

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Лопати Олександра Віталійовича

на тему «Забезпечення механічних властивостей поверхонь деталей із

газотермічними покриттями електроконтактною обробкою»,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 13 – Механічна інженерія

за спеціальністю 131 – Прикладна механіка

### **Актуальність теми дисертації.**

Багаторічний досвід експлуатації і ремонту конструкційних елементів показав, що у більшості випадків їх працездатність залежить від зносостійкості деталей вузлів тертя. Одним із напрямків забезпечення експлуатаційної надійності технічних систем є використання і розроблення нових сучасних технологічних методів поверхневого зміцнення металів та сплавів. Застосування зносостійких матеріалів і розробка технологічних процесів їх нанесення – актуальний напрямок підвищення зносостійкості деталей. Використання порошкових матеріалів для покриттів дозволяє варіювати їх хімічним складом і забезпечувати задані механічні властивості покриття та розширювати сферу їх використання. Розробка комбінованої технології нанесення покриттів методом газотермічного напилення з подальшою імпульсною електроконтактною обробкою направлена на забезпечення високої міцності зчеплення, утворення залишкових напружень стиску, підвищення щільності покриттів до щільності компактних матеріалів. Першочерговим завданням для реалізації цього напрямку постає встановлення залежності механічних і експлуатаційних властивостей поверхонь деталей з напиленим покриттям від параметрів імпульсної електроконтактної обробки та оцінка напружено-деформованого стану системи «поверхня деталі - покриття».

**Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни.**

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в розробці раціональних режимів імпульсної електроконтактної обробки деталей з газотермічними покриттями для забезпечення оптимальних механічних властивостей (щільності, адгезійно-когезійної міцності, модуля пружності, твердості) газотермічних покриттів на основі аналізу напружено-деформованого стану поверхонь з покриттям, що спричинює підвищення їх експлуатаційних властивостей, і насамперед, зносостійкості в 2...3 рази.



Достовірність одержаних результатів обґрунтована застосуванням математичного моделювання, чисельних методів оцінки напружено-деформованого стану системи «поверхні деталі-покриття», методів математичної статистики, застосуванням широкого комплексу експериментальних досліджень та статистичної обробки отриманих результатів. Зазначене дає підставу вважати, що одержані в дисертаційній роботі результати є достовірними.

Дисертація виконувалася відповідно до плану наукових досліджень на кафедрі зварювального виробництва Навчально-наукового інституту матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Здобувач приймав участь як виконавець у науково-дослідній роботі «Технологія комбінованого лазерного та імпульсноплазмового нанесення зносостійких покриттів для зміцнення стволів вогнепальної зброї» (держреєстрація №0121U111822) та договорі про спільну науково-дослідну діяльність між КПІ ім. Ігоря Сікорського та Інститутом проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України по темі «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин (проект № Р8.19 програми «Ресурс», держреєстрація №0121U111822).

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано повністю, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

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

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Лопати О. В. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 131 – Прикладна механіка та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Прикладна механіка.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям прикладна механіка.

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Лопати Олександра Віталійовича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

**Мова та стиль викладення результатів.**

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Дисертація складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 251 сторінки. Робота містить



60 рисунків, 27 таблиць, 7 додатків. Бібліографічний список включає 222 літературних джерела.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, поставлені мета та завдання досліджень, визначені наукова новизна і практична значимість отриманих результатів, показано зв'язок з науковими програмами, планами, темами, наведені дані щодо особистого внеску здобувача в публікаціях, представлено рівень апробації і впровадження.

У першому розділі проведеного аналіз літературних джерел із дослідження існуючих проблем забезпечення механічних властивостей поверхонь деталей машин із газотермічними покриттями, представлено аналіз існуючих методів визначення адгезійної міцності покриттів, обґрунтовано вибір зносостійких матеріалів для досліджень, проаналізовані дослідження процесу ущільнення порошкових покриттів.

Використання комбінованих способів обробки газотермічних покриттів відкриває великі можливості у створенні поверхонь деталей з композиційними покриттями. Для забезпечення підвищення механічних властивостей газотермічних покриттів необхідно прагнути до застосування способів обробки з мінімальними тепловкладеннями. Реалізація таких способів передбачає автономне або спільне використання механічних, температурних і хімічних факторів. серед існуючих методів механо-термічної обробки перевага надається імпульсній електроконтактній обробці, що поєднує механічний та термічний фактори та відрізняється: мінімальною зоною термічного впливу струму на деталь внаслідок малої тривалості імпульсів нагріву; характеризуються мінімальними тепловкладенням та термічними діями на поверхні деталі з газотермічними покриттями; відсутністю необхідності у захисній атмосфері; відсутністю світлового випромінювання та газовиділення; тепловий режим процесу забезпечує утворення залишкових напружень стиску, які підвищують опір втоми.

