

В І Д Г У К

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.

Дисертаційна робота Поливяного С. О. присвячена вирішенню важливого науково-технічного завдання – подовженню ресурсних показників деталей авіаційних двигунів з титанових сплавів шляхом удосконалення технології нанесення захисних і відновлювальних покриттів методом холодного газодинамічного напилювання (ХГН). Актуальність дисертаційної роботи обумовлена як сучасними вимогами до підвищення ресурсу авіаційної техніки, так і актуальними викликами обороноздатності держави.

Завдяки унікальному поєднанню високої питомої міцності, жароміцності та корозійної стійкості, титанові сплави є незамінними для виготовлення найбільш відповідальних та навантажених деталей, зокрема дисків та лопаток компресорів, корпусних деталей та елементів силових схем. Використання цих сплавів дозволяє суттєво зменшити масу двигуна, що напряду впливає на підвищення його ефективності та економічності. Однак, попри видатні характеристики, деталі з титанових сплавів під час експлуатації піддаються інтенсивному впливу цілого комплексу несприятливих факторів. До основних експлуатаційних дефектів належать ерозійне та абразивне зношення, фретинг-корозія, механічні пошкодження у вигляді забоїн, подряпин та вм'ятин від потрапляння сторонніх предметів. Накопичення цих пошкоджень призводить до передчасної втрати працездатності деталей та необхідності їх дороговартісної заміни, що значно збільшує вартість життєвого циклу двигуна.

У зв'язку з цим, пошук та вдосконалення ефективних технологій відновлення зношених деталей з титанових сплавів є критично важливим науково-технічним завданням.

Обґрунтованість наукових результатів дисертації, їх достовірність та новизна.

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації, є добре обґрунтованими та достовірними.

Теоретичні дослідження базуються на фундаментальних законах газової динаміки та теплообміну, зокрема на одновимірній ізоентропійній моделі та чисельному моделюванні в середовищі ANSYS Fluent. Результати розрахунків порівнюються та валідуються, що підтверджує їх достовірність.

Експериментальні дослідження проведені з використанням сучасного обладнання та стандартизованих методик. Застосування методів планування багатфакторного експерименту (центрального композиційного плану) та методології поверхні відгуку дозволило отримати адекватні математичні моделі, що підтверджено дисперсійним аналізом та експериментом.

Практична апробація результатів підтверджена впровадженням розроблених технологічних рекомендацій у виробничий процес АТ «Мотор Січ», патентом України на корисну модель та в навчальний процес та науково-дослідну частину Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

Наукова новизна роботи є значущою і полягає в наступному:

- 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.

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

Дисертація Полив'яного С. О. є самостійним завершеним дослідженням, результати якого мають наукову новизну і практичну цінність. Матеріал роботи викладено послідовно, чітко простежується зв'язок між розділами роботи. Відповідно до поставлених завдань дослідження, обрано методи їх вирішення. Отримані теоретичні положення слугують базою для експериментальних досліджень та практичного впровадження. Наприкінці кожного розділу стисло наведено висновки за розділом.

Дисертація відповідає принципам академічної доброчесності. В роботі відсутні ознаки плагіату, компіляції, фальсифікації чи фабрикації результатів., що підтверджується відповідною довідкою, підписаною уповноваженою особою. Використані матеріали інших авторів мають посилання на відповідні джерела.

Напрямок досліджень у дисертаційній роботі Полив'яного Сергія Олександровича відповідає стандарту вищої освіти за спеціальністю 132 Матеріалознавство.

Мова та стиль викладення результатів.

Дисертаційна робота Полив'яного С. О. відповідає загальному стилю наукових досліджень із використанням термінології, що є стандартною для даної галузі знань та спеціальності.

Матеріал роботи викладено українською мовою. Вимоги до об'єму дисертації автором витримані. Структура роботи є логічною та типовою для дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії з технічних наук – дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списків використаних джерел, додатків.

У вступі автор обґрунтовує нагальність подовження ресурсу деталей авіаційних двигунів з титанових сплавів в умовах посиленої експлуатації та дефіциту запасних частин. Вступ містить постановку мети та завдань, опис об'єкта і предмета дослідження, методів дослідження, наукової новизни отриманих результатів, особистого внеску здобувача, апробація матеріалів дисертації, структури та обсягу дисертації, а також практичного значення отриманих результатів.

У першому розділі проведено огляд і аналіз титанових сплавів, що застосовують у авіаційних двигунах, їх експлуатаційних дефектів (зношення, корозія, налипання) та причин пошкоджень. Автор здійснив критичний аналіз існуючих технологій зміцнення і відновлення поверхонь цих деталей і визначив їх недоліки. Особливу увагу приділено перспективі холодного газодинамічного напилювання для нанесення захисних і відновлювальних покриттів на титанові деталі. На основі аналізу сформульовано мету та конкретні завдання, необхідні для її реалізації. Головний висновок розділу полягає в обґрунтуванні доцільності застосування ХГН для даного класу матеріалів і потреби в системних дослідженнях параметрів процесу.

Другий розділ описує експериментальну базу досліджень. Наведено технічні характеристики та схему установки ХГН ДИМЕТ-405, яка застосовувалася для напилювання покриттів. Дано інформацію про використовувані порошкові матеріали (нікелеві суміші з Al_2O_3) та титанові сплави – підкладки для напилювання. Описано методики випробувань: визначення адгезійної міцності покриттів за методом механічного зварювального розриву, вимірювання мікротвердості покриттів, визначення коефіцієнта використання порошку, а також методи металографії і мікроскопії. Застосування сучасних приладів і стандартизованих методик забезпечило отримання достовірних даних про властивості покриттів. Основні результати розділу – налагодження експериментальної процедури та підготовка апаратурно-методологічної бази, на підґрунті якої проводилися наступні практичні дослідження.

