

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ЛЮХОВЕЦЬ ВОЛОДИМИР ВАСИЛЬОВИЧ**



УДК 620.193.16

**ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ  
ПРИ АЗОТУВАННІ В ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ РОЗРЯДІ**

Спеціальність 05.02.04 – тертя та зношування в машинах  
Галузь знань 13 – механічна інженерія

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Хмельницький – 2024

Дисертацію є рукопис.

Роботу виконано в Хмельницькому національному університеті  
Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Стечишин Мирослав Степанович**,  
Хмельницький національний університет,  
професор кафедри галузевого машинобудування  
та агроінженерії.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Савуляк Валерій Іванович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри галузевого машинобудування;

кандидат технічних наук, доцент  
**Лисенко Сергій Володимирович**,  
Центральноукраїнський національний  
технічний університет,  
доцент кафедри експлуатації та ремонту машин

Захист відбудеться «12» квітня 2024 р. о 14 годині на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 70.052.02 в Хмельницькому  
національному університеті Міністерства освіти і науки України за адресою:  
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 11, 3-й корпус, зала засідань.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Хмельницького  
національного університету Міністерства освіти і науки України за  
адресою: 29016, м. Хмельницький, вул. Кам'янецька, 110/1.

Автореферат розісланий «11» березня 2024 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



С. В. Смутко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Серед великої кількості видів поверхневого зміцнення металів безводневе азотування в тліючому розряді (БАТР) можна віднести до технологій універсального застосування. Це підтверджується тим, що ця технологія може застосовуватись як для деталей і вузлів тертя, так і для інструменту, призначеного для обробки різних матеріалів (метали, деревина, мінерали тощо), штампів, прес- та форм для лиття (формування виробів з пластмас, легких сплавів тощо).

Найбільш поширена технологія азотування в аміачних газових середовищах, що є наслідком наслідування традицій пічного азотування. Проте в результаті цього варіанта процесу виникають негативні явища водневого окрихчення, а іншим негативним наслідком є екологічна небезпечність. Вказані недоліки обґрунтовують перспективність безводневого азотування в тліючому розряді, яке є абсолютно екологічно чистим та забезпечує кращі показники пластичності поверхні. У цьому напрямі відомі роботи Каплуна В. Г., Ляшенка Б. А., Олександренка В. П., Пастуха І. М., Похмурського В. І., Стечишина М. С., Kellera K., Kolbela J.

Відомі теоретичні моделі процесу, сформовані в багатьох роботах, зосереджують увагу в основному на дифузійних явищах в модифікованому поверхневому шарі, проте не можуть адекватно пояснити деякі процеси, характерні для азотування в тліючому розряді. Тому актуальність розробки теоретичних основ, які базуються насамперед на базових положеннях фізики газорозрядних процесів та застосування їх до пояснення процесів БАТР, безсумнівна.

Тенденцією останнього періоду розвитку досліджуваного напрямку стало використання циклічного живлення. Маючи всі переваги, що характерні для БАТР, цей метод дозволяє певні спрощення технологічних умов модифікації, які насамперед пов'язані з відсутністю переходу тліючого розряду в дуговий і суттєво знижують вимоги до характеру позиціонування деталей в садці.

В теоретичному плані процес азотування в переривчастому (циклічно-комутованому розряді) практично не досліджувався. Відсутні основи, на базі яких можливе проектування технологічних режимів, їх оптимізація. Немає критеріїв, на основі яких прогнозувались би 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. В методологічному плані певну проблему складають питання оцінки стану поверхні після модифікації, а також методика визначення характеристик стійкості триботехнічних систем, що вирішувалася на основі механо-хімічної моделі процесу тертя та зношування у працях Олександренка В. П. і Шевелі В. В. Перераховані аспекти, а також

розробка питань, пов'язаних із апаратурною реалізацією циклічно-комутованих процесів БАТР з взаємозалежними та автономними енергетичними параметрами і становить суть цієї роботи.

**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 напрями розвитку науки і техніки» від 11.07.2001 № 2623–IV, планів наукових досліджень ХНУ в рамках держбюджетних робіт, які виконувалися на кафедрі галузевого машинобудування та агроінженерії ХНУ: «Наукові підходи і технології підвищення зносостійкості і довговічності важко навантажених конструкційних елементів при циклічному контактному навантаженні» (№ держ. реєстр. 0115U000226), «Наукові основи підвищення контактної витривалості та зносостійкості конструктивних елементів з покриттями при терті кочення» (№ держ. реєстр. 0117U001167) та держбюджетних робіт, які проводилися в ПНФТЦ ХНУ за темами: «Теорія процесів модифікації металевих поверхонь в тліючому розряді з автономними параметрами розряду» (№ держ. реєстр. 0115U000222) і «Теоретичні та практичні основи інтенсифікації вакуумно-дифузійних процесів в тліючому розряді металевих поверхонь деталей військового та подвійного призначення» (№ держ. реєстр. 0119U100679).

**Мета і завдання дослідження.** Метою досліджень 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 для забезпечення їх зносостійкості.

**Цій меті підпорядковані наступні завдання:**

- теоретично обґрунтувати і практично дослідити процес азотування в циклічно-комутованому розряді з можливістю формування зносостійких азотованих шарів на конструкційних сталях;

- модернізувати установку для реалізації автономних режимів азотування з циклічно-комутованим розрядом для підвищення трибологічних характеристик конструкційних сталей шляхом послідовного з'єднання ключових елементів та організації для них синхронного керування;

- виявити закономірності зношування конструкційних сталей, азотованих в енергетичних полях з нестационарним живленням;

- встановити вплив локальних винятків поверхонь на процес азотування та зносостійкість деталей, зміцнених в енергетичних полях з нестационарним живленням;

- дослідити процеси БАТР довгомірних отворів в циклічно-комутованому розряді з метою підвищення їх зносостійкості;

- дослідити вплив БАТР в циклічно-комутованому розряді на зносостійкість азотованих поверхонь конструкційних сталей при граничному та сухому терті;

– розробити рекомендації щодо визначення режимів азотування металів в циклічно-комутованому розряді для підвищення зносостійкості та передати їх на виробництво.

**Об'єкт дослідження** – процес безводневого азотування металів в циклічно-комутованому розряді та їх вплив на тертя та зношування зміцнених поверхонь конструкційних сталей.

