

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Савуляка Валерія Івановича
професор кафедри галузевого машинобудування
Вінницького 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.

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

Актуальність теми. 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 безводневого азотування перешкоджає їх недостатня продуктивність та ефективність, що є наслідком наявності процесів блокування та гальмування процесів насичення поверхні азотом та відсутності дієвих стимулів його дифузії вглиб.

Аналіз джерел інформації вказує на те, що всі відомі технологічні схеми реалізації процесів БАТР не забезпечують високу продуктивність модифікування поверхонь, а їх теоретичні моделі є гіпотетичними, оскільки повністю не підтверджуються експериментально. Низка варіантів реалізації вакуумно-дифузійних газорозрядних технологій взагалі не можуть бути пояснені на основі згаданих моделей. Відсутні критерії якості, а звідси і методи керування процесом з метою досягнення запланованих та необхідних для експлуатації показників. Отже, намагання автора роботи розробити нові технології процесів БАТР та конструктивні схеми їх реалізації є безумовно актуальним завданням. При цьому Люховець В.В. доповнює і розширює енергетичну теорію БАТР, яка розроблена в Хмельницькому національному університеті.

Значний науковий інтерес з перспективою широкого практичного використання має висунута та реалізована ідея застосування живлення



тліючого розряду струмами зі змінними параметрами, що може спростити реалізацію низки технологічних задач, зокрема азотування протяжних отворів. Важливим науковим завданням є забезпечення зміни пріоритетності проходження конкуруючих субпроцесів, які сприяють або утворенню дифундидів на поверхні, або їх розпорошення, або дифузії азоту в глибину поверхневого шару, що найбільше привабливо. Це може суттєво вплинути на триботехнічні характеристики модифікованих поверхонь і потребує додаткових досліджень.

Викладене вище дозволяє стверджувати про новизну запропонованих підходів, підтверджують актуальність, наукову та практичну цінність досліджень у цьому напрямку.

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 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.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). *Автором проведені теоретичні, експериментальні дослідження та експлуатаційні випробування на зносостійкість деталей зміцнених БАТР в циклічно-комутованому розряді.*

Наукова новизна одержаних результатів. На думку опонента наукова новизна роботи, яка стосується галузі наукової спеціальності 05.02.04 – тертя та зношування в машинах 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).

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

У першому розділі наведені результати аналізу вітчизняних і закордонних літературних джерел з наукових і практичних проблем дисертації. Проведене обґрунтування актуальності, мети роботи і напрямки вирішення поставленої наукової задачі.

При створенні моделі процесу для обґрунтування енергетичного підходу БАТР в якості головної початкової гіпотези була прийнята умова незмінності електричних параметрів розряду протягом всієї фази обробки. Як відомо, таких параметрів два – напруга U між електродами і густина струму j . З деякими умовностями можна вважати, що міжелектродна напруга, в основному, формує енергію часток падаючого потоку, а густина струму – його інтенсивність. Реально ці електричні параметри процесу БАТР не можуть бути стабільними. А оскільки вони в основному формують інтенсивність усіх елементарних субпроцесів, які забезпечують модифікування поверхонь

матеріалів, то його енергетична модель повинна враховувати ці фактори.

Аналізом літературних джерел встановлено, що із 4-х існуючих енергетичних моделей азотування найбільш адекватно описує протікання усіх етапів субпроцесів БАТР енергетична теорія Пастуха І.М., яка розроблена в Подільському науковому фізико-технологічному центрі при Хмельницькому національному університеті. З відповідними доповненнями і уточненнями здобувач запропонував застосувати цю розробку як основу подальших досліджень.

Опубліковані результати досліджень впливу БАТР, у якому використовувався постійний струм живлення тліючого розряду, на зносостійкість закритих і відкритих пар тертя показали суттєве підвищення довговічності їх роботи в корозійно-активних, абразивних середовищах, в маслі і при терті кочення (від 3 до 10 раз).

