

**ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерії транспорту та архітектури**  
**Кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**На тему:** Зміцнення вуглецевих сталей азотуванням в циклічно-комутованому розряді

**Освітній ступінь:** *Магістр*

**Галузь знань:** *G Інженерія, виробництво та будівництво*

**Спеціальність:** *G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)*

**Предметна спеціальність/спеціалізація:** *Технологічні машини та обладнання*

**Освітня програма:** *Технологічні машини та обладнання харчових виробництв*

**Шифр:** *25.03.00.00.000 ПЗ*

Виконав здобувач 2-го курсу гр. МАХВм-24-1 \_\_\_\_\_ Василь ВАСИЛЬКІВ  
Підпис

Керівник: д.т.н., професор \_\_\_\_\_ Мирослав СТЕЧИШИН  
Підпис

**До захисту допускаю:**

Завідувач кафедри галузевого  
машинобудування та агроінженерії \_\_\_\_\_ Андрій МАРТИНЮК  
Підпис

\_\_\_\_\_  
Дата

Хмельницький, 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії транспорту та архітектури  
Кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії

### КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

На тему: Зміцнення вуглецевих сталей азотуванням в циклічно-комутованому розряді

Освітній ступінь: Магістр

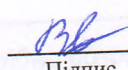
Галузь знань: G Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальність: G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)

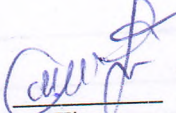
Предметна спеціальність/спеціалізація: Технологічні машини та обладнання

Освітня програма: Технологічні машини та обладнання харчових виробництв

Шифр: 25.03.00.00.000 ПЗ

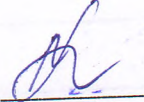
Виконав здобувач 2-го курсу гр. МАХВм-24-1  Василь ВАСИЛЬКІВ  
Підпис

Керівник: д.т.н., професор

 Мирослав СТЕЧИШИН  
Підпис

До захисту допускаю:

Завідувач кафедри галузевого машинобудування та агроінженерії

 Андрій МАРТИНЮК  
Підпис

Дата

Хмельницький, 2025

# Хмельницький національний університет

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Шифр і найменування

Спеціальність 133 Машинобудування (за спеціалізаціями)

Код і найменування

Предметна

спеціальність /спеціалізація \_\_\_\_\_

Код і найменування

Освітня програма Машини і апарати харчових виробництв

Найменування

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_2025

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Васильків Василь Васильович

Прізвище, ім'я, по батькові здобувача

1 Тема роботи Зміцнення вуглецевих сталей азотуванням в циклічно-комутованому розряді

Керівник роботи Стечишин Мирослав Степанович, докт.техн.наук, проф.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від \_\_\_\_\_ 2025 р. № \_\_\_\_\_

2 Термін подання здобувачем роботи на кафедру \_\_\_\_\_

3 Вихідні дані до роботи) \_\_\_\_\_

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв



## ЗМІСТ

	Арк.
ЗАВДАННЯ	2
АНОТАЦІЯ	4
ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ АЗОТУВАННЯ В ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ	7
1.1 Теоретичні та експериментальні дослідження процесу азотування в тліючому розряді	8
2 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЖИМУ АЗОТУВАННЯ В ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ	12
2.1 Початкові положення	12
2.2 Апаратна реалізація режиму азотування в циклічно-комутованому тліючому розряді	19
3 ДОСЛІДЖЕННЯ СФОРМОВАНИХ ТРИБОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ	26
3.1 Загальні положення методик випробувань триботехнічних систем	26
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПРИ ГРАНИЧНОМУ ТЕРТІ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ, АЗОТОВАНИХ В ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ РОЗРЯДІ	35
5 ВИСНОВКИ	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	49
ДОДАТКИ	52

## АНОТАЦІЯ

У роботі представлено результати дослідження процесу зміцнення вуглецевих сталей шляхом азотування в циклічно-комутаційному розряді, що поєднує переваги низькотемпературної обробки та інтенсифікованих дифузійних процесів. Розглянуто особливості формування азотованих шарів за умов періодичної зміни енергетичних параметрів плазми, а саме впливу частоти комутації та тривалості імпульсів на кінетику насичення азотом, глибину дифузійного шару та його фазовий склад. Показано, що застосування циклічно-комутаційного режиму сприяє зменшенню перегріву деталі, підвищенню стабільності розряду, утворенню дрібнодисперсної структури сполучних фаз і суттєвому збільшенню твердості, втомної міцності та зносостійкості поверхневих шарів. Отримані результати мають практичне значення для підвищення ресурсу деталей машин, інструменту та компонентів, що працюють в умовах інтенсивного тертя, ударних навантажень та абразивного зношування.

