробки кромки деталей авіакосмічної техніки вільним абразивом із застосуванням повітряних струменів / О. Я. Качан, С. О. Уланов // Космічні матеріали та технології. – 2024. – № 5. – С. 29–35.
45. Koul A. K. Fatigue Fracture of Aircraft Engine Compressor Disks / A. K. Koul, R. V. Dainty // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2022. – Vol. 22, № 5. – P. 1995–2004.

46. Гончар Н. В. Підвищення несучої здатності дисків компресорів газотурбінних двигунів шляхом вдосконалення технології їх фінішної обробки : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 – Технологія машинобудування / Н. В. Гончар. – Харків : Нац. Політ. ун-т «ХПІ», – 2010.
47. Лабунець В.Ф. Зносостійкість титанового сплаву, зміцненого керамічним композиційним покриттям в умовах фретинг-корозії / В. Ф. Лабунець, Ю. Б. Бурбела // Наукоємні технології. – Київ : нац. авіац. ун-т. – 2009. – Том 3, №3.
48. Madhav S. Failure Analysis of Compressor Blades of Aero-Engine / S. Madhav, M. Roy // Journal of Failure Analysis and Prevention. – Materials Park. – 2022. – Vol. 22. – P. 968–982.
49. Неманежин Є. Аналіз особливостей умов роботи сучасних лопаток газових турбін та огляд методів визначення параметрів їх високотемпературної міцності / Є. Неманежин // Вісник НТУ "ХПІ" Серія: "Динаміка та міцність машин". – Харків. – 2024. – №1. – С. 52–61.
50. Захист елементів двигунів транспортних засобів від окислення: технологічний аспект / Ю. В. Дзядикевич, О. Б. Сван, О. П. Захарчук [та ін.] // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр. – Кропивницький : ЦНТУ, 2023. – Вип. 7(38). – Ч. 1. – С. 120-127.
51. A unified fatigue reliability-based design optimization framework for aircraft turbine disk / L.-K. Song, G.-C. Bai, X.-Q. Li, J. Wen // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 152. – Article 106422.
52. Failure study of an aircraft engine high pressure turbine (HPT) first stage blade / M. García-Martínez, J.C.H. Gordillo, M. V. González [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2023. – Vol. 149. – Article 107251.
53. An Overview of Aircraft Accident Investigation and Component Failures / B. A. Miller, R. J. Shipley; R. J. Parrington; D. P. Dennies// ASM Handbooks. – 2021. – Vol. 11A. – P. 778 – 786.

54. Зорік Д. Технологія відновлення і ремонту деталей авіаційних двигунів : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 - Процеси фізико-технічної обробки / Д. Зорік. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т. ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2020. – 287 с.
55. Типові технологічні процеси відновлення авіаційної техніки: навч. посіб. / А.П. Кудрін, Г.А. Волосович, В.В. Лубяний [та ін.]. – К.: НАУ, 2008. – 243 с.
56. Дубовий О. М. Технологія напилення покриттів : підручник / О. М. Дубовий, А. М. Степанчук. – Миколаїв : НУК, 2007. – 236 с.
57. Кудрін А.П. Сучасні технології поверхневого зміцнення та відновлення деталей авіаційної техніки / А.П. Кудрін, В.Ф. Лабунець // Вісник Національного авіаційного університету. – 2002. – №3. – С. 59 – 62.
58. Gan J. A. Thermal spray forming of titanium and its alloys / J. A. Gan, C. C. Berndt // Titanium Powder Metallurgy. – 2015. – P. 425–446.
59. Study of the tribological properties of HVOF-sprayed ni-based coatings on Ti6Al4V titanium alloys / P. Du, C. Liu, H. Hu [et al.] // Coatings. – 2022. – Vol. 12, No. 12. – Article 1977.
60. HVOF Spray Performance Optimization Analysis and Experimental Research of WC–12Co Coating on Ti Alloy / X. Chen, C. Li., S. Li, [et al.] // Metals and Materials International. – 2023. – Vol. 29. – P. 3548–3565.
61. Сотніков Є. Г. Удосконалення складу газотермічних ущільнювальних покриттів деталей турбіни для підвищення ефективності газотурбінних двигунів : дис....канд. техн. наук : 05.02.01 «Матеріалознавство» / Є. Г. Сотніков // Запоріжжя. – 2018. – 193 с.
62. Effect of HVOF–sprayed nanostructured WC–10Co–4Cr coating on sliding wear and tensile–tensile fatigue properties of TC6 titanium alloy / C.Si, S. Li, L. Zhao [et al.] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2024. – Vol. 118. – Article 106463.
63. Effect of Plasma Spraying Process on Microstructure and Microhardness of Titanium Alloy Substrate / H. Zhou, F. Li, B. He [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2008. – Vol. 17. – P. 284–288.

