

ВІДГУК

офіційного опонента

кандидата технічних наук, доцента Лисенка Сергія Володимировича,
доцента кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського
національного технічного університету,

на дисертаційну роботу Люховця Володимира Васильовича на тему
**"ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ПРИ АЗОТУВАННІ В
ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ РОЗРЯДІ"**, подану на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та
зношування в машинах

Фізико-технічні процеси обробки поверхонь металів з використанням в якості інтенсифікатора електричного розряду в газовому середовищі відносяться до найменш енергоємних та універсальних за призначенням і використанням. В той час широкому впровадженню процесів безводневого азотування в тліючому розряді (БАТР) перешкоджає відсутність загальних теоретичних основ, за яких стали б можливими оптимізація, ефективне керування та проектування технологічних процесів.

Метою досліджень, проведених в даній роботі, є розвиток теоретичних і розробка практичних основ підвищення зносостійкості металів безводневим азотуванням в циклічно-комутованому розряді, а також встановлення основних закономірностей та умов азотування довгомірних отворів деталей для забезпечення їх зносостійкості.

На основі вивчення та аналізу основних положень, одержаних результатів, висновків і рекомендацій, висвітлених в дисертаційній роботі, авторефераті, опублікованих наукових працях, матеріалах і тезах міжнародних конференцій, а також отриманих за участю автора охоронних документів на право інтелектуальної власності, поданих до спеціалізованої вченої ради Д 70.052.02 в Хмельницькому національному університеті МОН України, сформовані основні положення цього відгуку.



Загальна характеристика і актуальність теми дисертаційної роботи

У дисертаційній роботі Люховця В.В. вирішене актуальне науково-технічне завдання - що полягає у подальшому розвитку теоретичних і практичних положень енергетичної теорії БАТР проф. І.М. Пастуха та визначенню режимів азотування в циклічно-комутованому розряді для деталей, зокрема з довгомірними отворами з метою підвищення зносостійкості їх робочих поверхонь.

Відомі теоретичні моделі процесу азотування в тліючому розряді, сформовані в багатьох роботах, зосереджують увагу в основному на дифузійних явищах в модифікованому поверхневому шарі. Проте вони не можуть адекватно пояснити деякі з цих процесів. Тому актуальність розробки теоретичних основ, які базуються насамперед на базових положеннях фізики газорозрядних процесів та застосування їх до пояснення процесів БАТР, безсумнівна. Можливо не тільки розкрити тонкий механізм взаємодії частинок в газовому середовищі та частинок зіткнення падаючого потоку з поверхнею деталі, але й розкрити нові потенціальні можливості технології.

Тенденцією досліджуваного напрямку є використання циклічного живлення. Маючи всі переваги, що характерні для БАТР, запропонований метод дозволяє певні спрощення технологічних умов модифікації, які насамперед пов'язані з відсутністю переходу тліючого розряду в дуговий. При цьому суттєво знижуються вимоги до характеру позиціонування деталей в садці. Практично їх можна встановлювати на будь-яку поверхню або підвішувати на самих простих пристроях. Не спостерігається локальне горіння в місцях контакту, що так характерно для схеми при живленні постійним струмом. Проте з іншої сторони, враховуючи, що певний час розряд взагалі відсутній – тривалість власне фази азотування збільшується.

В теоретичному плані процес азотування в переривчастому циклічно-комутованому розряді (ЦКР) практично не досліджувався. Відсутні основи, на базі яких можливе проектування технологічних режимів, їх оптимізація. Немає критеріїв, на основі яких можливо прогнозувати результати формування

