

РЕЦЕНЗІЯ

офіційного рецензента на дисертаційну роботу
Скворцова Олександра Олексійовича «Підвищення зносостійкості елементів
трибоспряження в абразивному середовищі нанесенням композиційних
покриттів.», представлену на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань
13 – Механічна інженерія, спеціальності 131 – Прикладна механіка

Актуальність дослідження

Збільшення терміну експлуатації сучасних машин, механізмів та технологічного оснащення – одна із важливих проблем забезпечення якості і конкурентоспроможності галузі машинобудування. Суттєві матеріальні втрати внаслідок тертя та зношування контактуючих деталей трибовузлів поставили першочергову задачу збільшення довговічності вузлів тертя. Висока вартість конструкцій, складність умов роботи трибосистем висувають жорсткі вимоги до вибору матеріалів трибосполучень, пошуку нових ефективних технологій поверхневого зміцнення та відновлення зношених деталей тертя, аналізу процесів, які розвиваються на робочих поверхнях контактуючих деталей.

Сучасні технологічні методи нанесення захисних покриттів відкривають необмежені можливості формування зносостійких структур, що забезпечують надійну роботу вузлів тертя в найрізноманітніших умовах контактної взаємодії, а саме: при великих навантаженнях; кавітації; радіації; корозійних і агресивних середовищ і т.д. Потужним методом модифікування поверхневих шарів деталей вузлів тертя, їх хімічного складу і структури є електроіскрове легування (ЕІЛ), що базується на використанні дії електричного імпульсного розряду, який протікає між електродами. При цьому спостерігається перенесення матеріалу аноду (електроду) на катод (деталь).

Актуальність методів електроіскрового легування для підвищення зносостійкості деталей залишається високою у багатьох галузях та сферах, особливо в промисловому виробництві. Електроіскрове легування застосовується для відновлення пошкоджених або зношених деталей, замість повного їхнього видалення та заміни. Це дозволяє значно зекономити час і гроші, а також продовжити термін служби обладнання. Метод відзначається низькими термічними навантаженнями на деталі, що обробляються. Це особливо важливо для деталей, виготовлених із складних матеріалів або деталей з важким доступом, де термічна деформація може призвести до негативних наслідків.

Заміна пошкоджених деталей або повна переробка обладнання може бути дорогою із значними часовими затратами. Електроіскрове легування дозволяє заощадити витрати на ремонт та обслуговування, оскільки використовує лише необхідну кількість матеріалу. Зменшення витрат матеріалу та енергії в процесі електроіскрового легування сприяє зменшенню викидів та відходів, що відповідає сучасним екологічним стандартам та допомагає знизити вплив промисловості на навколишнє середовище. Розвиток нових матеріалів та високоефективних технологій робить електроіскрове легування ще більш актуальним для покращення зносостійкості деталей та отримання нових можливостей для їхнього

вдосконалення.

Усі вищевказані чинники роблять метод електроіскрового легування важливим і актуальним для вирішення завдань підвищення зносостійкості деталей авіаційної та наземної техніки. Вивчення загальних закономірностей і мікромеханічних властивостей сформованого шару при ЕІЛ та їх вплив на механізм і кінетику зношування дозволяє визначити шляхи для управління експлуатаційними властивостями модифікованих поверхонь і удосконалювати технологію формування електроіскрових зносостійких покриттів.

Оцінка обґрунтованості та достовірності наукових положень

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані у роботі, обґрунтовані достатньо переконливо та повно. Достовірність і обґрунтованість одержаних у дисертації наукових положень підтверджуються коректною постановкою наукового завдання, використанням апробованого математичного апарату, збігом результатів теоретичних досліджень з результатами проведених експериментальних досліджень.

В роботі застосовано комплексний підхід до наукових досліджень, який забезпечив всебічне і глибоке вивчення та аналіз триботехнічних характеристик поверхонь з композиційними покриттями в залежності від режимів процесу електроіскрового легування. При цьому використані сучасні експериментальні методи досліджень.

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

Оцінка новизни наукових результатів дисертаційного дослідження

У відповідності з метою досліджень здобувачем розроблені наступні наукові положення:

1. Встановлена кореляція між структурним станом конструкційних сталей та їхньою здатністю протистояти абразивному впливу часток різної дисперсності: сталь 30ХГСА з дрібнозернистою структурою (~15–20 мкм) та сорбітоподібним перлітом виявляє вищу стабільність до великодисперсного абразиву порівняно зі сталлю 45, де крупне зерно (~40 мкм) сприяє інтенсифікації механізму «викришування»;

2. Визначено фізичну природу низької абразивної стійкості композиційного боридного ЕІП Fe-Cr-B. Встановлено, що механізм їх руйнування ініціюється розколюванням крихких еліпсоїдальних боридів з наступним швидким руйнуванням м'якої феритної матриці, що призводить до катастрофічного відшарування модифікованого шару.