**Предмет дослідження** – закономірності формування трибологічних характеристик конструкційних сталей після БАТР в циклічно-комутованому розряді.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження проводилися на основі фундаментальних положень трибології, фізики низькотемпературних газорозрядних процесів, енергетичній теорії БАТР.

Лабораторні та стендові дослідження проводилися на створених або модернізованих установках. Обробку результатів експерименту виконано із застосуванням комп'ютерних технологій з використанням методів математичної статистики та пакетів прикладних програм.

**Наукова новизна отриманих результатів полягає 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).

### **Практичне значення одержаних результатів.**

– 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;

– 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;

– 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;

– 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».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. З робіт, опублікованих у співавторстві, використано результати отримані автором особисто.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові та експериментальні результати оприлюднено на наукових конференціях професорсько-викладацького складу кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії ХНУ (2016–2019 р.); на Міжнародних науково-технічних конференціях: 11-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-

механіків у Львові (м. Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2013); Ольвійському форумі – 2014: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі (м. Миколаїв : вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014); 12-му Міжнародному симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2015); на восьмій міжнародній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (м. Київ, 2015); VIII Міжнародній науково-практичній конференції вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства» (м. Київ, 2019); 16-му Міжнародному симпозіумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2023).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 28 наукових праць, у тому числі 10 статей – у фахових виданнях, 2 – у виданнях, що входять до Міжнародної наукометричної бази, 6 тез доповідей – на міжнародних наукових технічних конференціях, отримано 8 патентів України. Опубліковано 2 монографії.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 125 найменувань і 7 додатків. Повний обсяг роботи становить 211 сторінок друкованого тексту, з них основного тексту – 151 сторінка, 79 рисунків, 9 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами, сформульовано мету та завдання досліджень, визначено об'єкт, предмет, розкрито наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано інформацію щодо особистого внеску здобувача, апробації результатів досліджень, структури та обсягу дисертації.

У **першому розділі** на основі аналізу літературних джерел здійснено класифікацію усіх субпроцесів, що супроводжують азотування в тліючому розряді. Результат впливу на модифікацію тих чи інших субпроцесів може бути різним, оскільки одні з них безпосередньо чи через інші формують фазовий склад модифікованої поверхні (дифузанти), а деякі тільки впливають на кінетику взаємозв'язаних з ними субпроцесів (дифундантів). Тобто вплив субпроцесів може бути як стимулюючий, що сприяє збільшенню швидкості азотування, так і гальмуючим її.

Для практичного оперування (керування) цією моделлю найбільш ймовірно стане необхідність додаткового аналізу вагомості кожного із субпроцесів з вичлененням тільки найвпливовіших. Ця процедура ще й має важливе значення з тієї точки зору, що саму суть переваг модифікації

з використанням тліючого розряду з нестационарним живленням становить можливість оперативного коригування ходом формування структури модифікованого (зміненого) шару за рахунок штучного стимулювання субпроцесів, які в даний конкретний момент сприятимуть першочерговій реалізації тих з них, що мають вирішальне значення для отримання триботехнічної системи з заданими властивостями. Створення моделі подібних процесів дозволить не тільки забезпечити автоматизацію модифікаційних технологій, але й надасть можливість керувати їх реалізацією.

Залежно від енергетичних умов при модифікації поверхні шляхом БАТР мають місце основні конкуруючі, взаємодоповнюючі і взаємозаперечувальні субпроцеси: утворення нітридів, дифузійне насичення поверхневого шару азотом і розпорошення поверхні. Енергетичні умови перебігу головних субпроцесів суттєво відрізняються: утворення нітридів відбувається при низьких енергіях, натомість процес розпорошення поверхні активізується при високих значеннях напруги.

Встановлено, що з 4-х існуючих енергетичних моделей азотування найбільш адекватно описує протікання усіх етапів субпроцесів БАТР енергетична теорія Пастуха І. М., розроблена в Подільському науковому фізико-технологічному центрі при Хмельницькому національному університеті, яка з відповідними доповненнями і уточненнями може бути примінена (застосована) для проведення досліджень і аналізу трибологічних характеристик металів при БАТР з нестационарним джерелом живлення. Саме ця енергетична модель лягла в основу усіх подальших експериментальних і теоретичних досліджень описаних в дисертації.

Результати проведених досліджень впливу БАТР для підвищення зносостійкості закритих і відкритих трибологічних пар дозволяють суттєво (до 10 разів в нейтральних і лужних середовищах та в 3 рази при терті в мастилі) підвищити надійність і довговічність роботи деталей вузлів тертя.

Проаналізовано наявну класифікацію процесів БАТР, яку доповнено включенням критеріїв видів джерел живлення (постійних та циклічно-комутованих), що стало основою визначення мети роботи і напрямів теоретичних та експериментальних досліджень.

У **другому розділі**, виходячи з практики застосування матеріалів для дослідження, вибрано конструкційні сталі марок: 20 і 45 – вуглецеві якісні, 40X – хромиста і 38X2МЮА – хромоалюмінієва з молібденом високоякісна, – що найчастіше використовуються для азотування в тліючому розряді.

Дослідження елементного складу виконано на енергодисперсійному рентенофлуоресцентному спектрометрі «Спрут» виробництва «Укррентген» з SDD детектором X-123 (Amptek, США). Ідентифікацію марки сталі здійснено шляхом визначення вмісту восьми хімічних елементів. Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,98 Н (0,1 кг) з фіксацією її значень як на поверхні, так і на певній відстані від неї в глибину зразка, а саме: 0, 25, 50, 100, 200, 300, 500 мкм.



Рентгенофазовий аналіз здійснено на дифрактометрі рентгенівському загального призначення ДРОН-3 у фільтрованому випромінюванні залізного анода, в діапазоні кутів  $2\theta$  від  $20^\circ$  до  $100^\circ$  з кроком сканування  $0,1^\circ$  і часом експозиції 10 с. Рентгенозйомку виконано від плоских торців циліндричних азотованих зразків в глибину модифікованого шару. Задля забезпечення незалежності енергетичних параметрів режиму БАТР установку було модернізовано: в газорозрядну камеру встановлено блок нагрівальних елементів, а в електричну схему додано блок живлення від незалежного джерела, а також блок комутації і контролю циклічно-комутованого розряду.

Експериментальні дослідження зразків на зносостійкість проведено на універсальній машині для випробування матеріалів на тертя моделі 2168УМТ. Схема тертя – «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.