триботехнічних систем вказаним методом. Проте актуальність подібних проблем не викликає сумніву виходячи з того, що покращення показників зносостійкості є чи не головним завданням поверхневої модифікації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дослідження виконані згідно Законів України "Про наукову і науково-технічну діяльність" від 26.11.2015 №848 – VIII та "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки" від 11.07.2001 №2623 – IV, планів наукових досліджень Хмельницького національного університету (ХНУ) в рамках держбюджетних робіт, які виконувалися на кафедрі галузевого машинобудування та агроінжинерії ХНУ: "Наукові підходи і технології підвищення зносостійкості і довговічності важко навантажених конструкційних елементів при циклічному контактному навантаженні" (№ держ.рестр.0115U000226), "Наукові основи підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструктивних елементів з покриттями при терті кочення" (№ держ.рестр.0117U001167) та держбюджетних робіт, які проводилися в ПНФТЦ ХНУ за темами: "Теорія процесів модифікації металевих поверхонь в тліючому розряді з автономними параметрами розряду" (№ держ.рестр.0115U000222) і "Теоретичні та практичні основи інтенсифікації вакуумно-дифузійних процесів в тліючому розряді металевих поверхонь деталей військового та подвійного призначення" (№ держ.рестр.0119U100679).

Наукова новизна одержаних результатів

Основні положення, які виносяться на захист полягають в наступному:

– вперше запропоновано ввести критерій концентрації поля, що дозволило розв'язати аналітичну задачу встановлення взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля, а також їх вплив на зносостійкість азотованих в циклічно-комутованому розряді поверхонь сталей;

– вперше отримано аналітичний вираз для визначення середньої швидкості електронів в тліючому розряді, для цього використано модель базової швидкості,

яку має електрон, що пролетів без зіткнень від катода до певної точки області катодного падіння;

– виявлено явище-ефект релаксаційних процесів в приповерхневих шарах сталей, азотованих в циклічно-комутованому розряді. Релаксують структури та напруження, що утворюються в поверхневих шарах цих матеріалів під дією тиску і температури в зоні тертя;

– встановлено, що підвищення майже в 2 рази зносостійкості поверхонь довгомірних отворів сталевих деталей, азотованих в циклічно-комутованому розряді, зумовлено ефектом накачування іонів азоту в отвір і, як наслідок, рівномірного розподілу поверхневої мікротвердості по усій довжині;

– отримала подальший розвиток методологія підвищення зносостійкості сталей безводневим азотуванням в циклічно-комутованому розряді, що є наслідком зміни співвідношення структурних складових фазового складу поверхневого модифікованого шару;

– підвищення зносостійкості сталевих деталей вузлів тертя в 1,35–1,75 разів азотуванням в циклічно-комутованому розряді зумовлена тим, що періодична зміна полярності електродів камери сприяє процесам очистки поверхні від адсорбційного шару, що позитивно впливає на характер насичення поверхні азотом (градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару знижується від 1,7 до 3,5 рази).

Значення для науки і практики результатів дисертаційної роботи

1. Застосування запропонованого комплексу апаратури як ключа при азотуванні в тліючому розряді з нестационарним живлення дозволило реалізувати весь спектр робочих струмів та напруг, що відкриває шлях до практичного використання нестационарного розряду для модифікації поверхонь металевих сплавів та підвищення їх зносостійкості.

2. Дослідження зносостійкості зразків в режимі сухого тертя забезпечує суттєво більшу продуктивність проведення експериментів. На відміну від експериментів з граничним тертям, сухе тертя може застосовуватись для різних

сталей, з однаковим значенням тиску в зоні контакту, що дозволяє полегшити порівнювання результатів та сприяє об'єктивності висновків щодо ефективності різних процесів модифікації поверхні. За результатами проведених досліджень таким компромісним тиском може бути значення в 16 МПа. Встановлений ефект релаксаційних перетворень поверхонь тертя, які були азотовані в циклічно-комутованому розряді, вимагає рекомендувати для забезпечення адекватності та співставлення результатів проводити дослідження зносостійкості таких поверхонь протягом однієї безперервної зміни.