64. Air plasma sprayed thermal barrier coatings on titanium alloy substrates / H. Zhou, F. Li, B. He, J. Wang, B. Sun // *Surf. Coat. Technol.* – 2007. – Vol. 201, – P. 7360–7367.
65. Коржик В. М. Стан і перспективи розвитку в Україні плазмово-дугових технологій отримання, обробки, з'єднання та 3D-друку виробів із новітніх матеріалів : стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 29 травня 2024 року / В. М. Коржик // *Вісник Національної академії наук України.* – 2024. – № 7. – С. 62–68.
66. Rakhadilov B. Creation of Bioceramic Coatings on the Surface of Ti–6Al–4V Alloy by Plasma Electrolytic Oxidation Followed by Gas Detonation Spraying / B. Rakhadilov, D. Baizhan // *Coatings.* – 2021. – Vol. 11, No. 12. – Article 1433.
67. Performance of plasma sprayed and detonation gun sprayed Cu–Ni–In coatings on Ti–6Al–4V under plain fatigue and fretting fatigue loading / B. Rajasekaran, S. G. S. Raman, S.V. Joshi, G. Sundararajan // *Surface & Coatings Technology.* – 2008. – Vol. 374. – P. 83–92.
68. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина I : навч. посіб. / О. Д. Рожков. – Дніпропетровськ : НМетАУ. – 2008. – 51 с.
69. Properties of gas detonation ceramic coatings and their effect on the osseointegration of titanium implants for bone defect replacement / N. I Klyui, V. S. Chorny, I. V. Zatovsky [et al.] // *Ceramics International.* – 2021. – Vol. 47, Iss. 18. – P. 25425–25439.
70. Olikier V. E. Structure and Properties of Detonation Coatings Based on γ -TiAl / V. E. Olikier // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics.* – 2000. – Vol. 39, No. 11–12. – P. 590–593.
71. Огляд результатів досліджень інженерії поверхні титанового сплаву Ti–6Al–4V / О. В. Тісов, А. О. Корнієнко, А. О. Юрчук, та ін. // *Проблеми тертя та зношування.* – 2018. – № 3. – С. 41–45.
72. Syrovatka V. Investigation of mechanical characteristics of detonation and plasma coatings from composite powder materials based on titanium for aircraft parts

- / V. Syrovatka // International Science Journal of Engineering & Agriculture. – 2025. – Vol. 4, No. 1. – P. 93–102.
- 73 Regular wear detonation coatings on titanium alloy VT-22 / M. Kindrachuk, N. Stebeletska, V. Kharchenko [et al.] // Problems of Friction and Wear. – 2024. – No. 1(102). – P. 52–61.
- 74 Данько К. А. Підвищення життєвого циклу деталей авіаційних двигунів технологічними методами: дис. ... к. т. н. : 05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки / К. А. Данько ; Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут". – 2019.
- 75 Study of the Tribological Properties of HVOF-Sprayed Ni-Based Coatings on Ti6Al4V Titanium Alloys / P. Du, C. Liu, H. Hu [et al.] // Coatings. – 2022. – Vol. 12, No. 12. – Article 1977.
- 76 Yilbas B.S. Residual stress analysis for HVOF Diamalloy 1005 coating on Ti–6Al–4V alloy / B.S. Yilbas, A.F.M. Arif // Surface and Coatings Technology. – 2007. – Vol. 202, No. 3. – P. 559–568.
- 77 Rocheville C.F. Device for treating the surface of a workpiece : пат. US № 3,100,724; опубл. 13.08.1963.
- 78 Alkhimov A.P. A Method of Cold Gas-Dynamic Deposition / A. P. Alkhimov, V. F. Kosarev, A. N. Papyrin // Sov. Phys. Dokl. – 1990. – Vol. 35, No. 12. – P. 1047–1049.
- 79 Alkimov A. P., Papyrin A. N., Kosarev V. F., Nesterovich N. I., Shushpanov M. M. Gas dynamic spraying method for applying a coating : пат. US № 5,302,414; опубл. 12.04.1994. – Reexamination certificate від 25.02.1997.
- 80 Alkimov A. P., Papyrin A. N., Kosarev V. F., Nesterovich N. I., Shushpanov M.M. Method and device for coating : пат. EP № 0484533; опубл. 25.01.1995.
- 81 On the Interaction of a Supersonic Gas Jet With a Substrate Under the Cold Spray Process / A. N. Papyrin, A. P. Alkhimov, V. F. Kosarev, S. V. Klinkov // Proceedings of International Thermal Spray Conference. – Singapore, 2001. – P. 423–431.

