

## **РЕЦЕНЗІЯ**

**на дисертаційну роботу Поливняного Сергія Олександровича  
на тему «Удосконалення технології формування покриттів на деталях з  
титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням», поданої  
на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань  
13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство**

**Актуальність теми дисертації.** Титанові сплави є незамінними конструкційними матеріалами в авіадвигунобудуванні завдяки їх високій питомій міцності, корозійній стійкості та термічній стабільності. Водночас, в умовах тривалого та інтенсивного використання авіаційної техніки, особливо в бойових умовах, деталі з титану зазнають значного зношення, ерозійного руйнування, налипання і контактного пошкодження, що істотно скорочує їх ресурс. Наявні методи відновлення поверхонь не завжди забезпечують необхідну якість, особливо через чутливість титанових сплавів до високотемпературного впливу та термічної деградації.

У зв'язку з цим існує нагальна потреба в пошуку нових та удосконаленні існуючих технологій ремонту та підвищення ресурсу титанових деталей. Серед новітніх методів поверхневого зміцнення та відновлення найбільш перспективним є холодне газодинамічне напилювання – технологія формування покриттів з частинок у твердій фазі, яка не передбачає плавлення ні порошку, ні основного матеріалу, що дозволяє уникнути структурних змін у підкладці та покритті.

Однак, попри численні переваги, широке впровадження холодне газодинамічне напилювання у виробничу практику авіаційної галузі стримується рядом невирішених науково-технічних питань: відсутністю систематизованих даних про вплив параметрів напилювання на властивості покриттів, недостатньою вивченістю процесів взаємодії частинок з поверхнею при низькому тиску газу, браком методик оптимізації процесу для забезпечення одночасно високої якості покриття та ефективного використання порошку. Саме ці проблеми й були покладені в основу дисертаційного дослідження, що свідчить про його високу актуальність для галузі авіаційного матеріалознавства.

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.** Представлені в дисертаційній роботі наукові результати мають достатній рівень обґрунтованості та не суперечать теоретичним закономірностям та загальноприйнятим уявленням про газодинаміку двофазного потоку в каналі надзвукового сопла для напилювання та відомим фактам про фізико-механічні характеристики покриттів, отриманим холодним газодинамічним напилюванням з робочим тиском до 1,0 МПа.

Висновки та рекомендації здобувача є логічними та базуються на аналізі отриманих результатів як математичного опису і чисельного моделювання

процесу нагрівання та прискорення потоку та порошку в спеціалізованих програмних продуктах, так і експериментальних досліджень характеристик покриттів з використанням сучасного обладнання та добре відомих методик.

Наукова новизна отриманих у роботі результатів полягає у такому:

1) 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;

2) 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;

3) 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.

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів дисертації підтверджено їх апробацією на міжнародних науково-практичних конференціях, зокрема таких, праці яких індексуються у наукометричній базі Scopus. Частину наукових та практичних результатів здобувача було перевірено в рамках виконання науково-дослідної роботи «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) і «Нанесення захисних і відновлювальних покриттів на деталі ГТД газодинамічним напилюванням» (№204/2020 (УГТ)).

**Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.** За своїм змістом дисертаційна робота

Поливняного С. О. повністю відповідає стандарту вищої освіти зі спеціальності 132 Матеріалознавство.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям 13 Механічна інженерія.

За результатами перевірки на академічну доброчесність, можна зробити висновок, що дисертаційна робота є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації та плагіату. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Текст рукопису дисертації не містить ознак принципів академічної доброчесності.

**Мова та стиль викладення результатів.** Дисертаційна робота написана українською мовою. Розділи та підрозділи мають логічну структуру, а матеріал викладено послідовно з дотриманням наукового стилю та загальноприйнятої фахової та загальнонаукової термінології.

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

У *вступі* обґрунтовано вибір теми дослідження, наведені мета і задачі дослідження, методи дослідження, наукова новизна отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація матеріалів дисертації, структура та обсяг дисертації, практичне значення отриманих результатів.

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-розширного сопла для напилювання. Отриманні дані дозволили зробити висновок про вплив вторинного потоку, з яким порошок подається в розширну 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 ВТ3-1. Дослідження проводилися за методиками планування багатофакторного 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 ВТ3-1 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.

*Висновки* відповідають сформульованим завданням дослідження та є стислим висвітленням одержаних здобувачем результатів.

Дисертаційна робота Поливяного С. О. оформлена у повній відповідності до вимог, зазначених у наказі МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

**Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.** 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; 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.

### **Недоліки та зауваження щодо дисертаційної роботи.**

1. Автором використано різні одиниці вимірювання температури (наприклад у назві рисунку 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» початкові температури газу подано в Кельвінах, а на графіку легенда має значення в Цельсіях. При цьому розраховані значення температури частинок також представлено в Кельвінах).

2. В роботі автор не зазначає який вид адгезійних зв'язків виникає між покриттям і підкладкою.

3. В розділі 5 відсутня інформація щодо умов роботи корпусу сателіта, відновлення поверхні якого було виконано.

4. Доцільно було б провести дослідження триботехнічних характеристик напилених композиційних покриттів з урахуванням того, що покриття використовуються не лише для відновлення пошкоджених поверхонь, а також для підвищення їх характеристик зносостійкості.

**Загальний висновок.** На мій погляд, дисертаційна робота Поливяного Сергія Олександровича на тему «Удосконалення технології формування покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним напилуванням» є завершеним дослідженням, яке виконане на високому науковому рівні, що не порушує принципів академічної доброчесності. Дисертація містить нові теоретичні та практичні результати, що відносяться до галузі знань 13 Механічна інженерія. Дисертація присвячена розв’язанню актуальної задачі та відповідає вимогам, що зазначені в п. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44.

Тож вважаю, що здобувач Поливяний Сергій Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

**Рецензент:**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри теоретичної механіки,  
машинознавства та роботомеханічних систем  
Національного аерокосмічного університету  
«Харківський авіаційний інститут»

\_\_\_\_\_ Андрій БРЕУС