Створено пристрої для моделювання процесів БАТР довгомірних отворів. Моделі – це пустотілі циліндри, в яких на різних відстанях від торця просвердлено серію радіальних отворів. В ці отвори вставляють зразки. Кожен зразок азотується з двох торців. При глухому отворі один з торців циліндра закривається кришкою. Повна довжина моделей становить 360 і 400 мм, діаметр отворів – 20 і 40 мм. Таким чином найбільший коефіцієнт відношення довжини вісі розміщення отвору до його діаметра складав 18 та 10, відповідно.

У **третьому розділі** проаналізовано можливість азотування сталей змінним струмом промислової частоти. Розроблено пристрій для азотування в тліючому розряді шляхом введення джерела з нестационарним живленням із змінним струмом встановленої частоти. Значення запропонованого пристрою полягає насамперед в можливості суттєвого спрощення конструкції установки для азотування в тліючому розряді та підвищення її надійності, а також в зменшенні вартості устаткування. При цьому підвищується надійність роботи установки і зменшується собівартість обробки азотованих деталей.

На хід та результати азотування також впливає використання змінного струму, оскільки періодична зміна полярності електродів камери сприяє процесам очищення поверхні від адсорбційного шару, що, в свою чергу, позитивно впливатиме на ступінь 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 градієнта твердості по глибині (градієнт знизився в 1,7–3,5 рази), що, в свою чергу, підвищує зносостійкість деталей та якісні показники обробки деталей. Ідея використання

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

Проаналізовано 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 як модель вибрано найбільш загальний варіант – внутрішній локальний виняток клиновидної форми (рис. 1). Розрахункова схема внутрішнього локального винятку поверхні у вигляді клиноподібного паза показана на рис. 2.

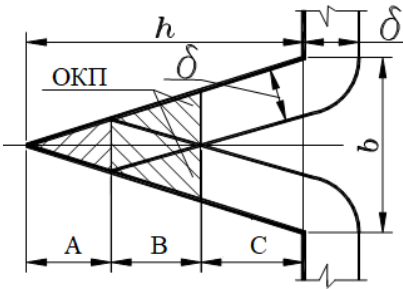


Рис. 1. Схема внутрішнього локального винятку поверхні (А – зона повного перекриття розряду, В – часткового, С – звичайного)

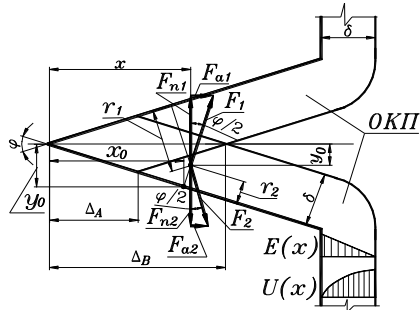


Рис. 2. Розрахункова схема внутрішнього локального винятку поверхні

Враховуючи прийнятий лінійний закон розподілу напруженості поперечних полів  $E(x)$  та параболічний закон зміни падіння напруги в області катодного падіння (ОКП)  $U(x)$ , отримано значення коефіцієнта концентрації поля для внутрішніх локальних винятків у формі клиноподібного паза:

$$K_E = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta/\operatorname{tg}(\varphi/2)} \left( \int_{x_0}^{\Delta_B} \sqrt{1 + \left( \frac{d(y(x))}{dx} \right)^2} dx \right) dX. \quad (1)$$

Таким чином, визначено критерій концентрації поля і вирішено аналітичну задачу взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля.

Досліджено вплив розмірів внутрішніх локальних винятків на концентрацію електричного поля. Результати досліджень можна використовувати для визначення розподілу густини струму по поверхні азотування, а розроблений аналітичний апарат застосовувати для розрахунку показників концентрації електричного поля в тліючому розряді, який використовується для поверхневої модифікації металевих деталей.

У **четвертому розділі** проведено теоретичний і експериментальний аналіз азотування довгомірних отворів. Результати дослідження засвідчили, що переважна більшість випадків азотування подібних об'єктів модифікації відповідає за своїми фундаментальними ознаками газорозрядним процесам з пустотілим катодом. Проте підлягає окремому аналізу вплив співвідношень геометричних розмірів отворів та геометричних характеристик ОКП газового розряду на характер процесів обробки (рис. 3). Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що довжина поверхні отвору, на якій спостерігається розряд при умовно лінійному законі розподілу напруженості поля, дорівнює діаметру (координата середини розподілу знаходиться на відстані половини діаметра від торця отвору).

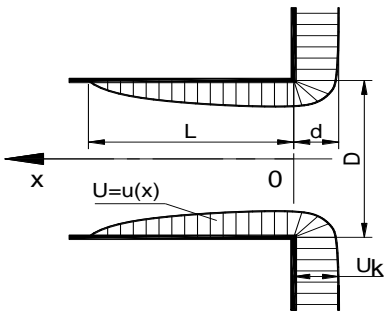


Рис. 3. Схема параметрів розряду в отворі

Очевидно, що вирішальну роль відіграватиме відношення діаметра отвору до ширини ОКП. За вказаним критерієм можливі такі ситуації.

1. Діаметр отвору менший від подвійної ширини ОКП ( $D < 2d$ ). У цьому випадку ОКП протилежних частин катода частково (в граничному випадку – повністю) перекривається, схема відповідає умовам існування розряду з пустотілим катодом.

2. Діаметр отвору дорівнює подвійній ширині ОКП.

Оскільки електрони в будь-якому випадку за інерцією залітають в протилежну зону ОКП (найбільш ймовірно на величину середнього значення довжини вільного пробігу), то, як і в попередньому випадку, буде спостерігатися ефект розряду з пустотілим катодом, хоча і меншою мірою.

3. Діаметр отвору дещо більший за подвійну ширину ОКП. В центрі отвору залишається зона, в якій поле не діє (площа цієї ділянки  $0,25 \pi (D - 2\delta)^2$ ). Через цю центральну ділянку проходить постачання дифузантив пропорційно тій частині струму розряду, яка проходить через приторцеву частину поверхні. Ймовірно, може мати і місце обернена причина – гальмування постачання за законами, як у гідродинаміці, що і визначає обмеженість внутрішньої ділянки отвору, яка потенційно може азотуватись. Цей опір рухові часток через торець може мати як критичну швидкість дрейфу частинок, так і суттєвий характер руху частинок.

4. Діаметр отвору значно перевищує подвійну ширину ОКП. Через центральну частину отвору при допустимій критичній швидкості дрейфу частинок газового середовища, яка визначається цілою низкою факторів, згаданих в п. 3, внутрішня порожнина модифікованого об'єкту постачається компонентами газу, що слугають основою для утворення нітридів.