3. При БАТР з живленням струмом промислової частоти здешевлюється установка для реалізації процесу (патент України № 112983). Розроблена технологія, впроваджена для зміцнення зубчастих об'ємів, зубчастих втулок, вал-шестерень, коліс зубчастих на ТОВ «МАГМА» (м. Маріуполь), показала збільшення зносостійкості від 1,35 до 1,85 порівняно із зміцненням струмом високої частоти.

4. Можливість комутації форми імпульсів та зміни їх полярності призвела до розробки цілої низки способів і технологій азотування (патенти України, № 113576, № 115969, № 112984, № 112613 та № 111949) спрямованих на підвищення зносостійкості виробів з металів: перехідних втулок з внутрішніми і зовнішніми конічними різьбами; шнеків термопласт-автоматів; впроваджено на ТОВ «Завод бурового обладнання» (м. Коростень), на ПП «Юркон», на Хмельницькій маслосирбазі та об'єднанні «Хмельпиво».

Результати теоретичних та експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі ХНУ на кафедрі галузевого машинобудування та агроінженерії при викладанні дисциплін «Прогресивні технології зміцнення», «Трактори і автомобілі».

Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи у опублікованих наукових роботах

Основні теоретичні та експериментальні результати доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях професорсько-викладацького складу

кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії ХНУ (2016 – 2019 р.); на Міжнар. наук.-техн. конф.: 11 і 16 -й Міжнар. симпозиум укр. інж.-механіків у Львові (Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2013, 2023); Ольвійський форум - 2014: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі (Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014); 12-й Міжнар. симпозиум укр. інж.-механіків у Львові (Львів, КІНПАТРИ ЛТД, 2015); збірка тез доповідей 8-ї міжнар. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів (Київ, 2015); наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства: Збірник праць VIII Міжнар. наук.-практ. конф. вчених, аспірантів і студентів (м. Київ, 2019).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 28 наукових праць, у тому числі 10 статей у фахових виданнях, 2 у виданнях, що входять до Міжнар. наук.-метричної бази, 6 тез доповідей на Міжн. наук. техн. конф., отримано 8 патентів України. Опублікована 2 монографії: 1. Пастух И.М. "Теоретические основы процесса безводородного азотирования в тлеющем разряде" / И. М. Пастух, Г. Н. Соколова, В. В. Люховец, А. С. Здыбель // Перспективные тренды развития науки: техника и технологии : монография. – Одесса: Куприенко С.В., 2016. – С. 123–135. 2. Skyba M. Physico-chemical and tribological properties of nitrogenated layers of structural steel / M. Skyba, M. Stechyshyn, N. Stechyshyna, A. Martynyuk, V. Lyukhovets // Actual problems of modern science. Monograph: Bydgoszcz, Poland– 2021. – P.488-499.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з переліку умовних позначень, анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 211 сторінок друкованого тексту, з них анотація – на 20 стор., зміст – на 3 стор., основний текст – на 151 стор., список із 125 використаних джерел – на 13 стор., додатки – на 46 стор. Дисертація містить 79 рисунків та 9 таблиць.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Вступ містить основні, передбачені положеннями ДАК МОН України, дані щодо актуальності роботи, її наукової цінності і практичного значення. Визначено мету і задачі дисертаційної роботи, об'єкт та предмет дослідження, показано особистий внесок здобувача при виконанні роботи і в опублікованих наукових працях за участі автора.

У першому розділі проведено аналіз вітчизняних і закордонних літературних джерел з наукових і практичних проблем процесів БАТР. На основі цього аналізу обґрунтовано актуальність, мету роботи, напрямки і поставлені завдання для вирішення поставленої наукової задачі.

Процеси БАТР, в основі яких лежить використання вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій, детально проаналізовані в багатьох роботах. При цьому, як найбільш доцільна, вибрана така система рівнів вибору параметрів: фазовий склад середовища, що містить активний елемент модифікації; його стан; тип процесу модифікації; активатор процесу. Приведена система класифікаційних критеріїв відповідала задачам дослідження, а саме – створенню моделі процесу для обґрунтування енергетичного підходу БАТР. В якості головної початкової гіпотези була прийнята умова незмінності електричних параметрів розряду протягом всієї фази обробки. Для характеристики процесів БАТР вибрані два параметри: напруга U між електродами і густина струму j .