Роботу викладено на 60 сторінках тексту включаючи додатки, 11 рисунків, 6 таблиць. Список використаної літератури становить 36 джерел

## ВСТУП

Серед численних типів технологій азотування в тліючому розряді особливу увагу заслуговують ті, що можуть бути універсально застосовувані. Їхня універсальність підтверджується здатністю використовуватись для обробки деталей механізмів з парами тертя, оснащення інструментів для роботи з різними матеріалами (метали, деревина, мінерали тощо), а також для штампів, прес-форм і літформ, що застосовуються у виготовленні виробів із пластмас та легких сплавів. Окрім збільшення зносостійкості, міцності поверхні та її стійкості до високих температур, технологія також забезпечує підвищення корозійної стійкості та інші позитивні ефекти. На сьогодні найбільш поширеною є технологія азотування в аміачних газах, що бере початок від традиційного пічного методу. Однак її недоліком є водневе окрихчення матеріалу, попри досягнення хороших показників твердості. Крім того, дана технологія спричиняє екологічні проблеми, які стають усе менш прийнятними. Це обґрунтовує перспективність безводневого азотування в тліючому розряді, що є екологічно чистим і покращує пластичність поверхневого шару. Теоретичні моделі азотування, представлені в багатьох дослідженнях, переважно приділяють увагу дифузійним процесам у модифікованому шарі поверхні. Водночас вони не пояснюють низки явищ, які супроводжують азотування у тліючому розряді. Тому розробка теоретичних основ технології, що базується на фізичних аспектах газорозрядних процесів, видається актуальною. Наполегливе вивчення механізмів взаємодії частинок газу і поверхні дозволяє не лише поглибити розуміння процесів, але й розкрити нові можливості технології. Ці дослідження мають проводитись на нанорівні, оскільки стандартні термодинамічні підходи часто не дають повної картини і не відкривають нових перспектив модифікації поверхневого шару металів та їхніх сплавів. Також важливо приділити увагу аспектам практичної реалізації таких технологій, враховуючи розробку обладнання і створення організаційно-економічних умов для впровадження процесу. Одним із напрямків розвитку цієї галузі стало використання переривчастого живлення. Воно має всі переваги традиційного азотування в тліючому розряді, одночасно забезпечуючи значне спрощення технологічного процесу за рахунок усунення переходу дугового розряду до тліючого. Це передбачає застосування менш складних методів позиціювання деталей у садці: їх можна встановлювати на будь-яких

поверхнях або підвищувати навіть на простих пристроях. Відсутність локального перегрівання в точках контакту значно зменшує ризики, які притаманні безперервному живленню струмом, хоча тривалість модифікаційної фази при цьому дещо зростає. В теоретичному аспекті переривчасте азотування залишається недостатньо вивченим. Відсутні базові дані для створення оптимальних технологічних режимів та прогнозування триботехнічних характеристик оброблених систем. З огляду на важливість покращення зносостійкості як ключової мети поверхневої модифікації, проблема оцінки стану поверхні після обробки та визначення триботехнічних характеристик є особливо актуальною. Саме ці питання разом із технічними аспектами реалізації процесу стали предметом дослідження у рамках даної роботи.

## **1. АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ АЗОТУВАННЯ В ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ**

Класичні вимоги до деталей машин, інструментів, оснащення та інших виробів із металевих сплавів зводяться до двох ключових критеріїв: економічність і працездатність. Саме це пояснює той факт, що, попри наявність понад сотні технологій модифікації металевих виробів, жодна з них не змогла зайняти чітко домінуючу позицію. Кожна технологія має свої специфічні ніші у виробничих процесах, зокрема й азотування в тліючому розряді (АТР), яке належить до категорії вакуумно-дифузійних газорозрядних методів. Зазначається, що промислове впровадження АТР бере свій початок із патентування основ процесу Бернхардом Бергаусом (Bernhard Bergaus). Однак перший прототип використання електричного розряду для модифікації поверхонь зафіксовано ще у 1909 році. Головним у цьому контексті стала саме роль розряду як прискорювача процесу. Було представлено герметичну камеру та метод обробки у вакуумованій атмосфері з використанням дугового розряду. Пізніше було запропоновано метод азотування у середовищі аміаку із задіянням електричного розряду. Сутність цього підходу полягала в

отриманні атомарного азоту шляхом пропускання аміаку через електричний розряд, що значно пришвидшувало процес модифікації. У подальших дослідженнях нагрівання поверхні та іонізація здійснювались за допомогою різних типів розрядів: іскрового, дугового, коронного. В одному з методів аміак пропускався через тліючий розряд, де розкладався на компоненти, включно з атомарним азотом, що забезпечувало ефективне азотування поверхні. Обробка виконувалася в два етапи, причому хоча б на одному з них застосовувалося іонізоване газове середовище. Класична форма АТР, з передньою обробкою поверхні катодним бомбардуванням, з'явилася в наступних дослідженнях і була детально описана в окремих працях. Також було запатентовано методику та обладнання для обробки деталей зброї, де живлення розряду здійснювалося не лише постійним струмом, але й імпульсним з варійованою частотою та тривалістю. Саме цей процес отримав назву азотування в тліючому розряді.