3. Удосконалено оцінку синергетичного механізму абразивної стійкості композиційних електроіскрових покриттів на основі сплавів ВК8, ВК15 та Т15К6, яка полягає у поєднанні бар'єрного ефекту для руху дислокацій, що створюють тверді армуючі фази (WC та TiC), із демпфуючою здатністю в'язкої кобальтової матриці, що запобігає передчасному крихкому сколюванню зміцнюючих часток;

4. Удосконалено математичну модель взаємодії в системі «абразивна частка – деталь», де поверхневі шари розглядаються як анізотропні пластини на пружній

основі. Це дозволило вперше аналітично визначити умови втрати стійкості мікрооб'ємів металу (за Ейлером), що пояснює явище «нагортання» матеріалу попереду абразиву через динамічні процеси (параметричний резонанс) у зоні контакту.

5. Отримали подальший розвиток теорія формування зносостійких структур при електроіскровому легуванні: підвищення триботехнічних властивостей сталей 30, 45 та 30ХГСА досягається не лише за рахунок твердості основи, а й завдяки створенню модифікованого шару з принципово новою фазовою структурою, яка забезпечує градієнтний розподіл мікротвердості по глибині системи «покриття–основа»; також отримали подальший розвиток наукові уявлення про умови забезпечення ефективного опору абразивному зношуванню, згідно з якими встановлено, що для мінімізації деструктивних процесів мікротвердість покриття повинна перевищувати твердість абразивних часток у раціональному співвідношенні 0,6...0,8.

Практична цінність отриманих результатів

Запропоновано технологію електроіскрового легування та технологічні інструкції по підвищенню зносостійкості, по відновленню фізико-механічних та міцнісних характеристик інтенсивно навантажених деталей авіаційної техніки за рахунок управління структурними ефектами та фазовим складом поверхневих модифікованих шарів конструкційних сталей нанесенням електроіскрових покриттів з необхідним рівнем триботехнічних властивостей.

Впроваджено у навчальний процес Державного університету «Київський авіаційний інститут»: в тематичний план лекцій, практичних та лабораторних занять з дисциплін «Основи надійності машин та механізмів» та «Технології конструкційних матеріалів» для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Бакалавр» включено теоретичні питання, пов'язані з застосуванням сучасних електродів на основі зносостійких композиційних матеріалів та практичне застосування методу електроіскрового легування для зміцнення контактних поверхонь; при підготовці кваліфікаційних робіт для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «Магістр» зі спеціальності 131 Прикладна механіка використовуються методики ЕІЛ та зносостійкі електроди.

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

Дисертаційна робота виконана згідно з планами науково-дослідної роботи Державного університету «Київський авіаційний інститут». Дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи «Підвищення довговічності та забезпечення міцності елементів конструкцій авіаційної техніки» № 16-2022/07.01.01. (0125U001009). Автором проведено оцінку зносостійкості електроіскрових покриттів в абразивному середовищі від зміцнюючих фаз та визначено максимальний опір пластичної деформації по допустимим напруження на розтягання для конструкційних сталей 30, 45 та 30ХГСА.

Повнота викладу основних результатів дисертації в публікаціях

Основні результати дисертаційних досліджень Скворцова О.О. опубліковані

в 10 наукових працях, з них – 6 статей у наукових фахових виданнях, затверджених МОН України за спеціальністю дисертації, 4 – у матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій. Кількість та якість наукових публікацій Скворцова О.О. відповідає п.3.6 «Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук», затвердженого Постановою КМУ № 261 (із змінами в редакції постанови КМУ від 19.05.2023 № 502) від 23.03.2016 р., та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р.

Оцінка змісту дисертації, відповідність встановленим вимогам щодо оформлення та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота структурована відповідно до вимог, складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, додатків, списку використаних джерел.

У вступі обґрунтовано важливість обраного напрямку, визначено ключову мету та цілі роботи. Висвітлено зв'язок дослідження з науковими програмами та темами, описано методологічний інструментарій, використаний автором. Окрему увагу приділено викладу особистого внеску автора, опису отриманих вперше наукових положень та наведено можливості їх практичного впровадження.

Перший розділ включає комплексний науково-технічний аналіз експлуатаційної надійності вузлів тертя авіаційної та наземної техніки, а також проведена систематизація методів підвищення їхньої зносостійкості. Встановлено, що домінуючими чинниками виходу з ладу авіаційних компонентів є втомні руйнування (55–61%), перевантаження (14–18%) та корозійні процеси, тоді як знос становить 6–7% від загальної кількості відмов. Визначено специфічні особливості дефектів деталей наземної техніки, зумовлені інтенсивним впливом агресивних середовищ та підвищеними експлуатаційними навантаженнями. Особливу увагу приділено абразивному зношуванню як одному з найбільш інтенсивних видів триботехнічного руйнування, характерному для прецизійних вузлів та елементів шасі повітряних суден.