Визначено, що електричні параметри головного інтенсифікатора БАТР реально не можуть бути стабільними. Оскільки ж вони, в основному, формують інтенсивність усіх елементарних субпроцесів, з яких складається модифікація, то скориговано його енергетична модель, як першооснова, повинна враховувати саме цю обставину. Подальші дослідження процесу модифікації вимагають, в першу чергу, встановлення системи взаємозв'язків складових АТР (рис.1.1, с. 15).

Основні субпроцеси вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій, наведені на рис. 1.2 (с. 18). Результат впливу на модифікацію тих чи інших субпроцесів може бути різним тому, що одні з них безпосередньо чи через інші

субпроцеси формують фазовий склад модифікованої поверхні (дифузанти), другі ж тільки впливають на кінетику взаємозв'язаних з ними субпроцесів (дифунданти). Визначено, що вплив субпроцесів може бути як стимулюючий, що сприяє росту швидкості формування фаз, так і гальмуючим її.

Зовсім інша ситуація виникає у випадку використання нестационарного живлення, наприклад, при циклічно-комутованому розряді, коли частота циклів знаходиться в межах від одного до десятка кілогерц, а крім того шпаруватість ще зменшує тривалість часу наявності напруги на електродах камери. Тоді перехідні процеси при запалюванні та при гасінні розряду за часом становлять помітну частку активної фази періоду циклу комутації і залежно від характеру зміни струму та напруги можуть суттєво вплинути на формування нітридних фаз, дифузії азоту в глибину поверхні та її розпорошення, а отже, на власне процес формування поверхневого модифікованого шару. Виникає задача оцінки впливу і характеру зміни основних електричних величин (струму та напруги розрядної камери) процесу азотування металевих деталей при використанні циклічно-комутованого розряду.

Автор приводить результати проведених досліджень впливу БАТР для підвищення зносостійкості закритих і відкритих трибологічних спряжень деталей. Показано, що до 10 разів в нейтральних і лужних середовищах та в 3 рази при терті в оливі підвищується надійність роботи трибоспряжень деталей.

Зауваження: У приведених прикладах ефективності застосування БАТР для підвищення зносостійкості відкритих і закритих трибологічних спряжень деталей використовується постійне джерело живлення. В той час, як в роботі розглядається азотування в циклічно-комутативному розряді.

У другому розділі для проведення досліджень обґрунтовано вибір конструкційних сталей: якісних вуглецевих сталей 20 і 45, хромистої сталі 40Х та хромоалюмінієвої з молібденом високоякісна сталі 38Х2МЮА, Вони як найбільш часто використовуються для азотування в тліючому розряді.

Дослідження елементного складу виконані на енергодисперсійному

рентгенофлуоресцентному спектрометрі "Спрут" виробництва "Укрентген" з SDD детектором X-123 (Amptek, США) [46]. Ідентифікація марки сталі виконана визначенням вмісту восьми хімічних елементів. Результати аналізу хімічного складу вказаних сталей наведено у рядках "Аналіз" таблиці 2.1, с. 57. У рядках "ДСТУ" таблиці зазначений хімічний склад досліджуваних сталей, що відповідає стандартам за постійними домішками, які вводяться в сталь спеціально, а саме – ДСТУ 7809:2015 (для сталі 45) та ДСТУ 7806:2015 (для сталей 40Х та 38Х2МЮА).

Азотування досліджуваних зразків проводились на установці УАТР-1, призначеній для поверхневої модифікації деталей, інструменту та оснащення методом безводневого азотування в тліючому розряді (БАТР). Установка була модернізована: в газорозрядну камеру встановлено блок нагрівальних елементів, а в електричну схему добавлено блок живлення від незалежного джерела, а також блок комутації і контролю циклічно-комутованого розряду.