### **1.1. Теоретичні та експериментальні дослідження процесу азотування в тліючому розряді**

Дослідження школи Б. Н. Арзамасова в області азотування металевих сплавів зосереджені на аналізі процесів, що відбуваються в прикатодному просторі, і ролі газового середовища у формуванні дифузійного шару. Надана інформація про склад потоку часток за катодом та підкреслено, що значну роль у покращенні азотування відіграє наявність атомарних іонів азоту. Також досліджено моделі взаємодії іонізованого газу з поверхнею металу. Як результат, було зроблено висновок, що модель Й. Кельбеля має фізичні недоліки, і азотування можливе лише за умови прикладення негативного потенціалу до оброблюваного виробу. Визначено первинну стадію процесу – накопичення азоту у поверхневому шарі з подальшим формуванням нітридів. Запропонована термодинамічна модель описує залежність ефективності азотування від тиску та підкреслює мінімальну питому потужність розряду для досягнення найбільш ефективних результатів, вводячи поняття густини

енергії плазми, що оцінюється як фізично складне для трактування явище. Було встановлено, що товщина модифікованого шару збільшується зі зростанням температури. Однак для низьколегованих сталей є критична температура, при якій ця товщина та поверхнева твердість досягають максимальних значень. Збільшення легуючих елементів, особливо азотоактивних, сприяє підвищенню поверхневої твердості, але водночас зменшує товщину дифузійного шару через те, що утворені нітриди суттєво перешкоджають подальшій дифузії азоту. Експерименти показали, що швидкість насичення поверхні в умовах тліючого розряду залежить від потужності розряду та високого градієнту концентрації дифузанта. Оптимальні значення тиску в розрядній камері були визначені на основі багаторічних досліджень, і саме за цих параметрів досягається мінімальна питома потужність розряду. Електричні параметри процесу змінюються залежно від масивності деталі та тиску, утворюючи певний взаємозв'язок між напругою та струмом. Рентгеноструктурний аналіз підтвердив ефект екранування нітридами дифузійної зони. Зростання тиску в камері збільшує товщину зовнішньої нітридної зони, але разом із тим посилюється її блокуючий вплив, що обмежує ширину зони внутрішнього азотування. Підвищення температури процесу одночасно прискорює дифузію азоту вглиб металу та може призвести до відпуску основного матеріалу. Крім того, витримка при високій температурі без доступу азоту здатна спричинити розчинення нітридного шару на користь розвитку зони внутрішнього азотування. Фіксовано, що енергія часток у падаючому потоці може бути значно вищою за енергію часток у звичайному пічному азотуванні, часто перевершуючи навіть енергію розпорошення. Це стало основою для підтвердження існування відповідних процесів під час модифікації поверхні. Вперше було запропоновано застосовувати параметр мінімуму питомої потужності розряду для управління процесом. У той же час було переглянуто і не підтверджено термодинамічні моделі Межонова А. Є. та Кольцова В. Є.

Перша модель процесу створення та трансформації нітридів, розроблена

в 1965 році, базувалася на послідовності цих перетворень. Особливе значення у формуванні дифузійного шару надавалося катодному розпорошенню. Допускалася можливість азотування поверхні як за негативного, так і за позитивного потенціалу на деталі, що згодом було підтверджено, однак таку концепцію категорично заперечувала школа МВТУ. Виявлено явище зменшення концентрації вуглецю у поверхневих шарах металу через ефект бомбардування падаючого потоку, який викликає зрушення карбонітридної решітки всередину матеріалу, покращуючи пластичність структури. Запропонована модель утворення та трансформації нітридів стала класичним підходом. Однак гіпотезу Кельбеля про провідну роль розпорошення поверхні було поставлено під сумнів, надавши перевагу азотним іонам, де водневі іони виконували роль каталізаторів для взаємодії з азотом та утворення радикалів. Водночас катодне розпорошення розглядалося передусім як механізм очищення поверхні від забруднень. У ініційованій класифікації процесів азотування, яка базується на технологічних принципах, було встановлено залежність впливу тиску в розрядній камері на перебіг процесу активованого термомасопереносу (АТР). Додатково з'ясовано, що присутність кисню суттєво зменшує кількість атомарних азотних іонів. Дослідження обробки в тліючому розряді (азотування, цементация, силіціювання) вказують на важливість питомої потужності розряду як одного з ключових керуючих параметрів. Відомо, що швидкість дифузії пропорційна потужності розряду, але складові останньої – струм та напруга – враховуються недостатньо. Було відзначено, що тиск для оптимального насичення у дослідних та промислових установках відрізняється, підкреслюючи розрив між теоретичними моделями та їх практичною реалізацією. Численні параметри впливу на процес були надалі досліджені: імпульсно-локальні силові та термічні ефекти, природа залишкових напружень, фактори модифікації структури й експлуатаційних властивостей на основі нових уявлень про механізми нітридоутворення. Загалом азотування визначається хімічним потенціалом середовища, кінетикою масопереносу, а також складом і структурою оброблюваної