Область катодного падіння має ширину  $\delta$ , яка поступово вздовж отвору в глибину його зменшується і на відстані подвійного діаметра  $2D$  від торця дорівнює нулю (рис. 4).

Частинки азоту  $N_2$  або  $N$  входять в ОКП під довільним кутом  $\bar{\beta}$ , який визначається за методикою:

$$\bar{\beta}(p, U, v) = 90(1 - a(p, U)^{-2av}) - b(p, U)ve^{-0,1v^c}. \quad (2)$$

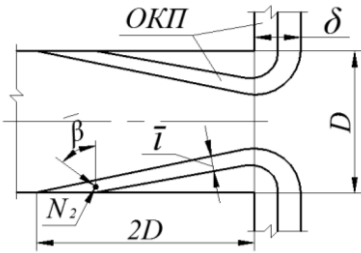


Рис. 4. Схема області катодного падіння біля торця довгомірного отвору

що послідовно за певною частиною періоду, в якій розряд отримує живлення, наступає проміжок часу, коли воно відсутнє. При відсутності живлення рух іонів в ОКП продовжується за інерцією, проте на них вже не діє сила  $F(y)$  від поля, яке в цей момент відсутнє. За таких умов енергія іонів визначається через різницю потенціалів поля в точках передостанньої  $\phi_0$  та останньої  $\phi_y$  сучіток  $\epsilon_0 = q_e(\phi_0 - \phi_y)$ . З цим допущенням втрата енергії іоном під час сучітки значно спрощується:

$$\Delta\epsilon = \frac{2m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} \epsilon_0, \quad (3)$$

де  $m_1$  і  $m_2$  – маси іону азоту і частинки;  $\epsilon_0$  – початкова енергія азоту до сучітки.

Час, який необхідний для проходження іоном зони ОКП в бік внутрішнього простору отвору,  $t = \delta/\bar{V}_+$ , не повинен бути більшим від тривалості перерви в подачі живлення розрядом. Враховуючи, що тривалість подачі напруги на електроди розрядної камери  $t_0 = T/S = 1/\nu S$  ( $\nu$  – частота коливань напруги на електродах камери,  $S$  – шпаруватість сигналу), тривалість паузи  $t_n = T - t_0$ . Параметри коливань (частота, шпаруватість)

Оскільки отримане з цього рівняння значення швидкості суттєво менше від швидкості електронів  $V_1$ , яка відповідає потенціалу іонізації, то для ударної іонізації компонентів газового середовища в першому від анода прошарку вільного пробігу немає ніяких умов. Через низьку швидкість електронів відсутні умови і для ступінчастої іонізації.

Принципова відмінність азотування з переривчастим живленням розряду порівняно із стаціонарним полягає в тому,

встановлюються також з огляду на ту обставину, що тривалість подачі напруги повинна бути достатньою, щоб іон при певній швидкості, якої він досяг, проходив відстань, що дорівнює довжині вільного пробігу. Наведений аналіз вказує на принципову можливість азотування внутрішньої поверхні довгомірних отворів при переривчастому живленні розряду за рахунок ефекту накачування іонів азоту з області катодного падіння.

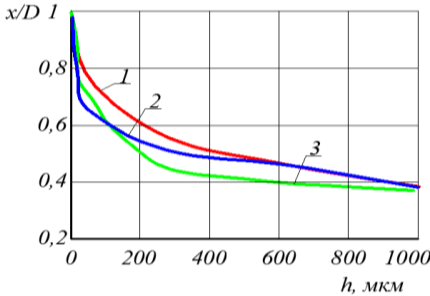


Рис. 5. Порівняння відношень мікротвердості по глибині модифікованого шару до мікротвердості на торці (1 – циклічно-комутований режим; 2 – режим з постійним струмом, де торці відкриті; 3 – режим з постійним струмом, де один торець закритий) різних відстанях від торця моделі, однакова (рис. 6, а), для сталі 38Х2МЮА в 1,3–1,6 разів менша, ніж при інших режимах зміцнення (рис. 6, б, в).

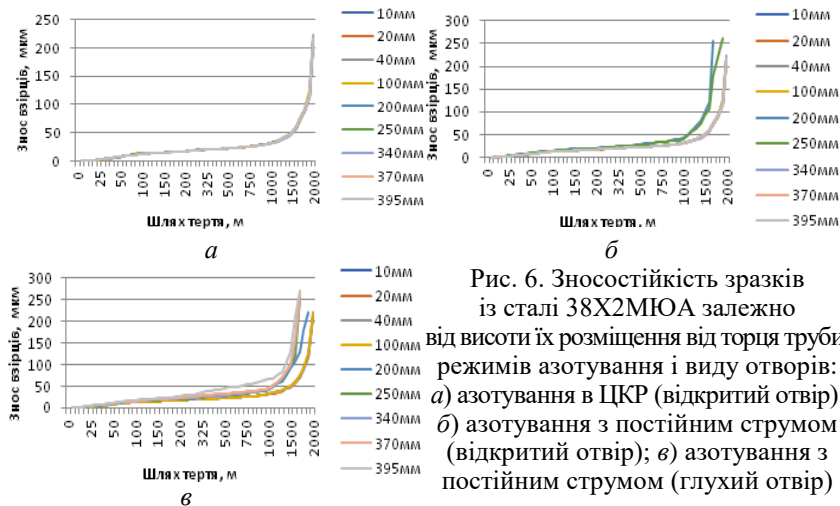


Рис. 6. Зносостійкість зразків із сталі 38Х2МЮА залежно від висоти їх розміщення від торця труби, режимів азотування і виду отворів: а) азотування в ЦКР (відкритий отвір); б) азотування з постійним струмом (відкритий отвір); в) азотування з постійним струмом (глухий отвір)

У **п'ятому розділі** розглянуто питання апаратного забезпечення процесу азотування в тліючому розряді з циклічно-комутованим живленням. Проведено аналіз існуючих методів реалізації електронного ключа та режимів їх роботи. Під час аналізу встановлено, що основним недоліком існуючих рішень є те, що при їх практичній реалізації не було враховано значні стрибки напруги на комутуючому елементі, які виникають внаслідок замикання або розмикання ланцюга. Для усунення вказаної проблеми запропоновано нетривіальне рішення, яке полягає у послідовному з'єднанні ключових елементів та організації для них синхронного керування. Також було вирішене питання визначення параметрів керуючого сигналу по відношенню до властивостей робочої камери.

