

РЕЦЕНЗІЯ

**на дисертаційну роботу Поливяного 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.

Забезпечення тривалої та безвідмовної експлуатації авіаційних двигунів є ключовим завданням сучасної авіаційної промисловості, що має стратегічне значення для підтримки обороноздатності та технологічного суверенітету держави. Конструкції таких двигунів значною мірою покладаються на титанові сплави, які цінуються за їхню виняткову питому міцність та стійкість до корозії при високих температурах.

Водночас, інтенсивна експлуатація, особливо в умовах підвищених навантажень, виявляє слабку сторону цих матеріалів – їхню вразливість до поверхневих ушкоджень. Ерозійне руйнування, контактне зношення та фретинг-корозія призводять до вичерпання їхнього ресурсу та необхідності дороговартісного ремонту або заміни. Класичні методи відновлення, що передбачають високотемпературний вплив, є ризикованими для титану через небезпеку небажаних структурних змін та виникнення внутрішніх напружень.

У цьому контексті технологія холодного газодинамічного напилювання (ХГН) постає як високоефективна альтернатива. Її принципова перевага полягає у формуванні щільних захисних шарів за рахунок кінетичної енергії частинок, що рухаються у надзвуковому потоці, без плавлення та термічного пошкодження основи. Це відкриває широкі перспективи для відновлення та зміцнення титанових деталей.

Проте, широкому впровадженню методу ХГН перешкоджає недостатня теоретична та експериментальна база, що пов'язує параметри процесу (температуру, тиск, дистанцію тощо) з кінцевими властивостями покриття. Відсутність науково обґрунтованих методик оптимізації не дозволяє досягти стабільно високої якості та ефективності напилення. Представлена дисертаційна робота спрямована на подолання цих перешкод шляхом системного дослідження процесу ХГН, що підкреслює її безсумнівну актуальність для сучасного матеріалознавства та авіаційної галузі.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.

Матеріали дисертаційної роботи Поливяного Сергія Олександровича дозволяють зробити висновок про обґрунтованість та достовірність його наукових результатів. Вони забезпечуються використанням сучасних методів дослідження, зокрема, на основі методів математичного моделювання газодинамічних процесів в надзвукових соплах, чисельного моделювання в

програмних продуктах, дослідження фізико-механічних характеристик покриттів тощо.

В роботі вирішене важливе науково-технічне 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. 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.

Результат роботи у вигляді розроблених технологічних рекомендацій з відновлення зношених поверхонь корпусу сателіту з титанового сплаву BT5Л холодним газодинамічним напилюванням впроваджено у виробничий процес АТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя).

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.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

За своїм змістом дисертаційна робота Полив'яного С. О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 132 Матеріалознавство.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, а її результати свідчать про вагомий особистий внесок здобувача у науковий напрям механічної інженерії.

Текст рукопису дисертації не містить ознак принципів академічної доброчесності. Дисертаційну роботу було перевірено на академічну доброчесність, результати якої вказують на те, що дисертація є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації та плагіату. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота написана українською мовою, яка відповідає особливостям стилю наукових досліджень з використанням правильних термінів і понять, характерних для стандартної фахової та наукової термінології. Дисертаційна робота є цілісною і в ній досягнуті тематична повнота та розкриття головної наукової ідеї автора. Рукопис має логічну структуру, що послідовно розкриває шлях від постановки проблеми до її практичного вирішення. Подані в роботі наукові та практичні положення логічно викладені та достатньо обґрунтовані. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків.

У вступі автор чітко формулює актуальність дослідження, яка полягає у необхідності подовження терміну служби деталей авіадвигунів з титанових сплавів. Визначено мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження, а також висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

Перший розділ має аналітичний характер. У ньому проведено глибокий огляд літературних джерел, присвячених застосуванню титанових сплавів в авіації, типовим експлуатаційним пошкодженням (зношення, корозія) та існуючим методам ремонту. Автор виконує критичний аналіз переваг та недоліків цих технологій, обґрунтовуючи висновок про високу перспективність застосування саме холодного газодинамічного напилювання для вирішення поставлених завдань.

У другому розділі детально описано експериментальну базу та методологію дослідження. Наведено характеристики установки ХГН, інформацію про порошкові композиції на основі нікелю та матеріал підкладки. Описано стандартизовані методики, що використовувалися для оцінки ключових властивостей покриттів: адгезійної міцності, мікротвердості, мікроструктури та коефіцієнта використання порошку, що забезпечило високу достовірність отриманих даних.

Третій розділ присвячено теоретичному моделюванню процесу. За допомогою аналітичної газодинамічної моделі та чисельного моделювання у програмному середовищі ANSYS Fluent досліджено температурно-швидкісні параметри частинок порошку в надзвуковому соплі. Це дозволило встановити фундаментальні закономірності нагріву та прискорення частинок, що стало науковим підґрунтям для подальшого вибору раціональних режимів напилення.

Четвертий розділ є центральною експериментальною частиною роботи. Із застосуванням методів математичного планування експерименту (зокрема, центрального композиційного плану) проведено комплексне дослідження впливу ключових параметрів ХГН (температура, дистанція напилювання, витрата порошку) на властивості покриттів. За результатами експериментів побудовано адекватні регресійні моделі, що дозволило виконати багатофакторну оптимізацію процесу та визначити оптимальні режими для досягнення максимальної адгезійної міцності та ефективності використання матеріалу.

У п'ятому розділі представлено результати практичного впровадження. На основі проведених досліджень розроблено покрокові технологічні рекомендації для відновлення деталей. Практичну значущість роботи продемонстровано на прикладі розробки та апробації технологічного процесу відновлення реальної деталі авіадвигуна – корпусу сателіту. Наведено також техніко-економічне обґрунтування, яке підтверджує доцільність впровадження розробленої технології у виробництво.

У загальних висновках узагальнено основні наукові та практичні результати дисертації, які повністю відповідають поставленим на початку дослідження завданням. Підтверджено, що робота є завершеним науковим дослідженням, що вирішує важливу прикладну задачу.

Дисертаційна робота Полив'яного 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.

Наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження щодо дисертаційної роботи.

1. В першому розділі варто було б зазначити результати досліджень українських учених за тематикою дисертаційної роботи, а також досвід вітчизняних підприємств з використання технології на практиці (за наявності).
2. Не зазначено розмір частинок порошку, який було використано для напилювання покриттів.
3. Автором досліджено вплив температури газу та розміру частинок порошку на температуру та швидкість останніх в соплі та на виході з нього, проте при дослідженні закономірностей формування характеристик покриттів від режимів напилювання обрано інші параметри – температура газу, витрата порошку та дистанція напилювання.
4. На рис. 3.2 і рис. 3.3 підібрані колір та товщина ліній ускладнюють сприйняття інформації під час чорно-білого друку дисертації.

Загальний висновок.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Поливяного Сергія Олександровича на тему «Удосконалення технології формування покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням» є завершеним дослідженням, виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних і практичних результатів якого розв'язує науково-технічне завдання для галузі знань 13 Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю 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.

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,
декан факультету авіаційних двигунів
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

(підпис) **Юрій ШИРОКИЙ**