- 82 Karthikeyan J. Cold Spray Processing of Titanium Powder / J. Karthikeyan, A. Kay, J. Lindeman [et al.] // Thermal Spray: Surface Engineering via Applied Research. – ASM International, 2000. – P. 255–262.
- 83 From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying / T. Schmidt, H. Assadi, F. Gärtner [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2009. – Vol. 18. – P. 794–808.
- 84 Development of a generalized parameter window for cold spray deposition / H. Assadi, T. Schmidt, H. Richter, T. Klassen // Acta Materialia. – 2006. – Vol. 54, No. 3. – P. 729–742.
- 85 On Parameter Selection in Cold Spraying / H. Assadi, T. Schmidt, H. Richter [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2011. – Vol. 20, No. 6. – P. 1161–1176.
- 86 Gilmore D. L. Particle velocity and deposition efficiency in the cold spray process / D. L. Gilmore, R. C. Dykhuizen, R. A. Neiser [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 1999. – Vol. 8, No. 4. – P. 576–582.
- 87 Dykhuizen R.C. Gas dynamic principles of cold spray / R. C. Dykhuizen, M. F. Smith // J. Therm. Spray Technol. – 1998. – Vol. 7. – P. 205–212.
- 88 Current implementation status of cold spray technology: a short review / W. Sun, X. Chu, H. Lan [et al.] // Journal of Thermal Spray Technology. – 2022. – Vol. 31, № 4. – P. 848–865.
- 89 Cold gas dynamic spray technology: a comprehensive review of processing conditions for various technological developments till to date / R. N. Raoelison, Y. Xie, T. Sapanathan [et al.] // Additive Manufacturing. – 2018. – Vol. 19. – P. 134–159.
- 90 Supersonic Spray Technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.supersonicspray.com/> (Last accessed: 09.06.2025).
- 91 Dimet – Cold Spray Equipment Manufacturer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dimet.info/> (Last accessed: 09.06.2025).
- 92 Plasma Giken Co., Ltd. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.plasma.co.jp/en/> (Last accessed: 09.06.2025).

- 93 Impact Innovations GmbH – Cold Spray Solutions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://impact-innovations.com/>.
- 94 Pathak S. Cold Spray in the Realm of Additive Manufacturing / S. Pathak, G. C. Saha // – Springer. – 2020. – 312 p.
- 95 Cold spray coating: review of material systems and future perspectives / A. Moridi, S. M. Hassani-Gangaraj, M. Guagliano, M. Dao // Surface Engineering. – 2014. – Vol. 30, № 6. – P. 369–395.
- 96 Moridi A. Cold Spray Coating: Process Evaluation and Wealth of Applications; from Structural Repair to Bioengineering: dissertation ... PhD: 05.02.01 – Mechanical Engineering / A. Moridi ; Politecnico di Milano. – Milan, 2014. – 239 p.
- 97 A Materials Perspective / H. Assadi, H. Kreye, F. Gärtner // Acta Materialia. – 2016. – Vol. 116. – P. 382–407.
- 98 Cold spraying of ceramic coatings – a feasibility study / S. Ravanbakhsh, H. Assadi, H. Nekoomanesh [et al.] // Thermal Spray. – 2011. – P. 303–307.
- 99 Through-life engineering services: motivation, theory, and practice / L. Redding, R. Roy // Springer. – 2015. – 457 p.
- 100 Champagne V. K. Magnesium repair by cold spray / V. K Champagne, P. F. Leyman, D. J. Helfrich, Magnesium // ARL Technical Report ARL-TR-4438, 2008. – 34 p.
- 101 Champagne V. The Cold Spray Materials Deposition Process / V. Champagne. – Cambridge : Woodhead Publishing ; CRC Press, 2007. – P. 327–352.
- 102 Barbosa M. Cold spray deposition of titanium onto aluminium alloys / M. Barbosa // Dia Mundial dos Materiais. – Porto. – 2009. – 60 p.
- 103 Zahiri S. H. Elimination of porosity in directly fabricated titanium via cold gas dynamic spraying / S. H. Zahiri, C. Antonio, M. Jahedi // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209. – P. 922–929.
- 104 Li C.-J. Deposition characteristics of titanium coating in cold spraying / C.-J. Li, W.-Y. Li // Surface and Coatings Technology. – 2003. – Vol. 167. – P. 278–293.

- 105 Leyman P. F. Cold spray process development for the reclamation of the Apache helicopter mast support / P. F. Leyman, V. K. Champagne // ARL Technical Report ARL-TR-4922. – 2009. – 24 p.
- 106 Cold gas dynamic manufacturing: a non-thermal approach to freeform fabrication / J. Pattison, S. Celotto, R. Morgan [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2007. – Vol. 47, No. 3–4. – P. 627–634.
- 107 B1 Bomber-FEB panel repair by cold spray / C. Widener, R. Hrabe, B. James, V. Champagne // Cold Spray Action Team (CSAT) Meeting. – 2013.
- 108 Moog/Mid-America Aviation. Cold spray repair of the CH-47 accessory cover [Electronic resource] – 2013. – Available at: https://www.coldsprayteam.com/_files/ugd/0ebd9c_470317e54344456ba164cf0838d88a68.pdf
- 109 Cold spray repair of gas turbine engine fan cases / P. K. Koh, K. Loke, P. Cheang, C.T. Lee // Singapore Aerospace Technology & Engineering Conference. – Singapore. – 2012. – 276 p.
- 110 ОСТ 1 90013-81. Сплави титанові. Марки [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://evек.com.ua/files/OST1_90013-81.pdf.
- 111 Рожков О. Д. Технологія нанесення покриттів. Частина II: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 38 с.
- 112 ДСТУ 2639-94. Єдина система захисту від корозії та старіння. Покриття газотермічні. Метод визначення міцності зчеплення покриття з основою нормальним відривом в умовах температур до 1770 К. – Київ: Держстандарт України, 1995. – 20 с.
- 113 ДСТУ ISO 6507-1:2007. Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Ч. 1. Метод випробування (ISO 6507-1:2005, IDT), 1995.
- 114 Klinkov S. V. Measurements of cold spray deposition efficiency / S. V. Klinkov, V. F. Kosarev // Journal of Thermal Spray Technology. – 2006. – Vol. 15. – P. 364–371.
- 115 Anderson J. D. Modern compressible flow: with historical perspective. / J. D. Anderson //– 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2003. – 784 p.