У третьому розділі виконано теоретичний аналіз руху порошкових частинок при холодному напилюванні. З використанням одномірної ізоентропійної моделі отримано закономірності зміни температури й швидкості частинок нікелевого порошку в каналі ежекторного сопла установки ХГН ДИМЕТ-405 в залежності від

початкової температури газу та діаметру частинок. Проведено також чисельне моделювання двофазного потоку в середовищі ANSYS Fluent, що дозволило дослідити взаємодію основного і вторинного потоку та їх вплив на траєкторію руху частинок. Розділ 3 дав теоретичний фундамент для вибору раціональних режимних параметрів ХГН, що є важливою складовою практичної технології.

Четвертий розділ присвячено експериментальним дослідженням впливу режимів ХГН на властивості покриттів з $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$ на титановому сплаві ВТ3-1. Автор застосував методику багатофакторного планування експерименту (центрального композиційного плану) для варіювання таких параметрів, як температура газу на вході в сопло, дистанція напилювання та витрата порошку. За результатами вимірювань адгезійної міцності покриттів і коефіцієнта використання порошку побудовано багатомірні регресійні моделі, що описують залежності досліджуваних цільових функцій від режимних параметрів. Адекватність моделей підтверджено дисперсійним аналізом, що дозволило використовувати їх для прогнозування характеристик. Також досліджено вплив температури газу на мікроструктуру і твердість покриттів. Цей розділ привів до конкретних емпіричних закономірностей, що дозволяють прогнозувати якість покриттів і керувати процесом. Прикладне значення розділу 4 полягає в тому, що отримані моделі можуть бути використані для оптимізації технології напилювання на етапі ремонту, забезпечуючи потрібні властивості покриттів при мінімальній собівартості.

П'ятий розділ містить технологічні рекомендації та приклад практичної реалізації розробленої технології. Описано покроково процес відновлення зношених поверхонь ХГН: підготовку деталі (механічне очищення і струминно-абразивне оброблення), нанесення покриття та подальше механічне оброблення покриття. Наведено розроблений технологічний процес відновлення внутрішньої поверхні корпусу сателіту двигуна з титану ВТ5Л з техніко-економічним аналізом. Впровадження цієї технології на АТ «Мотор Січ» показало, що після 2000 циклів експлуатації стан поверхні відповідає нормам і прогнозований ресурс не менший, ніж у новій деталі. Таким чином розділ 5 підтверджує прикладне значення роботи: розроблено реальне технологічне рішення, захищене патентом, яке може застосовуватись для ремонту великої номенклатури титанових деталей і приводити до помітної економії ресурсів і коштів.

У висновках підсумовано, що виконані в роботі теоретичні й експериментальні дослідження дали змогу вирішити поставлену мету. Зокрема, вперше отримано закономірності температурно-швидкісних характеристик частинок у соплі (експериментально підтверджено використання $\text{Ni}+\text{Al}_2\text{O}_3$), а також емпіричні залежності впливу режимних параметрів (температури, витрати порошку, дистанції) на адгезію і ефективність напилювання. Розроблені технологічні рекомендації інтегровані в ремонтний процес (впровадження на підприємстві) і забезпечують приріст ресурсу деталей та економію (витрати на ремонт значно менші за вартість нових компонентів). Одержані результати носять науково-прикладний характер і створюють основу для подальшого вдосконалення технологій ХГН у матеріалознавстві й авіаційному двигунобудуванні.

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційної роботи достатньо повно викладені у 13 опублікованих працях, серед яких: 7 статей у наукових виданнях, включених до переліку фахових видань України (4 з них у виданнях категорії "А" або проіндексованих у Scopus/Web of Science); 5 публікацій, що засвідчують апробацію матеріалів на міжнародних конгресах та конференціях; 1 патент на корисну модель.

Усі ці публікації безпосередньо пов'язані із дисертацією, в них не виявлено порушень принципів академічної доброчесності та плагіату. Тож результати, що наведені в дисертації, належним чином висвітлені у публікаціях здобувача та апробовані.

Недоліки та зауваження щодо дисертаційної роботи.

1. Здобувачем за результатами розрахунків температурно-швидкісних параметрів частинок порошку наводяться рекомендації щодо вибору параметрів процесу напилювання та розміру частинок порошку для досягнення максимальної швидкості їх на виході з сопла, проте недостатньо уваги приділено поясненню таких рішень. Не вказано оптимальний діапазон значень для формування покриттів із зазначеного порошку.

2. Відсутнє обґрунтування вибору порошкового матеріалу для напилювання.

3. В п. 3.2 на рисунку 3.4 подано розрахункову схему для чисельного моделювання (з віссю симетрії), у той час як на рисунках 3.5 і 3.6 з результатами моделювання показано для цілого сопла.

Втім, вказані недоліки та наведені зауваження не зменшують загалом позитивну оцінку дисертації, не ставлять під сумнів її наукову новизну та практичну цінність.

Загальний висновок.

Підсумовуючи можна зазначити, що дисертаційна робота Поливяного Сергія Олександровича на тему «Удосконалення технології формування покриттів на деталях з титанових сплавів холодним газодинамічним напилюванням» 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.

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

Опонент:

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри технічного
сервісу та галузевого машинобудування
Сумського національного
аграрного університету

Євген КОНОПЛЯНЧЕНКО