Застосування живлення з використанням циклічно-комутованого розряду (ЦКР), запропоноване дисертантом, набагато спрощує позиціювання деталей в садці, дозволяє підвищити коефіцієнт використання робочого об'єму камери, значно розширити технологічні режими зміцнення.

У другому розділі для дослідження вибрані конструкційні сталі марок: 20 і 45 – вуглецеві якісні, 40Х – хромиста та 38Х2МЮА – хромоалюмінієва з молібденом високоякісна, які найбільш часто використовуються для азотування в тліючому розряді.

Дослідження елементного складу виконані на енергодисперсійному рентгенофлуоресцентному спектрометрі “Спрут” виробництва “Укррентген” з SDD детектором X-123 (Amptek, США). Ідентифікація марок сталі виконана шляхом визначення вмісту восьми хімічних елементів.

Азотування досліджуваних зразків проводились на установці УАТР-1, призначеній для поверхневої модифікації деталей, інструменту та оснащення методом безводневого азотування в тліючому розряді.

З метою забезпечення незалежності енергетичних параметрів режиму 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.

Аналіз отриманих зразків виконувався у три етапи: мікроскопія (мікроскоп МІМ-10); вимірювання твердості (твердометрія - ПМТ-3); рентгенофазовий аналіз – Дрон-3).

Експериментальні дослідження зразків на зносостійкість проводились на універсальній машині для випробування матеріалів на тертя моделі 2168УМТ.

Експериментальні дослідження виконані на фізичних моделях азотування глибоких отворів.

Це дає нам право констатувати про достатньо високий рівень методології та використаної апаратури для достовірності результатів роботи.

У третьому розділі проаналізована можливість азотування сталей у розряді, що живиться змінним струмом промислової частоти. Розроблено пристрій для азотування в тліючому розряді шляхом введення джерела з нестационарним живленням із змінним струмом заданої частоти. Суть модернізації полягає в заміні безперервного джерела живлення розряду на джерело з нестационарним живленням розряду зі змінним струмом заданої частоти. Регулювання частоти комутації, або як ще її називають шпаруватості – відношення періоду циклу до тривалості сигналу, та форми самого сигналу дає можливість впливати на результати обробки поверхні.

Аналіз результатів металографічних досліджень модифікованого шару вказав на наявність більш рівномірного градієнту твердості по глибині (градієнт знизився в 1,7...3,5 рази), що, в свою чергу, підвищує зносостійкість деталей та якісні показники обробки деталей.

Застосування циклічно комутованого розряду змінного живлення дає можливість азотувати деталі зі щілинами, з отворами малого діаметра без застосування при цьому спеціальної оснастки та відсутності виникнення коронних та дугових розрядів. Як недолік слід відзначити, що тривалість процесу азотування збільшується в два і більше разів, оскільки, сам процес передачі енергії відбувається тільки в період наявності сигналу.

Проаналізовано види локальних винятків поверхні (шпонкові, шліцові пази, отвори, фаски, тощо), розглянуто їх вплив на концентрацію електричного поля та її зміну, як фактора нерівномірності результатів модифікації. Введено критерій концентрації поля, вирішена аналітична задача взаємозв'язків геометрії поверхні та параметрів електричного поля. Досліджено вплив розмірів внутрішніх локальних винятків на концентрацію електричного поля. Розроблений аналітичний апарат може застосовуватись для розрахунку показників концентрації електричного поля в тліючому розряді, який використовується для визначення режимів поверхневої модифікації металевих деталей.

У четвертому розділі проведено теоретичний та експериментальний аналіз азотування довгомірних отворів. Вказано, що переважна більшість випадків азотування подібних поверхонь відповідає за своїми фундаментальними ознаками газорозрядним процесам з пустотілим катодом. Наведений аналіз вказує на принципову можливість азотування внутрішньої поверхні довгомірних отворів шляхом використання переривчастого

живлення розряду, що дозволяє реалізувати ефект накачування іонів азоту з області катодного падіння.