- 116 Nastic A. Evaluation of Heat Transfer Transport Coefficient for Cold Spray Through Computational Fluid Dynamics and Particle In-Flight Temperature Measurement Using a High-Speed IR Camera / A. Nastic, B. Jodoin // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2018. – Vol. 27. – P. 1491–1502.
- 117 *Compressible Flow* / M.A. Saad // *Fluid Mechanics*. – Elsevier, 2012. – P. 729–778.
- 118 Nastic A. Cold Gas Dynamic Spray Impact: Metallic Bonding Pre-Requisites and Experimental Particle In-Flight Temperature Measurements: Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering / A. Nastic. – Ottawa, Canada: University of Ottawa, 2021. – 236 p.
- 119 Carling J. C. The Near Wall Jet of a Normally Impinging, Uniform, Axisymmetric, Supersonic Jet / J.C. Carling, B.L. Hunt // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1974. – Vol. 66, No. 1. – P. 159–176.
- 120 Alkhimov A. P. The Features of Cold Spray Nozzle Design / A. P. Alkhimov, V. F. Kosarev, S. V. Klinkov // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2001. – Vol. 10, No. 2. – P. 375–381.
- 121 Nastic A. The Influence of Feedstock Powder / A. Nastic, D. MacDonald, B. Jodoin // *Cold Spray in the Realm of Additive Manufacturing*. – Springer, Cham, 2020. – P. 33-85.
- 122 The Acceleration of Charged Nano-Particles in Gas Stream of Supersonic deLaval-Type Nozzle Coupled with Static Electric Field / T.-C. Jen, L. Pan, L. Li [et al.] // *Applied Thermal Engineering*. – 2006. – Vol. 26, No. 5–6. – P. 613–621.
- 123 Numerical Investigations on Cold Gas Dynamic Spray Process with Nano- and Microsize Particles / T.-C. Jen, L. Li, W. Cui [et al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 48, No. 21–22. – P. 4384–4396.
- 124 Theoretical and Experimental Particle Velocity in Cold Spray / V. K. Champagne, D. J. Helfritch, S. P. G. Dinavahi, P. F. Leyman // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2011. – Vol. 20, No. 3. – P. 425–431.

- 125 From Particle Acceleration to Impact and Bonding in Cold Spraying / T. Schmidt, H. Assadi, F. Gärtner, H. Richter [et al.] // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2009. – Vol. 18, No. 5–6. – P. 794–808.
- 126 Crowe C. T. Drag Coefficient of Particles in a Rocket Nozzle / C.T. Crowe // *AIAA Journal*. – 1967. – Vol. 5, No. 5. – P. 1021–1022.
- 127 Samareh B. A Three-Dimensional Analysis of the Cold Spray Process: The Effects of Substrate Location and Shape / B. Samareh, A. Dolatabadi // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2007. – Vol. 16, No. 5–6. – P. 634–642.
- 128 Assessment of CFD Modeling via Flow Visualization in Cold Spray Process / B. Samareh, O. Stier, V. Lüthen, A. Dolatabadi // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2009. – Vol. 18, No. 5–6. – P. 934–943.
- 129 Morsi S.A. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems / S.A. Morsi, A.J. Alexander // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1972. – Vol. 55, No. 2. – P. 193–208.
- 130 Development of Holistic Three-Dimensional Models for Cold Spray Supersonic Jet / S.H. Zahiri, T.D. Phan, S.H. Masood, M. Jahedi // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2014. – Vol. 23, No. 6. – P. 919–933.
- 131 Clift R. Bubbles, Drops, and Particles / R. Clift, J. R. Grace, M. E. Weber // New York : Dover Publications, 2013. – 400 p.
- 132 Numerical Investigations on the Effect of Total Pressure and Nozzle Divergent Length on the Flow Character and Particle Impact Velocity in Cold Spraying / S. Yin, M. Zhang, Z. Guo [et al.] // *Surf. Coatings Technol.* – 2013. – Vol. 232. – P. 290–297.
- 133 Numerical Simulation of the Cold Gas Dynamic Spray Process / M. Karimi, A. Fartaj, G. Rankin [et al.] // *J. Therm. Spray Technol.* – 2006. – Vol. 15, No. 4. – P. 518–523.
- 134 Henderson C. B. Drag Coefficients of Spheres in Continuum and Rarefied Flows / C. B. Henderson // *AIAA J.* – 1976. – Vol. 14, No. 6. – P. 707–708.
- 135 Effects of Spray Conditions on Coating Formation by the Kinetic Spray Process / T. Han, Z. Zhao, B.A. Gillispie, J.R. Smith // *J. Therm. Spray Technol.* – 2005. – Vol. 14, No. 3. – P. 373–383.