Для більшості субпроцесів, реально присутніх в моделі, їх ініціатором виступають електрони. Їх швидкість набагато більша від/за швидкості контрчастинок зіткнення, що дозволяє вважати останні умовно нерухомими, тому задача про середню швидкість відносного руху електронів і частинок зводиться до визначення середньої швидкості електронів.

Прийнявши, що ймовірність швидкості електронів  $V_{(x)}$  в будь-якому шарі з координатою  $x$  в області катодного падіння підлягає закону Максвела і лінійному закону зміни напруженості в ОКП, середня швидкість електронів становитиме:

$$\bar{V} = 0,921 \cdot \left[ -V_x^2 / W \left( -0,387 \cdot \sqrt[3]{M_x^2 / V_x^4} \right) \right]^{0,5} . \quad (4)$$

Експериментальну перевірку достовірності запропонованої методики здійснено шляхом порівняння розрахункових значень електричних параметрів розряду з дослідними, отриманими на промисловій установці для азотування в тліючому розряді. На зносостійкість впливають початковий стан поверхні та її фізико-механічні характеристики, тиск на поверхні контакту, швидкість ковзання, і всі вказані параметри для граничного режиму тертя знаходяться в тісному взаємозв'язку.

Із зазначеного вище 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 важко порівнювати. Випробування азотованих зразків в умовах граничного тертя показали (рис. 7), що практично при будь-якому тиску настає момент, коли процес зношування майже припиняється, проте ресурсний шлях, при якому спостерігається подібна стабілізація, відмінний для різних значень тиску. Тобто 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 відміну від методики експериментальних досліджень, заснованої на принципі застосування граничного тертя, в режимі сухого тертя суттєвих результатів можливо досягти при однакових значеннях тиску

практично для всіх сталей, що виключає при аналізі результатів досліджень питання порівнянності.

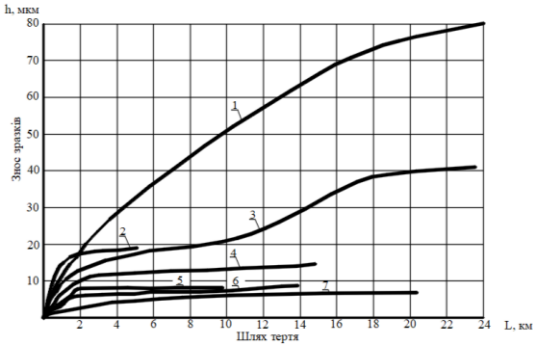


Рис. 7. Знос зразків зі сталі 45 азотованої залежно від шляху при тиску в зоні контакту та швидкості ковзання:  
 1 – 65 МПа, 0,1 м/с; 2 – 50 МПа, 0,1 м/с; 3 – 120 МПа, 0,1 м/с;  
 4 – 80 МПа, 0,1 м/с; 5 – 40 МПа, 0,3 м/с; 6 – 65 МПа, 0,2 м/с; 7 – 20 МПа, 0,2 м/с

Графіки на рис. 8 підтверджують вплив на інтенсивність зношування фізико-механічних параметрів поверхні та її модифікації, при цьому міцніші сталі, а також сталі, котрі пройшли певну модифікаційну обробку, зношуються при однакових умовах (тиск та швидкість відносного руху, яка для всіх експериментів становила 0,1 м/с) з меншою інтенсивністю, що на графіках відповідає куту їх нахилу.

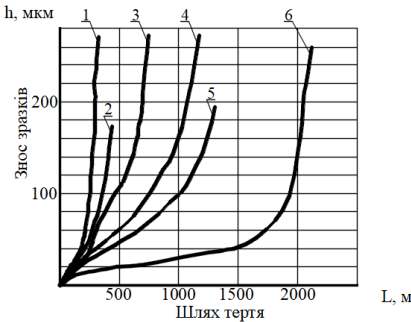


Рис. 8. Залежність лінійного зносу від шляху тертя та тиску: 1 – сталь 20,  $p = 16$  МПа; 2 – сталь 45,  $p = 16$  МПа; 3 – сталь 20,  $p = 10$  МПа; 4 – сталь 40X,  $p = 16$  МПа; 5 – сталь 45,  $p = 10$  МПа; 6 – сталь 38X2МЮА,  $p = 16$  МПа

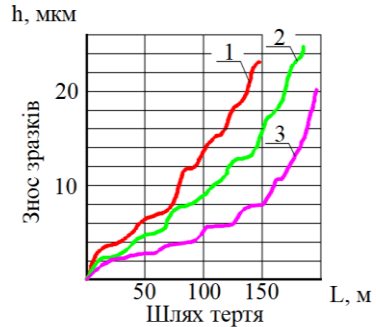


Рис. 9. Характер зношування поверхні в початковий період: 1 – сталь 20; 2 – сталь 40X; 3 – сталь 38X2МЮА

Ефект структурних перетворень поверхні підтверджується рис. 9, на якому показано результати фіксації лінійного зносу з малим інтервалом шляху тертя. Графік зношування в цьому випадку – ступінчата крива

слідування періодів утворення зміцнених структур на поверхні, коли зношування практично відсутнє, та періодів руйнування цих поверхневих структур. Для модифікованих поверхонь подібне явище особливо характерне в початковий період, коли зношується зона нітридів та зона внутрішнього азотування. Встановлено ще одне важливе для аналізу впливу результатів модифікації на параметри зносостійкості поверхні явище – ефект релаксаційних процесів в приповерхневих шарах, котрі вже набули деяких структурних перетворень під дією тиску в зоні тертя.

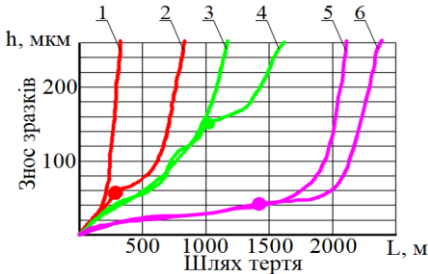


Рис. 10 – Ефект релаксаційних структурних перетворень поверхні:

1, 2 – сталь 20; 3, 4 – сталь 40Х; 5, 6 – сталь 38ХМЮА (крапками відмічені моменти зупинки випробувань) приповерхневих шарах. Наслідком цього може бути зміцнення поверхні, що пояснює зниження інтенсивності процесу зношування. З часом в міру руйнування зміцненого прошарку показники стану поверхні дорівнюватимуть тим, що були до перерви, а інтенсивність зношування відновиться.