Впровадження режиму циклічної комутації при азотуванні в тліючому розряді відкриває додаткові, у порівнянні з традиційним азотуванням в тліючому розряді, можливості підвищення ефективності та якості технологій БАТР. Зокрема появляється можливість азотування деталей складної форми (наявність глибоких та вузьких пазів, отворів малого діаметра та значної глибини тощо). Так, для отворів діаметром менше 8 мм імпульсне живлення більш ефективно оскільки забезпечує азотування всередині отворів.

Використання електронного ключа в ланцюгу живлення камери дозволяє не змінюючи потужності, що виділяється на катоді збільшити напругу катодного падіння, а отже, збільшити кінетичну енергію іонів.

Мікротвердість вимірювалась на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,98 Н (0,1 кг) з фіксацією значень мікротвердості як на поверхні, так і на певній відстані від неї вглиб зразка, а саме: 0, 25, 50, 100, 200, 300, 500 мкм.

Дослідження елементного складу виконані на енергодисперсійному рентгенофлуоресцентному спектрометрі "Спрут" виробництва "Укрентген" з SDD детектором X-123 (Amptek, США)

Рентгенофазовий аналіз здійснювався на дифрактометрі рентгенівському загального призначення ДРОН-3 у фільтрованому випромінюванні залізного анода, в діапазоні кутів 2θ від 20° до 100° з кроком сканування $0,1^\circ$ і часом експозиції 10 с. Рентгенозйомка виконувалась від плоских торців циліндричних зразків, підданих азотуванню в глибину модифікованого шару.

Експериментальні дослідження зразків на зносостійкість проводились на універсальній машині для випробування матеріалів на тертя моделі 2168УМТ. Схема тертя – спряження зразків "диск-палець"; тип контакту – ковзання площини по площині (торець циліндричного зразка ковзає по плоскому металевому диску; матеріал контртіла – сталь ШХ15 із твердістю основи HRC61; тиск у зоні контакту $p = 16$ МПа; швидкість ковзання $v = 0,1$ м/с контрольований параметр – лінійний знос h , що визначався як зміна у результаті проходження ділянки довжиною l лінійного розміру зразка, виміряного по нормалі до поверхні тертя.

Експериментальні дослідження моделювання БАТР отворів проводилися на моделях, що являють собою пустотілі циліндри, в яких на різних відстанях від торця просвердлена серія радіальних отворів. В ці отвори вставлялися зразки. Таким чином, кожний зразок азотується з двох торців, що дає можливість по-перше, азотувати із зовні та з середини моделі при практично однаковій температурі, по-друге, порівнювати результати азотування двох поверхонь, при цьому відмінність в умовах полягає лише в розташуванні цих поверхонь – зовнішнє чи внутрішнє. Всі інші фактори, які могли б впливати на результати модифікації практично ідентичні. Наявність серії радіальних отворів створює можливість одночасного азотування зразків, виготовлених з різних сталей при однакових параметрах технологічного процесу, що суттєво прискорює експериментальні дослідження. Повна довжина моделей становить 360 і 400 мм, а діаметр отворів в моделі 20 і 40 мм. Таким чином найбільший коефіцієнт відношення довжини отвору до його діаметра складав 18 та 10, відповідно.

Зауваження: 1. Яка мета визначення елементного складу сталей вибраних для проведення досліджень?

2. Яким чином визначалася висота розміщення отворів на пустотілих

циліндрах для їх моделювання при БАТР?

У третьому розділі показано, що використання змінного струму також впливає на хід та результати азотування, оскільки періодична зміна полярності електродів камери сприяє процесам очистки робочої поверхні деталі від адсорбційного шару, що, в свою чергу, позитивно впливатиме на характер насичення поверхні азотом та сприятиме суттєвій зміні фазового складу поверхневого модифікованого шару (патент України № 112983).