- 136 Gas Flow, Particle Acceleration, and Heat Transfer in Cold Spray: A Review / S. Yin, M. Meyer, W. Li [et al.] // *J. Therm. Spray Technol.* – 2016. – Vol. 25, No. 5. – P. 874–896.
- 137 Kavanau L. L. Heat Transfer from Spheres to a Rarefied Gas in Subsonic Flow / L. L. Kavanau, J. D. Drake. – Berkeley : California Univ., Inst. of Engineering Research, 1977. – 26 p.
- 138 Chadha S. Modelling Knudsen Number Effects in Suspension High Velocity Oxy Fuel Thermal Spray / S. Chadha, R. Jefferson-Loveday, T. Hussain // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 2020. – Vol. 152. – Article 119454.
- 139 Stoltenhoff T. An Analysis of the Cold Spray Process and Its Coatings / T. Stoltenhoff, H. Kreye, H. J. Richter // *J. Therm. Spray Technol.* – 2002. – Vol. 11, No. 4. – P. 542–550.
- 140 Whitaker S. Forced Convection Heat Transfer Correlations for Flow in Pipes, Past Flat Plates, Single Cylinders, Single Spheres, and for Flow in Packed Beds and Tube Bundles / S. Whitaker // *AIChE J.* – 1972. – Vol. 18, No. 2. – P. 361–371.
- 141 A Model for the Drag and Heat Transfer of Spheres in the Laminar Regime at High Temperature Differences / N. Ellendt, A. M. Lumanglas, S. I. Moqadam, L. Mädler // *Int. J. Therm. Sci.* – 2018. – Vol. 133. – P. 98–105.
- 142 Fiszdon J. K. Melting of Powder Grains in a Plasma Flame / J. K. Fiszdon // *Int. J. Heat Mass Transf.* – 1979. – Vol. 22, No. 5. – P. 749–761.
- 143 Cold Spray Additive Manufacturing and Repair: Fundamentals and Applications / S. Yin, P. Cavaliere, B. Aldwell [et al.] // *Addit. Manuf.* – 2018. – Vol. 21. – P. 628–650.
- 144 Шорінов О. В. Визначення енергетичних параметрів частинок порошку $Ni+Al_2O_3$ в надзвуковому соплі при газодинамічному напилюванні аналітичним методом / О. В. Шорінов, С. О. Поливяний // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні.* – 2022. – №2. – С. 64–70.
- 145 Shorinov O. Calculation of Velocity and Temperature of Nickel Powder Particles in a Supersonic Nozzle During Low-Pressure Cold Spraying / O. Shorinov, S. Polyvianyi, A. Dolmatov // In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds)

Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2022. Lecture Notes in Networks and Systems. – Springer, Cham. – 2023. –Vol. 657.

146 Particle temperature effect in cold spray: A study of soft particle deposition on hard substrate / A. Nastic, B. Jodoin, D. Poirier, J.-G. Legoux // Surface and Coatings Technology. – 2021. – Vol. 406. – Article 126735.

147 Study on Process Optimization of Cold Gas Spraying / H. Tabbara, S. Gu, D. G. McCartney [et al.] // J. Therm. Spray Technol. – 2011. – Vol. 20. – P. 608–620.

148 CFD Simulations of Feeder Tube Pressure Oscillations and Prediction of Clogging in Cold Spray Nozzles / P. Liebersbach, A. Foelsche, V. K. Champagne [et al.] // J. Therm. Spray Technol. – 2020. – Vol. 29. – P. 400–412.

149 Lupoi R. Powder stream characteristics in cold spray nozzles / R. Lupoi, W. O'Neill // Surf. Coatings Technol. – 2011. – Vol. 206. – P. 1069–1076.

150 Meyer M. An Analysis of the Particulate Flow in Cold Spray Nozzles / M. Meyer, R. Lupoi // Mech. Sci. – 2015. – Vol. 6. – P. 127–136.

151 T. Raja jayasingh, T. Raja jeyaseelan, C. Kannan, and M. Ganesh Karthikeyan, n.d., www.ijmer.com. Accessed 24 July 2020.

152 Dinavahi S. Comparison of Empirical and Theoretical Computations of Velocity for a Cold Spray Nozzle / V. K. Champagne Jr., D. Helfritch // Proceedings of the DoD High Performance Computing Modernization Program Users Group Conference (HPCMP-UGC), 2009. – July 2009.

153 Vadla S. R. Analysis of Jet Characteristics Among Various Cold Spray Nozzles / S. R. Vadla, J. Doom // J. Therm. Spray Eng. – 2018. – T. 1, № 1. – P. 24–31.

154 CFD Study of Effects of Geometry Variations on Flow in a Nozzle / Y. Yu, M. Shademan, R. M. Barron, R. Balachandar // Eng. Appl. Comput. Fluid Mech. – 2012. – T. 6, № 3. – P. 412–425.

155 Powder Properties and Processing Conditions Affecting Cold Spray Deposition / A. Silvello, P. D. Cavaliere, V. Albaladejo [et al.] // Coatings. – 2020. – T. 10, № 2. – P. 91.

