

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації
Тань Куна на тему «Development of supersonic nozzles for cold spraying» («Розроблення
надзвукових сопел для холодного газодинамічного напилювання»), поданої на здобуття
наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за
спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка**

На засіданні кафедри технології виробництва авіаційних двигунів (№204) за участі: канд. техн. наук, доцента, в.о. зав. кафедри Нижника С. М.; канд. техн. наук, доцента, проф. кафедри Третьяка В. В.; канд. техн. наук, доцента, проф. кафедри Некрасова О. Д.; канд. техн. наук, доцента, доц. кафедри Зоріка І. В.; канд. техн. наук, доцента, доц. кафедри Горбачова О. О.; канд. техн. наук, доцента, проф. кафедри Куріна М. О.; канд. техн. наук, доц. кафедри Невешкіна Ю. О.; канд. техн. наук, доц. кафедри Калініченко М. Ю.; канд. техн. наук, доц. кафедри Шорінова О. В.; старшого викладача Онопченко А. В.; асистента Волкова А. О.; д-р техн. наук, професора, завідувача кафедри конструкції авіаційних двигунів (№203) Єпіфанова С. В.; д-р техн. наук, професора, професора каф. технології виробництва літальних апаратів (№104) Воробйова Ю. А.; канд. техн. наук, доцента, декана факультету авіаційних двигунів Широкого Ю. В.; канд. техн. наук, доцента, доцента каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем (№202) Бреуса А. О., відбулася публічна презентація дисертаційної роботи Тань Куна на тему «Development of supersonic nozzles for cold spraying» («Розроблення надзвукових сопел для холодного газодинамічного напилювання»).

На підставі обговорення змісту презентації дисертаційної роботи ухвалено висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації (результати голосування – одноголосно).

1. Актуальність теми дослідження.

Дисертаційна робота спрямовано на вирішення важливої проблеми відновлення й ремонту деталей авіаційної техніки. Розроблення нових технічних рішень відновлення й ремонту є актуальним завданням світового рівня і визначається трьома аспектами: підвищенням ресурсу та довговічності техніки, зменшенням прямих і непрямих втрат внаслідок критичних пошкоджень, а також збереженням металевих фондів. Відновлення деталей методами газотермічного напилювання є одним з можливих технологічних прийомів збільшення ресурсу деталей авіаційної техніки цивільного і військового призначення, в тому числі таких, що вважаються непридатними для ремонту і потребують повної заміни.

Перспективним методом формування захисних і відновлювальних покриттів є холодне газодинамічне напилювання. Наразі технологія успішно використовується для ремонту корпусних деталей з алюмінієвих і магнієвих сплавів як в світовій практиці, так і в вітчизняній. Проте існує ряд обмежень щодо поверхонь, на які покриття можуть бути напилені. Так, зараз напилювання покриттів на внутрішні та важкодоступні поверхні не може бути реалізовано через наявні технічні та технологічні обмеження існуючого обладнання для напилювання, зокрема надзвукових сопел, що використовуються для прискорення газового потоку з порошком.

Дослідження процесів прискорення частинок порошку в каналах сопел, а також процесів, що протікають в зоні контакту частинки та підкладки при високошвидкісному

зіткненні, безумовно, є важливим і необхідним етапом при вдосконалення існуючих сопел, розробленні нових конструкцій, зокрема таких, які можуть бути використані для напилювання покриттів на внутрішні та важкодоступні поверхні, а також оптимізації режимів напилювання при розробленні технологічних рекомендацій з напилювання покриттів необхідної якості з високою продуктивністю процесу.

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

Отримані автором результати дисертації виконано на кафедрі технології виробництва авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» при виконанні держбюджетної НДР Міністерства освіти і науки України: «Розроблення комплексної технології відновлення й ремонту деталей авіаційної (вертолітної) техніки холодним газодинамічним напилюванням з наступною обробкою різанням» (№ ДР 0122U001341) впродовж 2020-2022 рр.

3. Наукова новизна отриманих результатів.

1) Уперше запропоновано метод профілювання надзвукових одно- та багатоканальних поворотних сопел для холодного газодинамічного напилювання покриттів на внутрішні та важкодоступні поверхні, яке забезпечує необхідні значення швидкості частинок порошку на виході з сопла для їх зчеплення з підкладкою при повороті потоку на 90° .

2) Уперше за результатами чисельного моделювання одержано залежності температурно-швидкісних характеристик частинок порошку на виході з поворотного сопла від матеріалу частинок, їх розміру, температури та тиску газу на вході в сопло.

3) Уперше запропоновано підхід до призначення режимів холодного газодинамічного напилювання, заснований на плануванні багатofакторного експерименту, методології поверхні відгуку і GA+BPNN, який дозволяє призначати технологічні параметри напилювання покриттів, що забезпечують досягнення частинками порошку швидкості, необхідної для їх зчеплення з підкладкою.