Розкрито фізичні механізми абразивного зношування, що охоплюють стадії впровадження твердих часток у поверхню тертя та їх подальшого пересування, що супроводжується пластичною деформацією і мікрорізнанням матеріалу. Систематизовано ключові фактори, що спричиняють інтенсифікацію зносу: градієнт твердості в системі «абразив–матеріал», кінематичні параметри контакту та умови граничного мащення. Обґрунтовано доцільність застосування технологій інженерії поверхні, зокрема методу електроіскрового легування (ЕІЛ), як екологічно безпечного та енергоефективного способу формування функціональних покриттів. Доведено, що локальність енергетичного впливу при ЕІЛ дозволяє модифікувати поверхневі шари без термічної деструкції об'єму основного матеріалу.

Визначено роль параметрів імпульсних розрядів та складу електродних матеріалів у формуванні структури і властивостей легованого шару. Встановлено,

що для досягнення максимальної зносостійкості в абразивних середовищах найбільш ефективним є використання електродів на основі тугоплавких сполук (карбідів вольфраму, титану, боридів) та наноструктурованих композитів. Сформульовано необхідність переходу від статичних до динамічних математичних моделей взаємодії в системі «абразивна частка – деталь», які враховують високочастотні коливальні процеси та явища параметричного резонансу як критичні фактори руйнування мікрооб'ємів металу.

В другому розділі обґрунтовано вибір конструкційних матеріалів, описано експериментальну установку для нанесення покриттів та систематизовано методики дослідження їхніх фізико-механічних і триботехнічних властивостей. Об'єктами дослідження обрано конструкційні сталі марок 30, 45, 30ХГСА та 40Х, які є базовими для виготовлення високонавантажених вузлів авіаційної та наземної техніки. Для формування захисних шарів методом ЕІЛ використано широкий спектр електродних матеріалів, включаючи вуглецеві та швидкорізальні сталі (У10, Р18, Р6М5), тверді сплави (ВК8, ВК15, Т15К6), фероборхром та композиційну кераміку ЦЛАБ-1, що дозволило створювати покриття з різним фазовим складом і функціональними характеристиками.

Комплексний структурний аналіз включав рентгенофазову ідентифікацію новоутворених фаз на дифрактометрі ДРОН-3М та оптичну металографію на мікроскопах ММР-2Р і ІЕ200М для візуалізації морфології, оцінки суцільності та товщини легованих шарів. Твердість матеріалу основи контролювали методом Роквелла, тоді як для оцінки мікротвердості тонких (до 100 мкм) електроіскрових покриттів (ЕІП) обґрунтовано застосування методу Віккерса на приладі ПМТ-3. Вимірювання проводили на поперечних шліфах із навантаженням 20–100 г, що дозволило побудувати криві розподілу твердості по глибині та виявити зміцнений дифузійний підшар, відповідальний за експлуатаційну надійність системи «покриття–основа».

Третій розділ присвячено експериментальному дослідженню та теоретичному обґрунтуванню методів підвищення зносостійкості конструкційних сталей марок 30, 45 та 30ХГСА шляхом формування на їхній поверхні ЕІП різного складу. Основна мета роботи полягала у виборі оптимальних електродних матеріалів та режимів легування для забезпечення максимального опору абразивному зношуванню. Експериментально доведено, що зношування сталей без покриття підпорядковується залежності: чим вища твердість матеріалу (наприклад, сталь 30ХГСА з 200 НВ), тим менший його ваговий знос. Встановлено, що електроіскрове легування значно підвищує зносостійкість усіх досліджуваних сталей в абразивному середовищі за рахунок формування зміцненого поверхневого шару з новою фазовою структурою.

Досліджено вплив різних електродних матеріалів (сталі У10, Р18; сплави ВК8, Т15К6; кераміка ЦЛАБ-1) на відносну зносостійкість покриттів. Механізм підвищення зносостійкості покриттів ВК8 та Т15К6 полягає у створенні гетерогенної структури, яка поєднує високу твердість армуючих фаз (карбіди вольфраму WC та титану TiC) із в'язкістю кобальтової матриці, що створює бар'єри для руху дислокацій та запобігає крихкому сколюванню. ЕІП зі сталі Р18 забезпечує ефективний опір завдяки наявності складних карбідів вольфраму

Fe₃W₃C та карбідоутворюючих елементів V і Cr. При цьому домінуючим механізмом руйнування для покриттів із високовуглецевої сталі У10 та кераміки ЦЛАБ-1 є крихке руйнування, пов'язане з наявністю крихких карбідів заліза або боридів цирконію.