- 156 Microstructural analysis of Ti–6Al–4V powder for cold gas dynamic spray applications / A. M. Birt, V. K. Champagne, R. D. Sisson, D. Apelian // *Adv. Powder Technol.* – 2015. – Т. 26. – P. 1335–1347.
- 157 Shorinov O. V. Simulation of gas flow with nanocomposite powders in a supersonic nozzle / O. V. Shorinov, S. A. Polyviany // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – 2022. – Т. 44, № 5. – P. 601–611.
- 158 Dolmatov A. I. Interaction of solid particles from a gas stream with the surface of a flat nozzle / A. I. Dolmatov, S. A. Polyviany // *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii.* – 2021. – Т. 43, № 3. – P. 319–328.
- 159 Шорінов О. В. Вплив діаметру частинок порошку нікелю на їх швидкість і температуру при холодному газодинамічному напилюванні / О. В. Шорінов, С. О. Поливяний // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* – 2021. – № 4(173), спецвипуск 1. – С. 110–116.
- 160 Thermal spray sensors. <https://spraysensors.tecnar.com/cold-spray/coldspray-meter/> (Last accessed: 09.06.2025).
- 161 Celik I. Experimental analysis of anodic coating process parameters of Al5754 alloy by response surface method / I. Celik, F. Erdemir, I. Coruhlu // *Surf. Topography: Metrology and Properties.* – 2023. – Т. 11. – Article 025024.
- 162 Modeling of erosion response of cold-sprayed In718-Ni composite coating using full factorial design / E. Verna, R. Biagi, M. Kazasidis [et al.] // *Coatings.* – 2020. – Т. 10. – P. 335.
- 163 Optimisation of corrosion behaviour and hardness of Ni-B₄C composite coated AZ31 Mg alloy using RSM / G. Venses, M. Sivapragash, T. S. Kumar, F. M. T. Rex // *Surf. Topography: Metrology and Properties.* – 2022. – Т. 10. – Article 015033.
- 164 Montgomery D. C. *Design and Analysis of Experiments.* / D. C. Montgomery. – 8th ed. – Wiley, 2013. – 757 p.
- 165 Breig S. J. M. Response surface methodology: A review on its applications and challenges in microbial cultures / S. J. M Breig, K. J. K. Luti // *Mater. Today: Proc.* – 2020.

- 166 Design of experiments in thermal spraying: A review / C. Pierlot, L. Pawlowski, M. Bigan, P. Chagnon // *Surface and Coatings Technology*. – 2008. – T. 202, № 18. – P. 4483–4490.
- 167 Optimization of cold spray process parameters to maximize adhesion and deposition efficiency of Ni+Al₂O₃ coatings / O. Shorinov, A. Dolmatov, S. Polyviany, K. Balushok // *Materials Research Express*. – 2023. – Vol. 10, No. 12. – P. 126401.
- 168 Volkov A. Deposition of titanium-containing coatings by low-pressure cold spraying / A. Volkov, O. Shorinov, S. Polyviany // *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*. – 2021 / ed. M. Nechyporuk et al. – Springer, 2022. – T. 367. – P. 565–574.
- 169 Imbriglio S. I. Factors affecting adhesion in metal/ceramic interfaces created by cold spray / S. I. Imbriglio, R. R. Chromik // *J. Therm. Spray Technol.* – 2021. – Vol. 30. – P. 1703–1723.
- 170 Influence of particle velocity when propelled using N₂ or N₂-He mixed gas on the properties of cold-sprayed Ti6Al4V coatings / A. W.-Y. Tan, J. Y. Lek, W. Sun [et al.] // *Coatings*. – 2018. – Vol. 8. – P. 327.
- 171 Effect of gas pressure and temperature on stereometric properties of Al+Al₂O₃ composite coatings deposited by LPCS method / M. Winnicki, T. Piwowarczyk, A. Małachowska, A. Ambroziak // *Arch. Metall. Mater.* – 2014. – Vol. 59. – P. 879–886.
- 172 Effect of processing conditions on the mechanical performance of stainless steel cold sprayed coatings / R. Cortés, M. A. Garrido, A. Rico [et al.] // *Surf. Coat. Technol.* – 2020. – Vol. 394. – P. 125874.
- 173 Дослідження впливу температури газу процесу холодного газодинамічного напилювання на адгезійну міцність нікелевмісних покриттів / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливяний, К. Б. Балушок // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2023. – № 4, спецвипуск 2 (190). – С. 82–88.
- 174 Helfritch D. Optimal particle size for the cold spray process / D. Helfritch, V. Champagne // *Thermal Spray*. – 2006. – P. 103–108.