поверхні. Контроль термодинамічних параметрів та активація поверхні дозволяють керувати якістю азотованого шару та отримувати визначені властивості, що вимагає постійного моніторингу цих процесів. Фізичні та технологічні аспекти обробки металів із застосуванням плазми, включно з безводним газовим середовищем, досліджувались додатково. Окрема увага була приділена механізму АТР у сумішах азоту з аргоном і азоту з воднем. Було встановлено, що головними переносниками азоту до поверхні є молекулярні й атомарні іони; втім, їх кількість істотно скорочується при наявності водню. Процес насичення здебільшого забезпечується дисоціацією молекул азоту під час зіткнення з поверхнею. Також підтверджено вирішальну роль атомарних азотних іонів у процесах насичення. Залежність здатності газового середовища насичувати поверхню від тиску в розрядній камері має екстремальний характер. Пропонована термодинамічна модель використовує безрозмірний критерій насичуючої здатності.

## **2. РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЖИМУ АЗОТУВАННЯ В ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ**

### **2.1 Початкові положення**

Систематизація процесів модифікації поверхні, заснованих на використанні тліючого розряду, відносить їх до категорії вакуумно-дифузійних газорозрядних методів [37, 38]. Значна частина теоретичних досліджень цих процесів зосереджена на варіанті з безперервним живленням розрядної камери. Проте існують й альтернативні схеми живлення, які забезпечують певні технологічні переваги. Розглядаючи процес азотування у тліючому розряді з точки зору безперервності живлення, можна звернутися до схеми, представленої на рисунку 2.1. Основна характеристика цієї схеми полягає у наступному. Зазвичай установки для азотування в тліючому розряді будуються за принципом прямої полярності, коли оброблювана деталь

виступає катодом. У теорії довгий час домінувала концепція, що проведення азотування з використанням зворотної полярності, коли деталь під'єднана до позитивного полюса джерела живлення, неможливе. Однак із кінця 1980-х років почали проводитись численні дослідження, включаючи експериментальні, які підтвердили можливість здійснення азотування і за зворотної полярності. Для цього лише необхідно забезпечити нагрівання деталей до робочої температури іншим методом, а не за рахунок традиційного катодного бомбардування. Цей підхід особливо ефективний у випадках використання дугового розряду, де густина струму значно перевищує показники тліючого розряду. Метод азотування при зворотній полярності заслуговує на подальшу увагу та теоретичну проробку, оскільки має потенціал стати ефективною альтернативою. Однією з його переваг є створення умов для низькоенергетичного спектру частинок у зоні утворення нітридів. Такі умови можуть сприяти активному формуванню нітридів при зменшенні інтенсивності їх руйнування внаслідок розпорошення.