4) Уперше на основі чисельного моделювання та методології планування багатofакторного експерименту отримано залежності пористості від швидкості частинки, її температури, та температури підкладки в досліджуваних діапазонах значень.

4. Теоретичне та практичне значення результатів роботи.

Результати, отримані у дисертаційному дослідженні, можуть бути використані при розв'язуванні широкого класу практичних задач при розробленні технологій та технологічних рекомендацій з напилювання захисних і відновлювальних покриттів, зокрема:

- запропонований метод профілювання поворотного надзвукового сопла для холодного газодинамічного напилювання дозволяє визначити геометричні параметри сопла за заданими характеристиками використаного порошкового матеріалу, тиску та температури газу на вході в сопло;

- виявлені особливості впливу матеріалу частинок порошку, їх розміру, початкових значень температури та тиску газу на температуру та швидкість частинок на виході з сопла, розширюють уявлення про закономірності процесів газодинаміки двофазного потоку в надзвукових соплах для холодного газодинамічного напилювання;

- результати дослідження процесів прискорення частинок порошку в надзвукових соплах та високошвидкісного зіткнення частинок з підкладкою створюють теоретичну базу

для вдосконалення моделей цих процесів, проектування та створення обладнання для холодного газодинамічного напилювання;

- запропоновані в дисертаційній роботі підходи щодо призначення режимів напилювання можуть бути використані для оптимізації параметрів холодного газодинамічного напилювання з метою керування та забезпечення заданих характеристик покриттів.

Результати дисертаційної роботи з розроблення надзвукових сопел для напилювання та науково-обґрунтовані рекомендації з вибору режимів напилювання можуть бути впроваджені в науково-дослідні установи, виробничі та ремонтні підприємства, які займаються дослідженнями процесів холодного газодинамічного напилювання та практичним застосуванням технології для формування захисних і відновлювальних покриттів.

5. Апробація/використання результатів дисертації.

Результати дослідження апробовані на наступних міжнародних конференціях, праці яких індексуються у н.м.б.д. Scopus:

1) Integrated computer technologies in mechanical engineering (ICTM). ICTM 2021 and ICTM 2023;

2) International Conference on Mechanical Engineering and Materials (ICMEM2020);

3) International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM2021 and AIAM2023);

4) Відкрита науково-практична студентська конференція факультету авіаційних двигунів (ФАД) «Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки», 2020.

6. Дотримання принципів академічної доброчесності.

За результатами науково-технічної експертизи дисертація Тань Куна визнана оригінальною роботою, яка виконана самостійно і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Зміст основних розділів дисертації перевірено 12.06.2024 р. на наявність текстових запозичень в системі «UNICHECK», в порівнянні з файлами бібліотеки корпоративного облікового запису Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Текст рукопису дисертаційної роботи не містить ознак академічного шахрайства.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

За результатами досліджень опубліковано 20 робіт, у тому числі:

1) 5 статей 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 (квартиль – Q3);

2) 8 статей у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України (категорія Б);

3) 5 матеріалів, що були представлені на міжнародних конференціях, які індексуються у науково-метричній базі даних Scopus,

4) 2 матеріали в збірниках тез доповідей вітчизняних конференцій.

Статі 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:

1. Kun, T., Jie, H. W., Markovych, S., & Wang, Y. Dimet Laval nozzle expansion section analysis and optimization. *Journal of Engineering Sciences*, 2021, 8(2): F6-F10. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(2\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(2).f2). (Scopus)

У роботі здобувачем виконано аналіз літератури та дослідження впливу довжини розширної частини сопла установки газодинамічного напилювання типу ДИМЕТ на характеристики прискорення різних частинок.

2. Kun, T., Jie, H. W., Markovych, S., & Wang, Y. Optimization of cold spray nozzles based on the response surface methodology. *Journal of Engineering Sciences*, 2024, 11(1): F1-F11. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).f1](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).f1). (Scopus)

У роботі здобувачем виконано планування чисельного дослідження та аналіз отриманих результатів з використанням методології поверхні відгуку.

3. Hu, W. J., Tan, K., Markovych, S., & Liu, X. L. Study of a cold spray nozzle throat on acceleration characteristics via CFD. *Journal of Engineering Sciences*, 2021, 8: 19-24. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2021.8\(1\).f3](https://doi.org/10.21272/jes.2021.8(1).f3). (Scopus)

У роботі здобувачем побудовано модель зіткнення однієї частинки з підкладкою, задано початкові та граничні умови.

4. Hu, W., Tan, K., Markovych, S., & Cao, T. Research on structure and technological parameters of multi-channel cold spraying nozzle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 5(1(113)):6-14. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.242707>. (Scopus, SJR=0.402, Q3)

У роботі здобувачем виконано планування дослідження та побудовано модель багатоканального сопла.