- 175 King P. C. Relationship between particle size and deformation in the cold spray process / P. King, M. Jahedi // *Appl. Surf. Sci.* – 2010. – Vol. 256. – P. 1735–1738.
- 176 Kinetic spray coatings / T.H. Van Steenkiste, J.R. Smith, R.E. Teets [et al.] // *Surf. Coat. Technol.* – 1999. – Vol. 111. – P. 62–71.
- 177 Шорінов О. В. Експериментальне дослідження впливу параметрів газодинамічного напилювання на коефіцієнт використання порошку / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливняний // *Авіаційно-космічна техніка і технологія.* – 2022. – № 4, спецвипуск 2 (182). – С. 123–128.
- 178 Шорінов О. В. Дослідження пористості та коефіцієнту використання порошку на основі нікелю холодним газодинамічним напилюванням / А. І. Долматов, С. О. Поливняний // *XXVII – Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей.* – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2022. – 62 с.
- 179 Shorinov O. Experimental Study of the Porosity of Ni + Zn + Al₂O₃ Coatings Deposited by Low-Pressure Cold Spraying / O. Shorinov, K. Balushok // *Advances in Mechanical and Power Engineering II.* – Springer, Cham, 2025. – P. 93–102.
- 180 Formation of persistent dislocation loops by ultra-high strain-rate deformation during cold spraying / C. Borchers, F. Gärtner, T. Stoltenhoff, H. Kreye // *Acta Mater.* – 2005. – Vol. 53. – P. 2991–3000.
- 181 Microstructure and nanohardness of cold-sprayed coatings: electron backscattered diffraction and nanoindentation studies / Y. Zou, D. Goldbaum, J. A. Szpunar, S. Yue // *Scr. Mater.* – 2010. – Vol. 62. – P. 395–398.
- 182 Шорінов О. В. Оброблення газотермічних покриттів різанням : навч. посіб. / О. В. Шорінов, А. О. Волков, І. В. Зорік. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2024. – 59 с.
- 183 Нанесення покриття : навч. посіб. / В. М. Корж, В. Д. Кузнєцов, Ю. С. Борисов, К. А. Ющенко ; за ред. К. А. Ющенко. – Київ : Арістей, 2005. – 204 с.
- 184 Davis, J. R. Handbook of Thermal Spray Technology / J. R. Davis. – Materials Park (OH, USA) : ASM International, 2004. – 338 p.

- 185 Харламов Ю. О. Обробка деталей при відновленні і зміцненні : навч. посіб. / Ю. О. Харламов [та ін.]. – Луганськ : СЛУ ім. В. Даля, 2007. – 500 с.
- 186 Нанесення покриттів на деталі авіаційних двигунів газотермічними методами : монографія / А. І. Долматов, К. Б. Балушок, С. О. Поливняний [та ін.]. – Запоріжжя : ПАТ «Мотор Січ», 2020. – 516 с.
- 187 Забезпечення адгезійної міцності покриттів на основі нікелю, отриманих холодним газодинамічним напилюванням / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливняний, К. Б. Балушок // Матеріали XXVIII Міжнародного конгресу двигунобудівників. – Харків : ХАІ, 2023. – С. 39.
- 188 Шорінов О. В. Відновлення пошкоджених деталей ГТД з титанових сплавів газотермічними методами / О. В. Шорінов, С. О. Поливняний // XXVI Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «Харків. авіац. ін-т», 2021. – 93 с.
- 189 Шорінов О. В. Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей : пат. на корисну модель № 156794 Україна, МПК (2006) C23C 24/04 / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливняний ; заявник і патентовласник Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – № u202306080; заявл. 14.12.2023; опубл. 07.08.2024, Бюл. № 32/2024.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

1) Дослідження впливу температури газу процесу холодного газодинамічного напилювання на адгезійну міцність нікелевмісних покриттів / О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливяний, К. Б. Балущок. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023, № 4, спецвипуск 2 (190). С. 82-88. DOI: 10.32620/akt.2023.4sup2.11

2) Шорінов О. В., Долматов А. І., Поливяний С. О. Експериментальне дослідження впливу параметрів газодинамічного напилювання на коефіцієнт використання порошку / *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2022, №4 спецвипуск 2 (182). С. 123–128. DOI: 10.32620/akt.2022.4sup2.19

3) Шорінов О. В., Поливяний С. О. Визначення енергетичних параметрів частинок порошку Ni+Al₂O₃ в надзвуковому соплі при газодинамічному напилюванні аналітичним методом / *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2022, №2. С. 64–70. DOI: 10.15588/1607-6885-2022-2-11

4) Шорінов, О. В., Поливяний, С. О. Вплив діаметру частинок порошку нікелю на їх швидкість і температуру при холодному газодинамічному напилюванні [Текст] / О. В. Шорінов, С. О. Поливяний // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2021, № 4(173) спецвипуск 1, С. 110–116. DOI: 10.32620/akt.2021.4sup1.15

Статті у наукових періодичних виданнях включених до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України, або у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

5) Shorinov, O., Dolmatov, A., Polyviany, S., Balushok, K. Optimization of cold spray process parameters to maximize adhesion and deposition efficiency of Ni+Al₂O₃ coatings. *Materials Research Express*, 2023, 10(12), p. 126401. DOI: 10.1088/2053-1591/ad11fd (**Scopus, Q2**)

6) Shorinov, O. V., Polyviany, S. A. Simulation of gas flow with nanocomposite powders in a supersonic nozzle. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2022, 44(5), pp. 601–611. DOI: 10.15407/mfint.44.05.0601? (**категорія «А», Scopus, Q3**)

7) Dolmatov, A. I., Polyviany, S. A. Interaction of solid particles from a gas stream with the surface of a flat nozzle. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, 2021, 43(3), pp. 319–328. DOI: 10.15407/mfint.43.03.0319 (**категорія «А», Scopus, Q3**)