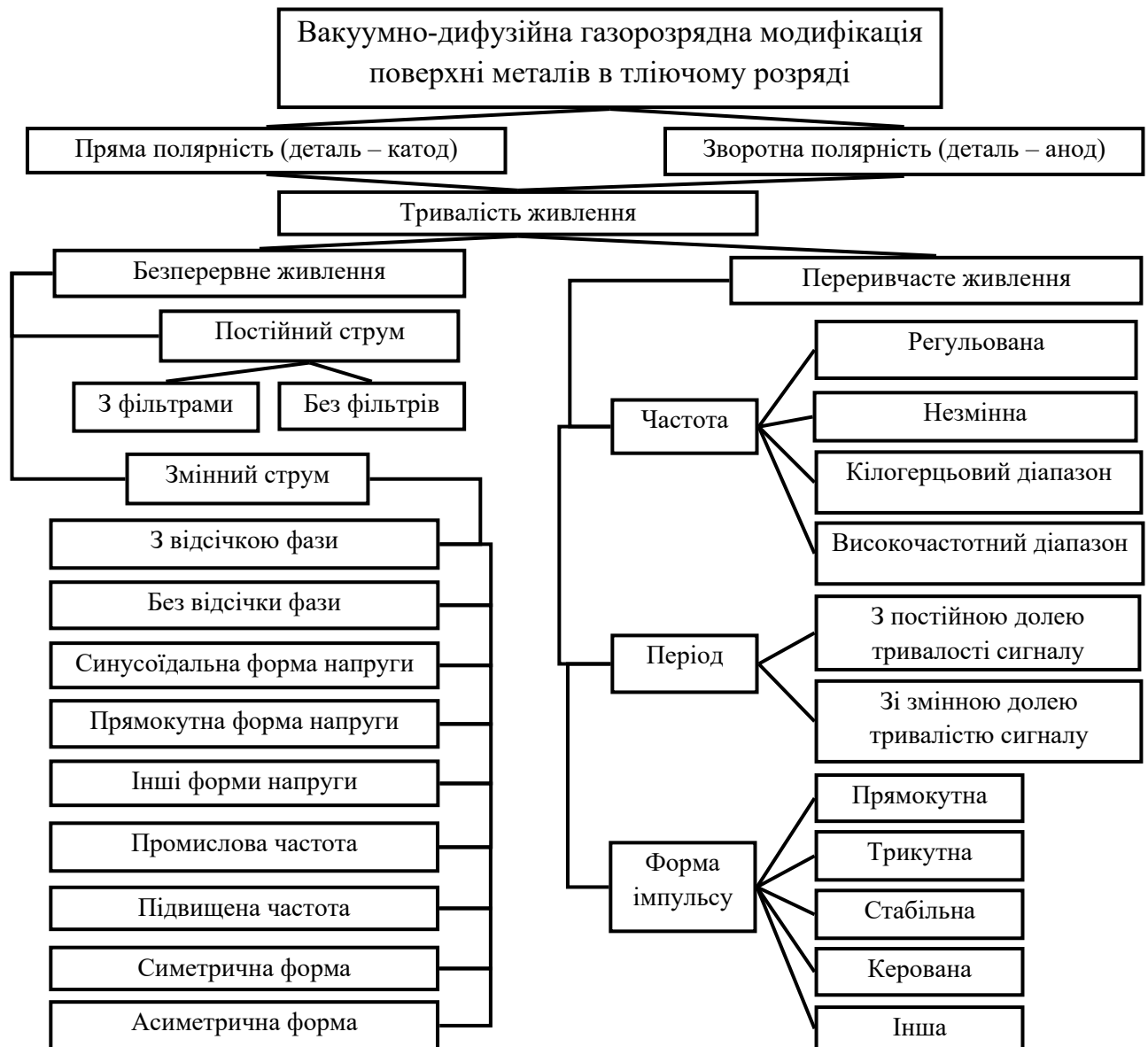


Рисунок 2.1. Класифікація процесів азотування в тліючому розряді за критерієм характеристик джерела живлення

Спочатку впроваджувалися технології з безперервним живленням, які є принципово простішими та забезпечують більшу кількість переданої енергії падаючому потоку, а також оброблюваним деталям. Такий підхід дозволяє досягти вищої інтенсивності модифікації та скоротити її тривалість. Для забезпечення стабільності розряду застосовують фільтри пульсацій, але це ускладнює конструкцію блоків живлення, підвищує їхню вартість і збільшує споживання електроенергії. У блоках живлення на основі змінного струму можливе часткове або повне відсічення однієї з фаз, здебільшого позитивної

(у разі прямої полярності). Без такого відсічення анод зазвичай перегрівается, а інтенсивність азотування знижується. Однак, це може створювати умови для м'якшої модифікації шару, що позитивно впливає на його пластичність. Щоб зменшити негативний вплив позитивної фази, застосовують асиметричну форму напруги, зміщаючи її середнє значення в область негативних значень. Форма напруги може бути синусоїдальною, прямокутною або довільною, навіть програмованою для її зміни. Прямокутна форма напруги забезпечує вищу енергонасиченість падаючого потоку при незмінних параметрах, що з одного боку створює жорсткіший режим обробки, але скорочує її тривалість. Найпростішим варіантом є використання трансформованої напруги промислової частоти, що дозволяє уникнути додаткових випрямлячів. Живлення високочастотним струмом за своєю суттю нагадує азотування з переривчастим живленням—з виключенням впливу позитивної фази. Безперервне живлення при азотуванні має низку суттєвих недоліків. Один з них полягає у підвищеній складності формування садки через локальне дугове горіння розряду в місцях із щілинами понад 0,5 мм. Це призводить до локального перегріву деталей або навіть до повної неможливості ведення процесу, оскільки виникнення дуги при спробі підвищити напругу у таких місцях стає неминучим. В результаті конструкція підвісів або столів повинна забезпечувати максимально щільне прилягання деталей, хоча навіть це не усуває проблеми, пов'язані з наявністю фасок, які створюють клиноподібні щілини разом з поверхнею столу. Ще одним недоліком є низька ефективність азотування отворів малого діаметра зі значною довжиною. Згідно теорії розряду з порожнистим катодом, напруженість поля всередині таких отворів практично зникає на глибині понад два діаметри отвору. Досягти задовільного результату можна лише шляхом істотного збільшення тривалості обробки, що фактично нівелює всі переваги азотування в тліючому розряді та робить процес аналогічним звичайному пічному газовому азотуванню. Останніми роками набули широкого застосування технології азотування в тліючому розряді з переривчастим живленням – так званий циклічно-комутований

розряд (ЦКР). Основний принцип ЦКР полягає у встановленні тривалості сигналу в циклі меншою за час переходу тліючого розряду в дуговий, а паузи – достатньої для гасіння дугового розряду у випадку його виникнення. Це дозволяє відмовитися від складних пристроїв автоматичного відсікання дуги або істотно спростити їхню конструкцію. Формування садки за таких умов не заслуговує на більше уваги ніж у випадку звичайного пічного карбоазотування.