Аналіз результатів металографічних досліджень модифікованого шару вказав на наявність більш рівномірного градієнту твердості по глибині. Градієнт твердості знизився в 1,7...3,5 рази, що, в свою чергу, свідчить про підвищення зносостійкості деталей та якісних показників обробки деталей.

Ідея використання змінного струму промислової частоти в якості джерела живлення при АТР, можливості комутації форми імпульсів, зміни їх полярності привела до розробки цілої низки розробок способів і технологій азотування (патенти України: №113576, №118327, №113569, №115969, №112984, №112613 та №111949).

Проаналізовані види локальних винятків поверхні, розглянуто їх вплив на концентрацію електричного поля та її зміну, як фактор нерівномірності результатів модифікації. Наявність локальних винятків поверхні, як зовнішніх у вигляді гострих ребер, виступів, тощо, так і внутрішніх, що мають форму пазів, отворів призводить в цих місцях до концентрації поля і густини струму. З цієї причини головною метою є розробка аналітичних основ взаємодії електричного поля з внутрішніми локальними винятками поверхні. При цьому в якості моделі вибрано найбільш загальний варіант – внутрішній локальний виняток клиновидної форми. Розроблений для цього випадку аналітичний апарат може застосовуватись для розрахунку показників концентрації електричного поля в тліючому розряді, який використовується для поверхневої модифікації металевих деталей.

Зауваження: Яка відмінність у формулюваннях: азотування в циклічно-

комутованому розряді, азотування в циклічно-комутованому розряді із змінним струмом, азотування струмом промислової частоти?

У четвертому розділі проведено теоретичний та експериментальний аналіз азотування довгомірних отворів. Вказано, що переважна більшість випадків азотування подібних об'єктів модифікації відповідає за своїми фундаментальними ознаками газорозрядним процесам з пустотілим катодом. Проте підлягає окремому аналізу вплив на характер процесів обробки співвідношень геометричних розмірів отворів та геометричних характеристик ОКП газового розряду. За цією ознакою автор розрізняє 4 випадки і якщо діаметр отвору менший подвійної ширини ОКП ($D < 2d$) то у цьому випадку ОКП протилежних частин катода частково (в граничному випадку – повністю) перекриваються, схема відповідає умовам існування розряду з пустотілим катодом. Електрони при цьому перелітають через границю протилежної ОКП, входять в поле, яке гальмує їх рух аж до повної зупинки та повернення в "свою" область. У зв'язку з тим, що у напрямку до виходу з отвору напруга зростає, має місце осьова сила, яка рухає електрони в напрямку торця отвору. Електрони таким чином рухаються по коливальній затухаючій траєкторії до виходу з отвору. Оскільки загальний шлях при цьому зростає. Це приводить до збільшення числа сутічок з нейтральними молекулами та інтенсивності іонізації. Зазначене становить головну причину появи в центральній частині отвору більш інтенсивного свічення як характерної ознаки розряду з пустотілим катодом. Закон коливального руху електронів повинен суттєво залежати від осьової координати вильоту його зі стінки отвору, оскільки падіння напруги, а відповідно напруженість поля, ширина ОКП залежать від відстані до торця отвору, враховуючи згаданий вище нерівномірний закон розподілу потенціалу вздовж отвору.

У цьому випадку автор роботи пропонує азотувати такі отвори в ЦКР. Проведений аналіз зміцнення поверхонь азотуванням в ЦКР внутрішніх довгомірних отворів деталей показав їх ефективність в підвищенні зносостійкості отворів в результаті підвищення фізико-механічних характеристик азотованого

шару по усій довжині отвору порівняно з азотуванням із постійним струмом. Експериментальні випробування показали, що швидкість зношування азотованих в ЦКР зразків розташованих на різних відстанях від торця моделі однакова, а для сталі 38Х2МЮА – в 1,3...1,6 разів менша аніж при інших режимах зміцнення.

Зауваження. У табл. 4.2 наведені особливості режимів азотування. Які саме особливості мається на увазі?