5. W. J. Hu, K. Tan, S. Markovych, T. T. Cao, and X. L. Liu. Research on the Adhesive Mechanism of Al + Ti Mixed Powders Deposited on Ti6Al4V Substrate by CS Using Abaqus/Explicit. *Metallofiz. Noveishie Tekhnol*, 2022, 44(5):613-621. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.05.0613>. (Scopus, SJR=0.402, Q3)

У роботі здобувачем виконано моделювання процесу високошвидкісної взаємодії численних частинок з підкладкою з використанням алгоритму SPH.

Статі у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України (категорія Б):

6. Tan, K., Markovych, S., Hu, W., Shorinov, O., & Wang, Y. R. Review of manufacturing and repair of aircraft and engine parts based on cold spraying technology and additive manufacturing technology. *Aerospace Technic and Technology*, 2020 (3): 53-70. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2020.3.06>.

У роботі здобувачем проаналізовано можливості використання технології холодного газодинамічного напилювання як адитивного методу виробництва та виконано аналіз можливостей використання газодинамічного напилювання в аерокосмічній галузі.

7. Tan, K., Markovych, S., Hu, W., Shorinov, O., & Wang, YR. Review of application and research based on cold spray coating materials. *Aerospace Technic and Technology*, 2021 (1): 47-59. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2021.1.05>.

У роботі здобувачем виконано аналіз порошкових матеріалів для холодного газодинамічного напилювання та їх сфери застосування.

8. Tan, K., Hu, W., Shorinov, O., & Wang, YR. Simulating multi-particle deposition based on CEL method: studying the effects of particle and substrate temperature on deposition. *Aerospace Technic and Technology*, 2024, 1(193): 64-75. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2024.1.06>.

У роботі здобувачем виконано моделювання процесу зіткнення численних частинок порошку Al6061 з використанням алгоритму CEL; досліджено вплив температури частинок та підкладки на процес напилювання, а також формування пористості покриття.

9. Tan, K. Analysis of spray particles entrance of Right-angle cold spray nozzle based on CFD. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2023, 7(3(99)): F1-F11. DOI: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2023.7.3.292244>.

У роботі здобувачем виконано аналіз геометрії каналу сопла на прискорення частинок порошку; виконано оптимізацію режимів напилювання; розроблено конструкцію багатоканального сопла для холодного газодинамічного напилювання.

10. Tan, K. Numerical Study on Simulating the Deposition Process of Cold Spray Multi-Particle Al-6061 based on CEL Method. *Mechanics and Advanced Technologies*, 2024, 8(1(100)). DOI: [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.1\(100\).295144](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2024.8.1(100).295144).

У роботі здобувачем виконано моделювання процесу напилювання численних частинок порошку з використанням алгоритму CEL; досліджено вплив параметрів холодного газодинамічного напилювання на процес формування покриття.

11. Tan, K., Hu, W., Shorinov, O., & Wang, YR. Multi-parameter coupled optimization of Al6061 coating porosity based on the response surface method. *Aerospace Technic and Technology*, 2024, 3(195): 59-67. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2024.3.05>.

У роботі здобувачем виконано багатофакторний аналіз з метою оптимізації пористості покриття Al6061 методом чисельного моделювання.

12. Hu, W., Markovych, S., Tan, K., Shorinov, O., & Cao, T. Research on wear resistance coating of aircraft titanium alloy parts by cold spraying technology. *Aerospace Technic and Technology*, 2020, (6): 61-71. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2020.6.07>.

У роботі здобувачем виконано аналіз можливостей використання технології холодного газодинамічного напилювання для формування титанових покриттів.

13. Hu, W., Markovych, S., Tan, K., Shorinov, O., & Cao, T. Surface repair of aircraft titanium alloy parts by cold spraying technology. *Aerospace Technic and Technology*, 2020, (3): 30-42. DOI: <https://doi.org/10.32620/akt.2020.3.04>.

У роботі здобувачем виконано аналіз робіт, присвячених використанню технології холодного газодинамічного напилювання для ремонту деталей авіаційної техніки.

Статті, що були представлені на міжнародних конференціях, які індексуються у науково-метричній базі даних Scopus:

14) Tan Kun. Analysis of particle parameters of multi-channel mixed cross-section right-angle cold spray nozzle structure. *Integrated computer technologies in mechanical engineering (ICTM). ICTM 2023. Lecture Notes in Networks and Systems, LNNS. 1008, pp. 52–65, 2024, Kharkiv, Ukraine.* DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_5.

У роботі здобувачем розроблено багатоканальне прямокутне сопло для напилювання різних порошків.