Циклічно-комутоване живлення (ЦКР) характеризується рядом параметрів, зокрема частотою або періодом і формою імпульсу. Важливим аспектом є можливість регулювання частоти комутації, яка разом зі зміною шпаруватості — відношенням періоду циклу до тривалості сигналу — суттєво впливає на результати обробки. Використання високочастотного поля дає змогу застосовувати стандартні генератори живлення за умови обмеження позитивної фази, втім, це створює труднощі з екранізацією компонентів установки для уникнення радіоперешкод. Якщо джерело живлення дозволяє регулювати шпаруватість, то можна реалізувати обидва режими — безперервний та переривчастий — в межах однієї системи. Така універсальність максимально розкриває потенціал технологічного процесу. За умов ускладненого профілю деталей (локальні заглиблення, отвори тощо) перевага надається ЦКР із подовженням терміну азотування. У випадках, коли конструкція деталей спрощена, доцільніше використовувати безперервний режим живлення, що забезпечує більшу продуктивність. Також ця гнучкість актуальна за необхідності застосування менш жорстких технологічних режимів. Щодо форми імпульсу, варто звернути увагу на дослідження енергетичного спектру падаючого потоку за умов змінної напруги під час її зростання та спаду. Особливу роль тут відіграють характеристики фронтів напруги. З теоретичної точки зору, процес азотування в циклічно-комутованому тліючому розряді (АЦКТР) аналізують через енергетичну модель. Основними доповненнями до існуючих досліджень є кілька ключових моментів: 1) Значення процесів у локальних особливостях поверхні, що

потребує аналізу проявів цих структур при різних варіантах живлення. 2) У прикатодній зоні кінетика руху часток під час пауз буде визначатися інерційним переміщенням уздовж траєкторії, що сформувалася до моменту зняття напруги. 3) Зміни в кінетичних закономірностях спричинять зміну ймовірності досягнення катоду частками падаючого потоку, а також їх кутових характеристик взаємодії з поверхнею. Це, у свою чергу, впливатиме на умови передачі енергії від потоку до поверхневих атомів. 4) Зняття напруженості поля зупиняє накопичення кінетичної енергії частками, що змінює енергетичний розподіл потоку. 5) Усі зазначені зміни впливають на енергетичний спектр падаючого потоку, який залежатиме не лише від стандартних параметрів технологічного режиму, а й від характеристик ЦКР. 6) Оскільки енергетична модель ґрунтується на спектральних характеристиках, їх зміни вимагають подальшого дослідження для точнішого прогнозування процесу. 7) Формування структури модифікованих шарів та механізми фазоутворення в умовах АЦКТР також потрібно вивчати окремо. 8) Аналіз триботехнічних властивостей модифікованих шарів допоможе оцінити їхню зносостійкість і загальні трибологічні характеристики, що дасть змогу оптимізувати керування технологією залежно від експлуатаційних вимог. 9) Необхідно розробити модель розподілу концентрації дифузантив у глибоких вузьких отворах за умов ЦКР для врахування специфіки азотування таких геометрій. 10) Розгляд енергетичного балансу установок із ЦКР у порівнянні із системами безперервного живлення сприятиме зменшенню енерговитрат процес.

11) при застосуванні ЦКР створюються умови для управління інтенсивністю формування фаз, в тому числі зміною жорсткості технологічного режиму, тому окремо значний практичний інтерес становить питання азотування в ЦКР азотоактивних металів;

12) окремо слід дослідити можливий вплив на процес АЦКТР форми зміни напруги, в тому числі – певні відхилення цієї форми від ідеальної.

Відмічені вище аспекти становлять основу нової науково-технічної

задачі – азотування металів в циклічно комутованому розряді. Практичне впровадження результатів дослідження насамперед направлене на використання позитивних властивостей процесів азотування з переривчастим живленням розряду.

## **2.2 Апаратна реалізація режиму азотування в циклічно-комутованому тліючому розряді**

Згідно з інформацією, що наведена у представлених джерелах, впровадження режиму циклічної комутації під час процесу азотування у тліючому розряді відкриває нові можливості для підвищення ефективності та якості цієї технології. Зокрема, це виражається у наступному: - забезпечується можливість азотування деталей складної геометричної форми, таких як деталі з глибокими та вузькими пазами, отворами малого діаметра або значної глибини; - зменшується ризик локальних пошкоджень модифікованої поверхні завдяки зниженню імовірності виникнення дугових розрядів; - розширюються межі регулювання важливих параметрів оптимізації технологічного процесу, таких як тиск у камері розряду та температура поверхні оброблюваних деталей; - у випадку автономної системи нагріву деталей значно спрощується контроль над уникненням перегрівання через виділення додаткової енергії розряду. Створення експериментального макету для реалізації циклічної комутації газового розряду базувалося на таких принципах: - максимальна інтеграція з наявним електротехнічним і електронним обладнанням; - використання доступних елементів для системи; - можливість широкого регулювання параметрів комутації для оптимізації режимів і подальшого їх аналізу; - забезпечення надійного захисту обладнання від перевантажень і аварійних ситуацій.