Експериментальна перевірка отриманих теоретичних досліджень показала, що при азотуванні в ЦКР розподіл мікротвердості більш сприятливий для підвищення зносостійкості: мікротвердість в глибину азотованого шару зменшується більш плавно порівняно з іншими режимами. Це дозволяє констатувати, що зміною технології можна забезпечити необхідну якість азотування довгомірних отворів. При цьому перспективним слід вважати застосування циклічно-комутованого розряду.

Крім того, дослідження на зносостійкість в режимі сухого тертя для усіх випробуваних сталей показали, що швидкість зношування азотованих в ЦКР зразків, розташованих на різних відстанях від торця моделі однакова і для сталі 38Х2МЮА в 1,3 – 1,6 разів менша, ніж у зразків, отриманих на інших технологіях азотування.

У п'ятому розділі вирішені питання апаратного забезпечення процесу азотування в тліючому розряді з циклічно-комутованим живленням.

Випробування азотованих зразків в умовах граничного тертя показали, що практично при будь-якому тиску настає момент, коли процес зношування практично припиняється, проте ресурсний шлях, після якого спостерігається подібна стабілізація, залежить від тиску в трибоконтакті.

Тобто процес зношування в умовах граничного тертя фактично включає два конкуруючі процеси: зміцнення поверхневого шару зі збільшенням його мікротвердості та руйнування поверхневого шару з локальним схоплюванням поверхонь.

Дослідження зносостійкості в умовах сухого тертя забезпечує суттєву інтенсифікацію експериментів. На відміну від експериментів в умовах граничного тертя сухе тертя може застосовуватись для різних сталей при однаковому значенні тиску, що виключає проблему коректності порівнянь результатів та сприяє підвищенню достовірності висновків стосовно ефективності різних технологій модифікування. За результатами аналізу попередніх експериментів таким компромісним значенням тиску може бути 16 МПа. Встановлено ефект релаксаційних перетворень поверхневих структур, що змусило рекомендувати дослідження на зносостійкість виконувати протягом однієї безперервної зміни.

Висновки дисертаційної роботи ґрунтуються на аналізі одержаних результатів. Вони наведені в кінці кожного розділу і в узагальненому вигляді в заключній частині дисертації.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна.

Висока ступінь обґрунтованості, достовірності і новизни наукових положень дисертації, висновків і рекомендацій забезпечені тим, що теоретичні дослідження виконані з використанням положень фізики низькотемпературних газорозрядних процесів у вакуумі, знайшла підтвердження в теоретичних роботах наукової спільноти та практиці. Ця енергетична модель і лягла в основу усіх подальших експериментальних і теоретичних досліджень, наведених в дисертації.

Для оцінки стану поверхні після модифікування, а також визначення характеристик стійкості триботехнічних систем з азотованими поверхнями, використані механо-хімічні моделі процесу тертя та зношування Шевелі В. В. і Олександренка В. П.

Теоретичні дослідження виконані з використанням основних фундаментальних положень трибології, фізики міцності і пластичності металів.

Використання в роботі сучасних методів та апаратури для досліджень, обробка експериментальних результатів із застосуванням комп'ютерних технологій з використанням методів математичного аналізу та математичної статистики є свідченням достовірності отриманих результатів.

Значення для науки і практики результатів дисертаційної роботи.

– 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 модифікування 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 модифікування поверхні. За результатами проведених досліджень таким компромісним тиском може бути значення в 16 МПа. Встановлений ефект релаксаційних перетворень структури 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 обойм, зубчастих втулок, вал-

шестерень, коліс зубчастих на ТОВ «МАГМА» (м. Маріуполь), показала збільшення зносостійкості від 1,35 до 1,85 раз порівняно із зміцненням струмами 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».

Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи у опублікованих наукових роботах.

За темою дисертації опубліковано 28 наукових праць, у тому числі 10 статей у фахових виданнях, 2 у виданнях, що входять до Міжнародної науково-метричної бази, 6 тез доповідей на Міжнародних науково-технічних конференціях, отримано 8 патентів України. Опубліковано 2 монографії:

1. Пастух И. М., Соколова Г. Н., Люховец В. В., Здыбель А. С. Теоретические основы процесса безводородного азотирования в тлеющем разряде. Перспективные тренды развития науки: техника и технологии : коллективная монография. Одесса: Куприенко СВ, 2016. С. 123–135.