У **додатках** подано перелік патентів України автора, таблиця результатів експериментальних даних, акти впровадження і реалізації проведених досліджень.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу, яка має важливе народногосподарське значення, що полягає у подальшому розвитку теоретичних і практичних положень енергетичної теорії БАТР І. М. Пастуха та визначенню режимів азотування в циклічно-комутованому розряді для деталей, в тому числі з довгомірними отворами і винятками, з метою підвищення зносостійкості їх робочих поверхонь.

Основні результати і висновки:

1. Встановлено, що залежно від енергетичних умов при модифікації поверхні шляхом АТР мають місце основні конкуруючі, взаємодоповнюючі і взаємозаперечуючі субпроцеси: утворення нітридів, дифузійне насичення поверхневого шару азотом і розпорошення поверхні. Енергетичні умови перебігу головних субпроцесів суттєво відрізняються. Так, утворення нітридів відбувається при низьких енергіях, натомість процес розпорошення поверхні



активізується при високих значеннях напруги, а процес дифузії азоту в глибину шару проходить при високих значеннях струму. Таким чином, енергетична теорія БАТР І. М. Пастуха адекватно пояснює результати підвищення зносостійкості зміною співвідношення структурних складових фазового складу поверхневого модифікованого шару.

2. Виявлено вплив змінного струму на хід та результати азотування, оскільки циклічна зміна полярності електродів камери сприяє процесу очищення поверхні від адсорбційного шару, позитивно впливає на характер насичення поверхні азотом (градієнт зміни мікротвердості по глибині азотованого шару знижується в 1,7–3,5 рази), сприяє суттєвій зміні фазового складу поверхневого модифікованого шару (патент України № 113569) що в 1,35–1,75 разів підвищує зносостійкість деталей. Враховуючи багатогалузевий характер можливого використання означеної технології модифікації поверхонь деталей та інноваційного обладнання, теоретичні дослідження процесу особливо актуальні для багатьох галузей промисловості. Напрацювань у вибраному напрямі направлено на подальше зростання виробництва в Україні високотехнологічного устаткування та продукції.

3. Визначено критерій концентрації поля і вирішено аналітичну задачу взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля. Досліджено вплив розмірів зовнішніх і внутрішніх локальних винятків на концентрацію електричного поля. Результати досліджень і розроблений аналітичний апарат дозволяють досягати більш рівномірних трибологічних характеристик усіх поверхонь деталей.

4. Встановлено основні закономірності та умови азотування в тліючому розряді довгомірних отворів. Запропоновано рекомендації щодо параметрів електричного розряду в газі для забезпечення ефективності процесу модифікації внутрішніх поверхонь довгомірних отворів. Встановлено умови та обмеження існування розряду, при яких можливий ефект накачування іонів в отвір. Проведений аналіз зміцнення поверхонь азотуванням в циклічно-комутованому розряді внутрішніх довгомірних отворів показав їх ефективність в збільшення зносостійкості отворів від 1,35 до 1,85 рази в результаті підвищення фізико-механічних характеристик азотованого шару по усій довжині отвору, порівняно з азотуванням в постійному струмі.

5. Запропоновано аналітичні залежності знаходження середньої швидкості електронів на основі моделі базової швидкості, що має електрон, який пролетів без зіткнень від катода до певної точки області катодного падіння. Виконано експериментальну перевірку методики визначення середньої швидкості електронів, що дозволяє впливати на інтенсивність протікання субпроцесів азотування, фазовий склад і зносостійкість зміцненого шару.

6. Процес зношування в режимі граничного тертя фактично включає два конкуруючих процеси: ущільнення поверхневого шару та підвищення його мікротвердості і руйнування поверхневого шару з локальним схопленням поверхонь тертя. Дослідження зносостійкості в режимі сухого тертя забезпечує суттєво більшу продуктивність проведення експериментів. На відміну від

експериментів з граничним тертям, 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 проведених експериментів таким компромісним значенням тиску може бути 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.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *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 : коллективная монография. – Одесса : Куприенко СВ, 2016. – С. 123–135. (*Проаналізовані переваги і недоліки процесів азотування з ЦКР*).

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. [Collective monograph]: Bydgoszcz, Poland–2021. – P. 488–499. (*Досліджено зносостійкість азотованих шарів на сталях 45 і 38Х2МЮА*).

### *У виданнях, що внесені до переліку міжнародних наукометричних баз*

3. Pastukh I. M. Average Velocity of Electrons in the Cathode Fall Region during Glow-Discharge Nitriding / I. M. Pastukh, V. V. Lyukhovets' // Technical Physics. – 2017. – Vol. 62, No. 4. – Pp. 527–536. ISSN 1063-7842. (*Проведена експериментальна перевірка розрахункових значень середньої швидкості електронів*).

4. Stechyshyn M. S. Corrosion-mechanical wear of nitrided steels in acidic medium UDC 620.194 / M. S. Stechyshyn, N. M. Stechyshyna, O. V. Dykha, A. V. Martynyuk, V. V. Liukhovets, and M. V. Lukyanyuk // Materials Science: Springer (USA). – 2023. – 58 (5). – Pp. 597–601. (*Проаналізовано вплив режимів БАТР на КМЗ конструкційних сталей*).

### *У фахових виданнях*

5. Каплун П. В. Дослідження трибологічних характеристик та довговічності конструктивних елементів з дифузійними і комбінованими покриттями / П. В. Каплун, В. В. Люховець, Г. С. Глушак // Вісник Технологічного університету Поділля. Технічні науки. – Хмельницький. – 2000. – Ч. 1. – № 5. – С. 85–87. (*Знаходження і аналіз трибологічних характеристик отриманих покриттів*).

6. Пастух І. М. Аналіз процесів азотування в тліючому розряді отворів з відносно малим діаметром / І. М. Пастух, В. В. Люховець, М. В. Лук'янюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 5. – С. 6–9. (*Для аналізу запропоновано лінійний закон розподілу напруженості електричного поля*).

7. Пастух І. М. Внутрішні локальні винятки поверхні, азотованої в тліючому розряді / І. М. Пастух, В. В. Люховець // Вісник Хмельницького

національного університету. Технічні науки. – 2015. – № 6. – С. 12–15. (*Запропонована схема внутрішнього локального винятку та лінійного розподілу поперечних та поздовжніх полів розподілу напруження і параболічний закон падіння напруги*).