Основою для визначення параметрів комутації є вимоги до джерела імпульсного струму, серед яких: - форма імпульсу має бути прямокутною для забезпечення чіткого переходу струму від нульового рівня до бажаної області аномального тліючого розряду; - тривалість імпульсу повинна бути меншою

за час, необхідний для утворення дуги (менше ніж 100 мкс), що дозволяє уникнути розвитку дуги; при цьому допускається переривання струму в будь-який момент імпульсу; - пауза після кожного імпульсу має бути досить короткою для забезпечення легкого повторного запалювання розряду під час наступного імпульсу, тобто складати менше декількох мілісекунд; - співвідношення тривалості імпульсу до паузи має мати великий діапазон для ефективного регулювання теплового впливу на деталі. Рекомендовані тривалості імпульсів, як зазначено в джерелах, складають від 20 до 100 мкс, а тривалість пауз може варіюватися від 20 до 200 мкс. Однак варто зазначити, що процеси запалювання й гасіння розряду супроводжуються суттєвою інерційністю. Це особливість, яка накладає певні обмеження на вибір часових параметрів комутації. Інерційність цих процесів також може змінюватися залежно від геометрії та величини робочого простору розрядної камери, що в експлуатаційних умовах може значно відрізнятись. Це дає підстави обережно ставитися до прямого впровадження рекомендацій згадуваних джерел, зокрема тих, які ґрунтуються на експериментах із використанням камери діаметром 400 мм і висотою 600 мм. Те саме стосується результатів досліджень у контексті лабораторних мініатюрних газорозрядних пристроїв.