2. 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.

Тобто, усі вимоги положень ДАК МОН України щодо наукових публікацій витримано.

Зауваження по дисертаційній роботі, автореферату та їх оформленню.

Пункт наукової новизни: – 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.

Методологія не може бути наслідком зміни співвідношення

- структурних складових фазового складу поверхневого модифікованого шару.
2. У роботі значна увага приділена розробці систем керування процесами безводневого азотування в тліючому розряді. Доцільно було б навести більше підтверджень ефективності їх застосування у вигляді світлин модифікованих мікроструктур.
 3. В підрозділі 1.1 поставлена задача оцінки впливу і характеру зміни основних електричних величин (струму та напруги розрядної камери) процесу азотування металевих деталей при використанні циклічно-комутованого розряду. Де і як вона розкрита?
 4. Аналіз результатів металографічних досліджень модифікованого шару в ЦКР вказує на наявність більш рівномірного градієнту твердості по глибині (градієнт знизився в 1,7-3,5 разів), що, в свою чергу, підвищує зносостійкість деталей (с.68). На скільки підвищується зносостійкість і за яких умов?
 5. Висновки до розділу 2 носять констатувальний характер (вирішено, вибрано, сконструйовано тощо).
 6. Не зрозуміло, що означають фрази: «електрони з малим перетином сутичок», «сутичковий характер руху» с. 92, «можливість комутації форми імпульсів».
 7. Яка суть ефекту «накачування іонів азоту в отвір»?
 8. Як визначалася періодичність фіксації результатів випробування на зносостійкість (табл. 2.3, с.72)?
 9. Як використовується знайдений в роботі коефіцієнт концентрації поля на внутрішніх локальних винятках?
 10. Як в подальшому використовуються теоретичні викладки, наведені в п.п. 4.3?
 11. На рис.4.7 приведені результати дослідження зносостійкості внутрішніх поверхонь отворів із сталі 38Х2МЮА залежно від висоти їх розміщення по довжині труби при азотуванні в ЦКР (дис., с. 117), а підпис до рис. 4.7 – Зносостійкість зразків із сталі 38Х2МЮА залежно від висоти їх розміщення від торця труби при азотуванні в ЦКР (режим 1 в табл. 4.2)?
 12. Не зрозумілий підпис під рисунком 5.5, що вимагає пояснень.
 13. В роботі необгрунтовано використані іншомовні слова та діалекти (примінена, в меншій мірі, довжина вісі, взірці (зразки) тощо).

Загальний висновок

Дисертаційна робота **«ЗНОСОСТІЙКІСТЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ПРИ АЗОТУВАННІ В ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ**

РОЗРЯДІ», є закінченою науково-дослідною роботою, що містить вирішення важливої науково-прикладної задачі, яка має важливе народногосподарське значення, розвиває відомі теоретичні положення енергетичної теорії БАТР І. М. Пастуха, дозволяє визначати режими азотування в циклічно-комутованому розряді для деталей, які мають довгомірні функціональні отвори, що ефективно забезпечує підвищення зносостійкості їх робочих поверхонь.

Дисертаційна робота у цілому виконана на достатньому науковому рівні, її теоретичні і практичні результати є актуальними, науково обґрунтованими та достовірними. Оформлення, стиль і мова викладення роботи відповідають вимогам ДАК України. Автореферат відповідає змісту дисертації.

У цілому робота відповідає вимогам, що висуваються до кандидатських дисертацій згідно з пп. 9,10,12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор, Люховець Володимир Васильович, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.04 – тертя та зношування в машинах.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри галузевого машинобудування

Вінницького національного технічного університету



Савуляк В.І.

Ваша секретарка ВШТУ
К.Т.Н, доцент



Віштакі.В.