8. Пастух І. М. Ефект накачування іонів азоту в отвори відносно малого діаметра / І. М. Пастух, В. В. Люховець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 3. – С. 138–146. (*Експериментально перевірені параметри технологічного режиму з ЦКР для азотування отворів*).

9. Пастух І. М. Обрунтування азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 1. – С. 7–9. (*Проведено аналіз переваг і недоліків АТР з живленням змінним струмом*).

10. Курской В. С. Апаратна реалізація живлення циклічно-комутованого розряду в установках азотування / В. С. Курской, В. В. Люховець, О. С. Здибель // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 27–31. (*Запропонована схема послідовного з'єднання ключових елементів для комутування*).

11. Стечишин М. С. Технологія азотування в тліючому розряді сталей різального комплексу м'ясоподрібнювальних машин / М. С. Стечишин, В. П. Олександренко, М. В. Лук'янюк, В. В. Люховець, М. М. Лук'янюк // Проблеми трибології. – Хмельницький. – 2017. – № 2. – С. 50–54. (*Визначені трибологічні характеристики азотованих сталей*).

12. Скиба М. Є. Безводне азотування у тліючому розряді як метод підвищення зносостійкості конструкційних сталей. / М. Є. Скиба, Н. М. Стечишина, Н. К. Медведчук, М. С. Стечишин В. В. Люховець // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 5. – С. 7–12. (*Дослідження та аналіз впливу процесів БАТР на зносостійкість металів*).

13. Стечишина Н. М. Вплив технологічних параметрів карбоазотування на зносостійкість сталі 45 / Н. М. Стечишина, В. В. Люховець, М. С. Стечишин // Проблеми тертя та зношування. – Київ : НАУ, 2019. – № 3 (84). – С. 76–82. (*Досліджена зносостійкість карбоазотованої сталі 45*).

14. Stechyshyn M.S. Wear resistance of structural steels nitroded in cyclic-commuted discharge at limit modes of friction / M. S. Stechyshyn, V. V. Lyukhovets, N. M. Stechyshyna, M. I. Tserenyuk. // Problems of Tribology. – Khmelnytskyi : KHNNU, 2022. – V. 27. – № 3/105. – P. 27–33 (*Проведення експериментальних випробувань при граничних режимах тертя*).

#### **Патенти та заявки на винаходи**

15. Пат. 111949 Україна, МПК С 23 С 8/00, С 23 С 8/48, С 23 С 8/68. Спосіб підвищення корозійної стійкості металевих поверхонь / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель ; заявник і патентовласник Хмельниц. нац. ун-т. – № у 2016 06058 ; заявл. 03.06.2016 ; опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22. (*Запропоновано проведення карбонітрування*).

16. Пат. 112613 Україна, МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. Спосіб азотування в тліючому розряді оберненої полярності з періодичною очисткою поверхні / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель ; заявник

і патентовласник Хмельниц. нац. ун-т. – № у 2016 06139 ; заявл. 06.06.2016 ; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24. (*Запропонована періодична очистка поверхні*).

17. Пат. 112984 Україна, МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/24. Спосіб азотування в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель ; заявник і патентовласник Хмельниц. нац. ун-т. – № у 2016 05934 ; заявл. 01.06.2016 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1. (*Знайдено період тривалості очистки*).

18. Пат. 112983 Україна, МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. Спосіб азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель ; заявник і патентовласник Хмельниц. нац. ун-т. – № у 2016 05929 ; заявл. 01.06.2016 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. №1. (*Проведена експериментальна перевірка*).

19. Пат. 113576 Україна, МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. Спосіб азотування азотоактивних металів в тліючому розряді з періодичною очисткою поверхні / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель, Н. С. Машовець ; заявник і патентовласник Хмельниц. нац. ун-т. – № у 2016 06403 ; заявл. 13.06.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. (*Запропоновано подачу короткочасного імпульсу напруги та визначено її величину*).

20. Пат. 113569 Україна, МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. Спосіб азотування в тліючому розряді з оберненою полярністю / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель ; заявник і патентовласник Хмельниц. нац. ун-т. – № у 2016 06036 ; заявл. 03.06.2016 ; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3. (*Проведені експериментальні дослідження*).

21. Пат. 115969 Україна, МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. Спосіб азотування в тліючому розряді з оптимізацією технологічного режиму / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, Т. А. Надопта ; заявник і патентовласник Хмельниц. нац. ун-т. – № у 2016 06133 ; заявл. 06.06.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. №9. (*Проаналізовано вплив фазових структурних складових азотованого шару на трибологічні характеристики сталей*).

22. Пат. 118327 Україна, МПК С 23 С 8/36, С 23 С 8/48. Пристрій для азотування в тліючому розряді з живленням змінним струмом / І. М. Пастух, Г. М. Соколова, В. В. Люховець, О. С. Здибель ; заявник і патентовласник Хмельниц. нац. ун-т. – № у 2016 06460 ; заявл. 13.06.2016 ; опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15. (*Запропоновано включити в пристрій блок автоматичного відключення напруги*).

### **Матеріали і тези конференцій**

23. Люховець В. В. Перспективи азотування малих отворів у тліючому розряді з нестаціонарним живленням / В. В. Люховець // 11-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : тези доп. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2013. – С. 195.

24. Люховець В. В. Азотування в тліючому розряді деталей з малими отворами із застосуванням змінного живлення / В. В. Люховець // Ольвійський форум – 2014: стратегії країн Причорноморського регіону в геополітичному просторі : тези. – Миколаїв : вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2014. – С. 52–53.

25. Люховець В. В. Процеси азотування в тліючому розряді отворів з відносно малим діаметром / В. В. Люховець // 12-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : тези доп. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2015. – С. 90–91.

26. Люховець В. В. Азотування в тліючому розряді отворів малого діаметра / Люховець В. В. // Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів : зб. тез доп. восьмої міжнар. конф. студентів та аспірантів та молодих вчених. – Київ, 2015. – С. 45.

27. Курской В. С. Зміщення робочих поверхонь сільськогосподарського знаряддя методом азотування в тліючому розряді / В. С. Курской, В. О. Курская, В. В. Люховець // Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольства : зб. пр. за підсумками VIII Міжнар. наук.-практ. конф. вчених, аспірантів і студентів (м. Київ, 17 квіт. 2019 р. – 18 квіт. 2019 р.). – Київ : РВВ НУБіП України, 2019. – С. 189–191. (*Проведення експериментальних та експлуатаційних випробувань*).