15) Tan, K., Markovych, S., Hu, W., Wang, Y., Shorinov, O., & Wang, Y. On the characteristics of cold spray technology and its application in aerospace industries. *International Conference on Mechanical Engineering and Materials (ICMEM2020). Ser: Earth and Environmental Science. 2021. vol. 719(3), p.032023.* DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/719/3/032023>.

У роботі здобувачем проаналізовано вплив технологічних параметрів напилювання на прискорення частинок порошку в соплі – тиску газу, температур газу та підкладки, швидкості та розміру частинок.

16) Hu, W., Tan, K., Markovych, S., Cao, T. Structural optimization of the special cold spraying nozzle via response surface method. Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering (ICTM). ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 367, pp. 110–122, 2022, Kharkiv, Ukraine. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_11.

У роботі здобувачем виконано дослідження характеристик прискорення різних частинок у багатоканальному прямокутному соплі та оптимізовано геометрію каналу.

17) Hu, W., Tan, K., Markovych, S., Cao, T. A simple method for determining the critical velocity value of cold spraying via SPH. International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM 2021). Manchester, England. pp. 215-221. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIAM54119.2021.00052>.

У роботі здобувачем виконано чисельне моделювання взаємодії однієї частинки з використанням алгоритму SPH.

18) Hu, W., Tan, K., Oleksandr, S., & Cao, T. Study on multi-parameter of cold spraying technology via RSM and BP+ GA methods. 5th International Conference on Artificial Intelligence and Advanced Manufacturing (AIAM 2023). pp. 272-278. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1049/icp.2023.2950>.

У роботі здобувачем розроблено багатопараметричну модель оптимізації режимів напилювання та досліджено прискорення частинки порошку в соплі.

Матеріали доповідей на вітчизняних конференціях:

19) Hu, W., Markovych, S., Shorinov, O., Tan, K. Deposition of protective and restorative cold spraying coating on aircraft parts made of titanium alloys. Відкрита науково-практична студентська конференція факультету авіаційних двигунів (ФАД) «Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки»: Збірник тез доповідей конференції. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2020. – С. 40. <https://drive.google.com/file/d/1trS11rljWf1yIXnAkefWSohV8rkH5p28/view>

У роботі здобувачем виконано аналіз захисних покриттів, що можуть бути напилені холодним газодинамічним напилюванням.

20) Tan, K., Markovych, S., Shorinov, O., Hu, W. Deposition of protective and restorative coatings onto aircraft and engines parts printed with 3D technologies. Відкрита науково-практична студентська конференція факультету авіаційних двигунів (ФАД) «Сучасні проблеми двигунобудування, енергетики та інтелектуальної механіки»: Збірник тез доповідей конференції. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2020. – С. 41. <https://drive.google.com/file/d/1trS11rljWf1yIXnAkefWSohV8rkH5p28/view>

У роботі здобувачем проаналізовано можливість використання технології холодного газодинамічного напилювання для нанесення покриттів на деталі, отримані за допомогою адитивних технологій.

8. Висновок наукового керівника.

Дисертація здобувача містить результати завершеного наукового дослідження. Достовірність отриманих у дисертації результатів підтверджена як результатами теоретичних досліджень, так і комп'ютерного моделювання. Тема дисертації має важливе наукове та

практичне значення. Про високий науковий рівень дисертації свідчить таке: вона спрямована на вирішення актуальної наукової проблеми, а саме пошуку нових технічних рішень для ремонту і відновлення деталей авіаційної техніки, включаючи критично пошкоджені, які потребують повної заміни. Підтверджую, що здобувач Тань Кунь дотримувався академічної доброчесності протягом підготовки наукових статей, доповідей на міжнародних конференціях та в процесі написання дисертації. Враховуючи, що Тань Кунь успішно виконав індивідуальний навчальний план та індивідуальний план наукової роботи, досягнув високих результатів у навчанні за відповідною освітньо-науковою програмою та написанні дисертації, яка є результатом самостійного дослідження, є завершеною науковою працею, містить наукову новизну, виконана на належному науковому рівні, відповідає встановленим вимогам до дисертацій докторів філософії, вважаю, що дисертацію на тему «Development of supersonic nozzles for cold spraying» («Розроблення надзвукових сопел для холодного газодинамічного напилювання») можна рекомендувати до захисту, а її автору Тань Кунь присудити ступінь доктора філософії за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

9. Загальний висновок.

Вважаємо, що дисертаційна робота Тань Куна на тему «Development of supersonic nozzles for cold spraying» («Розроблення надзвукових сопел для холодного газодинамічного напилювання»), подана на здобуття ступеня доктора філософії, відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44). Дисертаційна робота може бути представлена до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді для присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка.

Головуючий на засіданні кафедри
технології виробництва авіаційних двигунів
Національного аерокосмічного університету
ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»
кандидат технічних наук, доцент

28 червня 2024 р



Сергій НИЖНИК