Для отримання покриттів газополуменевим напиленням з найбільш перспективних видів матеріалу є порошки та порошкові дроти. Застосування порошкових дротів обумовлюється такими їх перевагами: гетерогенною структурою покриття після напилення, активною взаємодією компонентів порошкової шихти один з одним, що сприяє підвищенню температури частинок, що розпилюються, розкисленню оксидів, і як наслідок підвищенням адгезії покриття до поверхні деталі. Доцільність використання порошкових дротів доведена аналізом міцності та зносостійкості деталей з покриттями. Покриття марок ФМІ широко застосовуються у багатьох галузях техніки для відновлення і захисту від абразивного і газоабразивного зносу, для ремонту



різних деталей машин і агрегатів, що працюють в умовах граничного тертя. Тому розробка методів, основне призначення яких полягає в проведенні кількісного і якісного контролю деталей з покриттями, моделювання та експериментальна оцінка їх адгезійної міцності є першочерговими завданнями, направленними на удосконалення технології формування та ущільнення напилених порошкових шарів.

У другому розділі представлена загальна методика досліджень, зазначені матеріали та методи досліджень, представлені дослідження напружено-деформованого стану та розрахунково-експериментальна методика дослідження механічних властивостей поверхонь деталей із покриттями, наведено методику випробування на тертя й зношування.

Запропоновано технологічну базу для створення експериментальних зразків і деталей із газотермічними покриттями з послідуною імпульсною електроконтактною обробкою та дослідження їх механічних і функціональних властивостей, для проведення досліджень використовували комплект технологічного обладнання для газотермічного напилення.

Для визначення пористості використовували метод кількісного стереологічного аналізу, обробка результатів аналізу зображення за програмою «Results» дає можливість статистичного аналізу результатів за допомогою одного з заданих вимірювань і побудови гістограм за допомогою одного з вимірних параметрів з бажаним кроком.

Визначення залишкових напружень в покриттях здійснювали на основі експериментально-розрахункового методу гнучкого зразка, який полягає в тому, що під дією залишкових напружень в покритті, довга, вузька і тонка пластинка, на яку воно нанесено, деформується у вигляді дуги кола.

Використана експериментально-розрахункова методика дослідження механічних властивостей поверхонь деталей з покриттями дозволила здійснити комплексне визначення механічних характеристик поверхонь з покриттями: критичну деформацію основи; модуль пружності покриття; адгезійну й когезійну міцність покриття; залишкові напруження в покритті, забезпечивши при цьому порівнянність результатів дослідження. Перед проведенням випробувань на одну зі сторін експериментального зразка наклеювали тензодатчики для визначення його деформації та покриття, а на другу наносили мітки для визначення деформацій після руйнування тензодатчиків; зразок з покриттям і наклеєними на нього і покриття тензодатчиками встановлювали в захоплення розривної машини FM-1000, що представляють собою шарніри Гука.



При розрахунку НДС поверхонь деталей з покриттям враховувалися їх геометричні параметри; властивості матеріалів; силові і температурні навантаження, що діють на поверхню з покриттям; вид розрахунку (статичний, теплової та ін.). Випробування на тертя та знос проводили на модернізованій машині типу 2070 СМТ- 1.

В третьому розділі наведено розрахунково-експериментальні дослідження механічних властивостей поверхонь деталей із газотермічними покриттями після імпульсної електроконтактної обробки.

Представлені комплексні розрахунково-експериментальні дослідження механічних властивостей поверхонь з напиленими покриттями довели доцільність використання імпульсної електроконтактної обробки. Встановлена залежність щільності напилених покриттів від тиску електроконтактної обробки, що підтверджено стереологічним аналізом - підвищення щільності до 94...98 %. Зменшення пористості до 2 ... 6% напилених покриттів дає змогу наблизити значення їх модуля пружності до модуля пружності компактних матеріалів. Визначено методом графічного диференціювання залежності адгезійної міцності від товщини покриття, обробка напилених покриттів імпульсним електроконтактним методом дозволяє збільшити їх товщину при підвищенні як адгезійної, так і когезійної міцності.

Чисельне моделювання напружено-деформованого стану системи «поверхня деталі – покриття» встановило виникнення у покритті стрибків напружень біля його країв у зоні адгезійного контакту; при вищому модулі пружності покриття (160 ГПа) різниця напружень між поверхнею деталі та покриттям і напружений стан в самій деталі зменшується. Зміна розмірів покриття та вибір матеріалів за фізико-механічними характеристиками дає змогу мінімізувати напружено-деформований стан робочих поверхонь деталей.