Особливу увагу в розділі приділено аналізу динамічних процесів при терті. Проаналізовано, що в зоні контакту абразивна частка–покриття–основа виникають параметричні та автоколивальні процеси, які призводять до розвитку багатоциклових напружень та деформацій. Ці динамічні явища спричиняють утворення деформаційних хвиль та мікротріщин, що інтенсифікує втомне зношування поверхні. Розроблено розрахункову схему, де поверхневі шари представлені як анізотропні пластини на пружній основі, що дозволило визначити умови виникнення динамічно нестійких станів та небезпечних напружень, які можуть призвести до порушення цілісності ЕП.

У четвертому розділі досліджено вплив фракційного складу абразиву на зносостійкість конструкційних сталей марок 45, 40Х та 30ХГСА у нормалізованому стані, а також після ЕІЛ електродами ВК8 та Р18. Експериментально встановлено, що інтенсивність зношування сталей суттєво зростає зі збільшенням розміру абразивних частинок з 250 мкм до 500 мкм. При цьому змінюється домінуючий механізм руйнування: від втомного зношування при використанні дрібного абразиву до глибокого дряпання та мікрорізання при великому розмірі частинок.

Досліджено, що абразивна стійкість сталей у вихідному стані корелює з розміром зерна та структурними особливостями: сталь 30ХГСА, яка має найменший розмір зерна (~15–20 мкм) та сорбітоподібний перліт, виявилася найбільш стійкою до великодисперсного абразиву.

Нанесення ЕП змінює процес зношування. Найвищу ефективність підвищення зносостійкості продемонструвало покриття ВК8 на сталі 40Х: зменшення зносу модифікованої поверхні зафіксовано в 11,67 разів при терті в абразиві розміром 500 мкм.

Для покриттів зі швидкорізальної сталі Р18 встановлено схильність до прискореного викришування при терті дрібним абразивом (250 мкм) через дискретний характер покриття та наявність мікрорельєфу, що сприяє фіксації абразивних частинок. При використанні крупнодисперсного абразиву ефективність покриття Р18 зростає завдяки переходу до режиму вдавлювання/плугування.

Дисертаційна робота виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності. Використані у роботі ідеї та результати інших авторів цитовані відповідно до вимог. Звіт про подібність свідчить про оригінальність дисертації, що рецензується.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. В підрозділі 2.1 на стор. 63 вами було представлено вибір матеріалів для нанесення електроіскрових покриттів. Однак представлені приклади, такі як: вали, шестерні, напіввісі, шпінделі, муфти та ін. не працюють в реальності в умовах абразивного зношування. Абразивне зношування в цих деталях це аварійний

режим, що призводить до катастрофічного руйнування деталей. Отже обрунтуйте та покажіть які саме деталі працюють в умовах абразивного зношування в нормальних умовах експлуатації, як в наземній техніці, так і в авіаційній на сталі 30ХГСА згідно першого пункту практичної значимості.

2. У висновках до третього розділу в п. 3.3. зазначено «підвищення зносостійкості обумовлено формуванням на поверхні зміцненого шару з новою фазовою структурою» але не зазначено описання цієї структури. Прокоментуйте та поясніть це явище.

3. В четвертому розділі дисертаційної роботи п. 4.2. представлені результати вибору ЕІЛ за комплексними показниками для поверхонь тертя. Яку технологію зміцнення чи відновлення ви можете запропонувати для авіаційних деталей із урахуванням ваших досліджень із приблизною оцінкою підвищення експлуатаційних показників.

Висловлені зауваження не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів. Дисертаційна робота виконана на високому науковому рівні.

Висновок про дисертаційну роботу

Дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Скворцова Олександра Олексійовича на тему «Підвищення зносостійкості елементів трибоспряження в абразивному середовищі нанесенням композиційних покриттів» у цілому виконана на високому науковому рівні, її результати с актуальними, обґрунтованими та достовірними. Робота відповідає вимогам щодо академічної доброчесності.

За рівнем наукової новизни, якістю досліджень, достовірністю та обґрунтованістю висновків дисертація Скворцова Олександра Олексійовича на тему «Підвищення зносостійкості елементів трибоспряження в абразивному середовищі нанесенням композиційних покриттів» відповідає галузі 13 – Механічна інженерія, спеціальності 131 – Прикладна механіка і чинним вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р., а її автор, Скворцов Олександр Олексійович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 — Прикладна механіка.

Рецензент:

доцент кафедри авіаційного транспорту
Національного університету
«Київський авіаційний інститут»,
кандидат технічних наук, доцент



Андрій ХІМКО

Хімко А. Олександр
секретар КДІ
Хімко Андрій