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8) Shorinov, O., Polyviany, S., Dolmatov, A. Calculation of Velocity and Temperature of Nickel Powder Particles in a Supersonic Nozzle During Low-Pressure Cold Spraying. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2022. ICTM 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 657. Springer, Cham (2023). DOI: 10.1007/978-3-031-36201-9_30 (**Scopus**)

9) Volkov, A., Shorinov, O., Polyviany, S. Deposition of titanium-containing coatings by low-pressure cold spraying. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds.) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – ICTM 2021, Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 367, pp. 565–574. Springer, Cham (2022). DOI: 10.1007/978-3-030-94259-5_48 (**Scopus**)

10) Шорінов О. В., Долматов А. І., Поливяний С. О., Балушок К. Б. Забезпечення адгезійної міцності покриттів на основі нікелю, отриманих холодним газодинамічним напилюванням / Матеріали XXVIII Міжнародного конгресу двигунобудівників – Харків, ХАІ, 2023, с. 39
<https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/5575>

11) Шорінов О. В., Долматов А. І., Поливяний С. О. Дослідження пористості та коефіцієнту використання порошку на основі нікелю холодним

газодинамічним напилюванням / XXVII – Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2022 – 62 с.
<https://dspace.library.khai.edu/xmlui/handle/123456789/3000>

12) О. В. Шорінов, С. О. Поливняний. Відновлення пошкоджених деталей ГТД з титанових сплавів газотермічними методами / XXVI – Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2021 – 93 с.
https://library.khai.edu/library/fulltexts/doc/Tesis_2021.pdf

Список публікацій, які додатково відображають наукові результати дисертації:

13) Спосіб відновлення зношених поверхонь деталей. Патент на корисну модель 156794 Україна, МПК(2006) С 23 С 24/04. – О. В. Шорінов, А. І. Долматов, С. О. Поливняний; заявник і патентовласник Національній аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»; – № u2023 06080; заявл. 14.12.2023; опубл. 07.08.2024, Бюл. № 32/2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1813588/> .

ДОДАТОК Б

Акти про використання результатів

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. ректора

Національного аерокосмічного
університету ім. М. С. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

Олександр ЛИТВИНОВ

« 2025 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії Поливяного Сергія Олександровича «Удосконалення технології формування покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням» в навчальному процесі та в науково-дослідній частині Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

Комісія у складі директора центра якості освіти, ліцензування та акредитації Дармофал Е. А., декана факультету авіаційних двигунів (№ 2), к.т.н., доцента Широкого Ю. В., завідувача кафедри технології виробництва авіаційних двигунів (№ 204), к.т.н., доцента Нижника С. М., склала цей акт про впровадження результатів дисертаційної роботи на здобуття ступеня доктора філософії Поливяного С. О. в навчальний процес кафедри № 204 при викладанні дисциплін:

- «Технологія двигунобудування» для здобувачів освіти рівня бакалавр за ОПП «Авіаційні двигуни та енергетичні установки»;
- «Технології ремонту авіаційних двигунів і енергетичних установок» для здобувачів освіти рівня магістр за ОПП і ОНП «Авіаційні двигуни та енергетичні установки»

та в науково-дослідну частину університету у вигляді науково-технічної бази, яка використовується під час виконання науково-дослідних робіт.

Директор центра якості освіти,
ліцензування та акредитації



Елеонора ДАРМОФАЛ

Декан факультету авіаційних двигунів (№ 2)



Юрій ШИРОКИЙ

Завідувач кафедри технології
виробництва авіаційних двигунів (№ 204)



Сергій НИЖНИК

ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер

АТ «Мотор Січ»


 Костянтин БАЛУШОК
 «__» _____ 2025 р.
Акт

про використання результатів дисертаційної роботи
 Поливяного Сергія Олександровича «Удосконалення технології формування
 покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним
 напилюванням»

Цей акт укладено комісією у наступному складі.

Голова комісії: Головний металург Олександр СЕЛІВЕРСТОВ

членів комісії: Начальник УГТ Ігор ЗОБЕНЬКО

Головний конструктор по Юрій БАСОВ
 серійним виробам

Комісія підтверджує, що на наше підприємство передано матеріали, в яких наведено наступні результати дисертаційної роботи Поливяного С. О.:

- рекомендації щодо вибору режимних параметрів процесу холодного газодинамічного напилювання покриттів з композиційної порошкової суміші на основі нікелю з додаванням оксиду алюмінію для формування захисних і відновлювальних покриттів на деталях з титанових сплавів;
- рекомендації щодо ведення технологічного процесу відновлення пошкоджених поверхонь деталей з титанових сплавів.

Результати дисертаційної роботи було використано на АТ «Мотор Січ» при відновленні розмірів зношеної поверхні корпусу сателіту з титанового сплаву.

Комісія підтверджує, що вказані вище результати є важливими рішеннями науково-технічного завдання з подовження ресурсних показників деталей авіаційних двигунів з титанових сплавів за рахунок удосконалення технології нанесення покриттів холодним газодинамічним напилюванням та можуть бути використані під час проектування технологічних процесів та проведення ремонтних і відновлювальних робіт пошкоджених деталей.

Голова комісії:

Члени комісії:


 Олександр СЕЛІВЕРСТОВ
 Ігор ЗОБЕНЬКО
 Юрій БАСОВ