28. Стечишин М. С. Азотування довгомірних отворів / М. С. Стечишин, В. В. Люховець, Д. В. Здоренко, В. В. Курской // 16-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові : матеріали симпозіуму. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2023. – С. 68–69 (*Теоретичні і експериментальні дослідження азотування отворів*).

## АНОТАЦІЯ

**Люховець В. В. Зносостійкість конструкційних сталей при азотуванні в циклічно-комутованому розряді.** – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.02.04 «Тертя та зношування в машинах» (13 – Механічна інженерія). – Хмельницький національний університет, Хмельницький, 2024.

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. Проте широкому впровадженню процесів БАТР перешкоджає відсутність загальних теоретичних основ, за яких стали б можливими оптимізація, ефективне керування та проектування технологічних процесів.

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

В роботі розвинуто положення теорії дифузійних газорозрядних процесів модифікації поверхні металів, які базуються на пріоритеті енергетичних підходів. З таких позицій теоретичні основи досліджуваних технологій не розглядалися жодним з попередніх дослідників, але якраз подібні підходи відкривають абсолютно нові можливості розкриття тонкого механізму явищ, котрі мають місце при реалізації процесів даного типу, і далі – розробки практичних аспектів використання технології азотування.

Значний науковий інтерес з перспективою широкого практичного використання становить задача застосування живлення, відмінного від

безперервного. Ці питання теоретично теж ніким не досліджувались. В той же час реально всі процеси вакуумно-дифузійної газорозрядної модифікації поверхні металів проходять в нестационарних електричних полях, оскільки забезпечити живлення абсолютно постійним струмом практично неможливо. Зміна характеристик поля призводить до першочергового проходження одного з декількох конкуруючих субпроцесів, які забезпечують або утворення дифундидів на поверхні, або їх розпорошення, або дифузію азоту в глибину поверхневого шару. Саме з допомогою керованої форми електричних показників поля в розрядній камері можлива нейтралізація в необхідній мірі загірного ефекту утворення на поверхні дифундидів, що дозволить не тільки підвищити ефективність модифікації, але й скеровано забезпечувати необхідні її кінцеві результати, в тому числі і структуру поверхневого модифікованого шару. Виходячи з концепції енергетичної моделі, теоретично обґрунтовано та проведено експериментальну перевірку впливу форми керуючого сигналу на ефективність процесів модифікації, оскільки цей фактор суттєво впливає на трибологічні характеристики азотованих шарів.

Трибологічні дослідження проводились на основі положень фізико-хімічної механіки матеріалів, розроблених Г.В. Карпенко, Г.О. Прейсом, А. Евансом і К. Пріс, Ф. Хеммітом, а також теорії структурного пристосування поверхневих азотованих шарів при терті Костецького Б. І. та механо-хімічної моделі процесу тертя і зношування Шевелі В. В. й Олександренка В. П.

Теоретичні положення, розроблені в роботі, передбачається використати не тільки в практиці застосування технологічних процесів досліджуваного типу, але у підготовці фахівців при викладанні навчальних курсів із принципово нових напрямів теорії та практики газорозрядних процесів обробки поверхні металів.

## SUMMARY

*Liukhovets V. V.* Wear resistance of structural steels during nitriding in a cyclically switched discharge. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy) on the specialty 05.02.04 "Friction and wear in machines" (13 – Mechanical engineering). – Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, 2024.

Physico-technical processes of processing metal surfaces with the use of electric discharge as an intensifier in a gas medium are among the least energy-intensive and universal in terms of purpose and use. However, the lack of general theoretical foundations, which would enable optimization, effective management and design of technological processes, hinders the widespread implementation of BATR processes.

The purpose of the research is the development of theoretical and practical foundations for increasing the wear resistance of metals by anhydrous nitriding in a cyclically switched discharge, as well as establishing the basic laws and conditions of nitriding long holes to ensure their wear resistance.

The paper develops the position of the theory of diffusion gas-discharge processes of metal surface modification, which are based on the

priority of energy approaches. From such positions, the theoretical foundations of the researched technologies were not considered by any of the previous researchers, but precisely such approaches open completely new possibilities for revealing the subtle mechanism of phenomena that take place during the implementation of processes of this type, and further - the development of practical aspects of the use of nitriding technology.

Significant scientific interest with the prospect of wide practical use is the problem of applying power other than continuous. These issues have also not been studied theoretically by anyone. At the same time, in reality, all processes of vacuum-diffusion gas-discharge modification of the surface of metals take place in non-stationary electric fields, since it is practically impossible to provide power with an absolutely constant current. A change in the characteristics of the field leads to the priority passage of one of several competing sub-processes, which ensure either the formation of diffuses on the surface, or their dispersion, or the diffusion of nitrogen into the depth of the surface layer. It is with the help of the controlled form of electric field parameters in the discharge chamber that it is possible to neutralize to the required extent the blocking effect of the formation of diffundides on the surface, which will allow not only to increase the efficiency of the modification, but also to provide the necessary final results, including the structure of the surface modified layer. Based on the concept of the energy model, the influence of the shape of the control signal on the efficiency of the modification processes was theoretically substantiated and experimentally verified, since this factor significantly affects the tribological characteristics of nitrided layers.

Tribological studies were carried out on the basis of the provisions of physico-chemical mechanics of materials developed by G.V. Karpenko, G.O. Preis, A. Evans and K. Preis, F. Hammit, as well as the theory of structural adjustment of surface nitrided layers during friction by B. I. Kostecki and the mechano-chemical model of the friction and wear process by V. V. Sheveli and V. P. Oleksandrenko. The theoretical propositions developed in the work are intended to be used not only in the practice of applying technological processes of the researched type, but also in the training of specialists when teaching courses on fundamentally new areas of theory and practice of gas-discharge processes of metal surface treatment.

**Key words:** wear resistance, improvement of tribological characteristics, dry friction, structural steels, nitriding, cyclically switched discharge, mathematical modeling.

Підписано до друку 08.03.2024. Формат 30×42/4.

Ум. друк. арк. – 0,9. Обл.-вид. арк. – 1,0.

Наклад 100 прим. Зам. № 16/24, 2024

---

Редакційно-видавничий відділ ХНУ.

29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1.

Свідоцтво про внесення в Державний реєстр, серія ДК № 4489 від 18.02.2013 р.