Проаналізовано збільшення міцності зчеплення напилених покриттів після імпульсної електроконтактної обробки до 200 МПа внаслідок утворення значного дифузійного прошарку до 25 мкм між покриттям і поверхнею деталі та підвищенням коефіцієнту дифузії в два рази.

Утворення значного дифузійного прошарку обумовлено процесами аномального масопереносу за імпульсного впливу на тверде тіло, при цьому коефіцієнти дифузії окремих елементів покриття при імпульсній електроконтактній обробці значно перевищують значення коефіцієнтів дифузії при напиленні.

В четвертому розділі представлено результати визначення оптимальних параметрів імпульсної електроконтактної обробки для забезпечення механічних властивостей поверхонь деталей із напиленими покриттями.



Обрані параметри імпульсної електроконтактної обробки (робочий тиск, сила струму, тривалість імпульсів струму та паузи між імпульсами) забезпечують ефективні фізико-механічні властивості покриттів. Імпульсна електроконтактна обробка сприяє зменшенню пористості та забезпечує плавний розподіл мікротвердості за глибиною покриття, в порівнянні з розподілом мікротвердості за глибиною напиленого покриття.

Проаналізовано триботехнічні характеристики газотермічних покриттів після імпульсної електроконтактної обробки на сталі 45 при терті по сталі 45, доведено високу зносостійкість покриття з композиційного порошку КХН- 30 та покриття з порошкового дроту ФМІ-2.

За результатами досліджень побудовано математичну модель залежності критерію оптимізації, що характеризує міцність зчеплення покриттів, пористість покриття від конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів

Висновки узагальнено представляють результати досліджень і стисло подають основні результати роботи.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

#### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Наукові результати дисертації висвітлені у 24 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 9 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 1 стаття у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та Scopus, з яких 1 стаття у виданнях, віднесених до третього квартиля (Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports; 2 патенти України на корисну модель.

Також результати дисертації були апробовані на 13 наукових фахових конференціях.

Результати дисертаційної роботи повністю розкрито у наукових публікаціях автора. В цілому робота виконана на високому рівні, написана технічно грамотно, легко сприймається профільними фахівцями.

Таким чином, наукові результати описані в дисертаційній роботі повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

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

1. В роботі зазначено, що покриття, отримані газополуменевим напиленням, характеризуються значною пористістю, що призводить до зниження механічних властивостей покриттів. Доцільно було б розкрити питання щодо впливу пористості не лише на корозійну стійкість покриттів, а й



на їх зносостійкість. За яким механізмом ущільнені імпульсною електроконтактною обробкою газотермічні покриття підвищують зносостійкість деталей?

2. Представлені чисельні розрахунки при моделюванні НДС системи «поверхня деталі – покриття» проводили за фізико-механічними властивостями матеріалу деталі, які включали наступні характеристики:  $E_d = 200$  ГПа,  $\mu = 0,25$  та покриття:  $E_n = 160$  ГПа та  $E_n = 80$  ГПа,  $\mu = 0,3$ . Для якого типу покриття та основи проведено моделювання? Чи враховувався вплив пористості покриттів при моделюванні, оскільки в табл. 3.2 показана суттєва залежність модуля пружності від пористості покриттів.

3. В роботі проаналізовано вплив параметрів імпульсної електроконтактною обробки на механічні властивості газотермічних покриттів. Однак, не надано інформації щодо мікрогеометрії поверхні, зокрема шорсткості, яка формується при застосуванні запропонованої комплексної технології формування покриттів. Даний параметр суттєво впливає на знос пар тертя.

4. В роботі необхідно було зазначити чи проводилась термічна обробка основи (сталі 45), на яку наносились покриття. Чи буде залежати адгезійна міцність сформованих покриттів від матеріалу основи, наприклад, легована сталь, оскільки в роботі зазначено область застосування покриттів для деталей, які виготовляються з легованих марок сталей.

5. В роботі по тексту, в формулах та на графіках є незначні граматичні помилки, що не впливають на суть роботи.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

#### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Лопати Олександра Віталійовича на тему «Забезпечення механічних властивостей поверхонь деталей із газотермічними покриттями електроконтактною обробкою» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для механічної інженерії. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені 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 Лопата Олександр Віталійович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 – Механічна інженерія за спеціальністю 131 – Прикладна механіка.

**Офіційний опонент:**

Завідувач кафедри прикладної  
механіки та інженерії матеріалів  
Національного авіаційного університету,  
доктор технічних наук, професор

Оксана МІКОСЯНЧИК

Підпис оф.опонента  
д.т.н., професора О.О. Мікосянчик  
засвідчую:

Вчений секретар

Національного авіаційного університету

Микола ЛЕГЕНЬКИЙ



« 05 » грудня 2023 року