У п'ятому розділі розглянуто питання апаратного забезпечення процесу азотування в тліючому розряді з циклічно-комутованим живленням, визначення критеріїв утворення нітридів, знаходження середньої швидкості електронів в області катодного падіння, а також проведені дослідження зносостійкості азотованих в циклічно-комутованому розряді конструкційних сталей при граничному та сухому терті.

У результаті досліджень встановлено, що процес зношування при граничному терті фактично включає два конкуруючих процеси: ущільнення поверхневого шару зі збільшенням його мікротвердості та руйнування поверхневого шару з локальним схопленням поверхонь.

На співвідношення цих фаз в часі суттєво впливають початковий стан поверхні та її фізико-механічні характеристики, тиск на поверхні контакту, швидкість ковзання. Причому всі ці параметри для граничного режиму тертя знаходяться в тісному взаємозв'язку.

З зазначених вище обставин проведення випробувань на зносостійкість зразків, виготовлених з різних матеріалів та з суттєво відмінними характеристиками поверхневого шару при однакових параметрах режиму випробувань у більшості випадків неможливе, оскільки отримані результати проблематично порівнювати.

На відміну від методики експериментальних досліджень за схемою застосування граничного тертя, в режимі сухого тертя результатів можливо досягти при однакових значенням тиску практично для всіх азотованих сталей. Останнє виключає при аналізі результатів випробувань питання їх порівнянності. Про

важливість цього положення свідчить співставлення кривих зношування для одних і тих же сталей при різних значеннях тиску (рис. 5.10, с. 149).

Внаслідок того, що одне і те ж значення лінійного зносу для одного матеріалу, але при різних тисках, досягається при суттєво різних значеннях шляху тертя, то встановлення взаємозв'язку між перерахованими факторами не становить ніяких проблем.

Дослідження зносостійкості при сухому режимі тертя забезпечує суттєво більшу продуктивність експериментів. На відміну від експериментів при граничному терті сухе тертя може застосовуватись для різних сталей при однаковому значенні тиску, що виключає проблему порівнянності результатів та сприяє об'єктивності висновків стосовно ефективності різних процесів модифікації. За результатами попередніх експериментальних досліджень, таким значенням тиску може бути 16 МПа. Встановлений також ефект релаксаційних перетворень поверхневих структур, у зв'язку з чим рекомендується проводити дослідження зносостійкості протягом однієї безперервної зміни.

Зауваження. 1. У роботі приводяться результати зносостійкості сталей при граничному терті, а опису установки для цього не має.

2. Чому рисунки в розділі 5 оформлені в різному стилі?

Загальний висновок

Дисертаційна робота Люховця В.В. є завершеною науково-дослідною працею, актуальною за тематикою, виконаною на високому науковому рівні із використанням сучасного теоретичного та експериментального матеріалу, а також комп'ютерних технологій.

Здобувачем отримано нові науково-обґрунтовані результати, які дають змогу глибше розуміти процеси БАТР конструкційних сталей в циклічно-комутованому розряді та вплив на їх зносостійкість. Результати досліджень, висновки та рекомендації представляють цінність для науки і практики особливо для трибології та хіміко-термічної обробки металів.

Наведена в дисертації та авторефераті інформація підтверджує повноту публікації матеріалів досліджень, висновків і результатів, які подаються здобувачем.

Дисертаційна робота "Зносостійкість конструкційних сталей при азотуванні в циклічно-комутованому розряді" за актуальністю, структурою, обсягом, змістом, якістю оформлення та викладу відповідає вимогам пп. 9, 11, 12 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою КМУ №576 від 24.07.2013 р.

З урахуванням вище викладеного вважаю, що автор дисертації – Люховець Володимир Васильович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри експлуатації та
ремонту машин Центральноукраїнського
національного технічного університету


Сергій ЛИСЕНКО

Підпис доц. Лисенка С.В. засвідчую
проректор з наукової роботи та
міжнародних зв'язків



Андрій ТИХИЙ