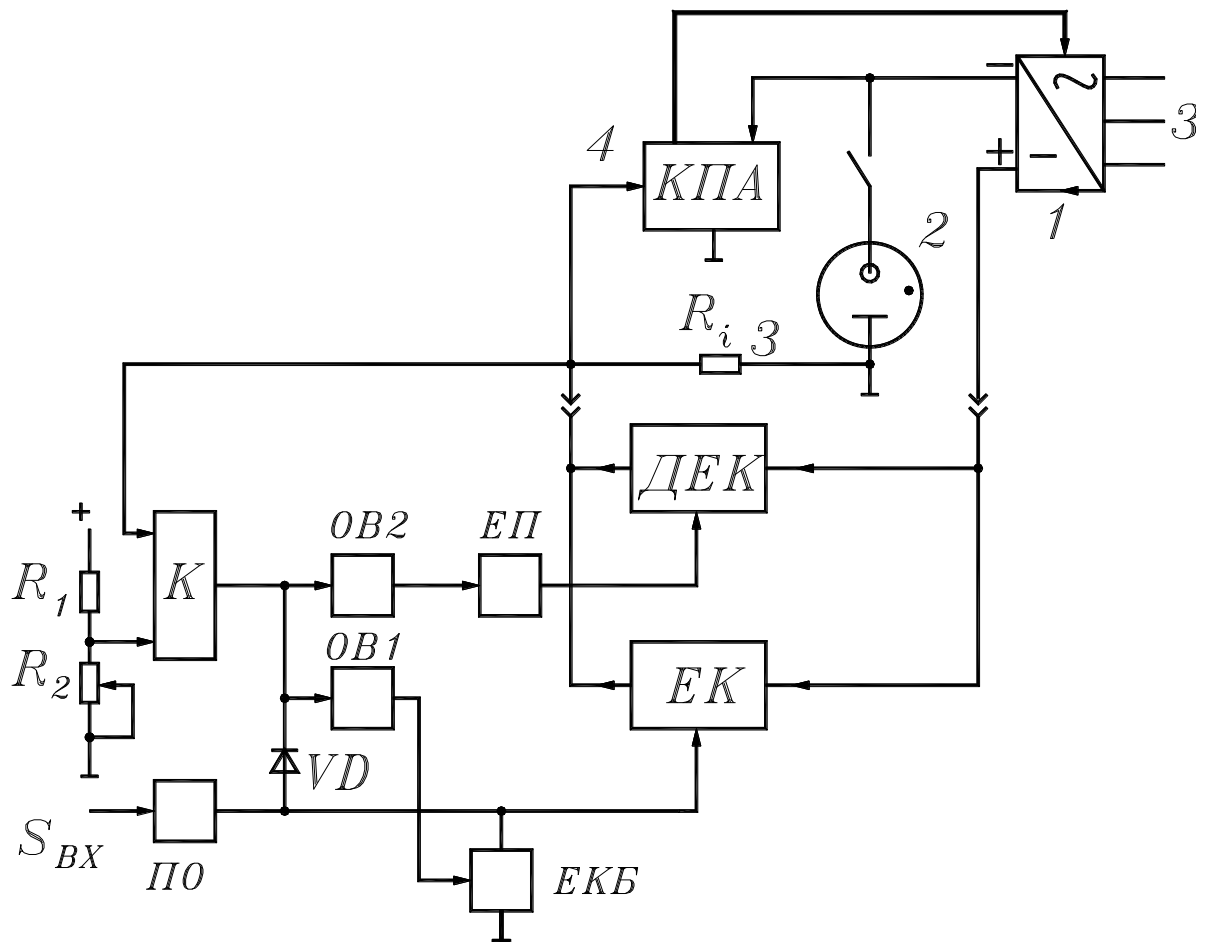
$$\eta = t_n / T = 0 \dots 1,$$

де  $T$  – період слідування імпульсів,  $T = 1/f$ ,

$t_n$  – тривалість імпульсу (тривалість активної частини періоду).

З метою зменшення витрат часу та коштів було прийнято рішення використовувати в якості базового елемента блок живлення наявних установок для азотування в тліючому розряді, включаючи відповідні пристрої керування (контролер процесу азотування – КПА), а також датчики струму і напруги розряду. Для реалізації імпульсного режиму роботи установки блок живлення було доповнено Т-подібним RC-фільтром для згладжування, а

також спеціально розробленим контролером переривчастого режиму (КПР), що включає силовий електронний ключ ЕК із системою керування та захисту. Як основний компонент силового ключа було обрано потужний транзистор структури MOSFET, який має низку переваг у порівнянні з біполярними транзисторами. Основні переваги цього компонента: - низьке енергоспоживання в ланцюгах управління; - чудові параметри при паралельному використанні, що дає змогу відносно легко нарощувати потужність ключа в межах допустимих значень. Однак, як і у випадку з біполярними транзисторами, постає важливе питання забезпечення захисту від перевантажень за струмом, які негативно впливають на загальну надійність ключа. На рисунку 2.2 подано функціональну схему контролера переривчастого режиму. Для зручності там також зображено кілька ключових елементів установки, що пояснюють принцип її роботи: трифазний випрямляч (включає Т-подібний RC-фільтр) – поз. 1, газорозрядна камера – поз. 2, датчик струму  $R_i$  – поз. 3 та контролер процесу азотування – поз. 4.



1 – трифазний випрямляч; 2 – розрядна камера; 3 - датчик струму; 4 – контролер процесу азотування;  $R_i$  – датчик струму;  $R_1$ ,  $R_2$  – задатчики порогу;  $K$  – компаратор;  $S_{ВХ}$  – вхідний керуючий сигнал; ПО – підсилювач-обмежувач; ОВ1, ОВ2 – одновібратори; ЕК – електронний ключ; ДЕК – допоміжний електронний ключ; ЕП – емітерний повторювач; ЕКБ – електронний ключ блокування; VD – діод блокування

Рисунок 2.2 - Функціональна схема контролера переривчастого режиму

Як електронний ключ у пристрої використовуються два транзистори, з'єднані паралельно, які мають граничні параметри напруги та струму на рівні 900 В і 8 А відповідно. Перед описом принципу роботи системи захисту електронного ключа від перевантаження слід зазначити кілька важливих

моментів. По-перше, захист повинен реагувати на будь-яке перевищення розрядного струму понад визначений безпечний рівень. По-друге, після зникнення причини перевантаження (наприклад, випадкове короткочасне підвищення напруги живлення), система захисту має повернутися у вихідний стан, щоб камера продовжила функціонувати в звичному імпульсному режимі. По-третє, особливо критичною є робота захисту під час початкового запуску установки та запалювання розряду, коли положення робочої точки на вольт-амперній характеристиці розряду важко контролювати, що підвищує ймовірність перевантаження. З урахуванням цих вимог систему захисту рекомендовано реалізувати таким чином: 1. При перевантаженні за струмом пристрій переходить з імпульсного режиму в безперервний за допомогою додаткового електронного ключа (ДЕК), стійкого до перевантажень. 2. У безперервному режимі блок регулювання струму (КІР) контролює його рівень, а блок процесу азотування (КПА) здійснює відсічку дуг. 3. Після усунення перевантаження система автоматично повертається до роботи в імпульсному режимі, закриваючи ДЕК та відновлюючи комутацію основного ключа (ЕК). Формування керуючих імпульсів для періодичного відкривання ключа ЕК відбувається за допомогою підсилювача-обмежувача (ПО), який генерує сигнали з вхідного гармонійного або імпульсного сигналу SBX. У штатному режимі роботи ключ ЕК виконує циклічну комутацію струму від джерела живлення через камеру, забезпечуючи періодичне чергування фаз аномального тліючого розряду та пауз розрядження. Миттєві значення струму розряду постійно контролюються через сигнал із датчика струму  $R_i$ , який порівнюється в компараторі К із пороговою напругою, заданою дільником напруги (резистори  $R_1$  та  $R_2$ ). Якщо струм розряду перевищує критичне значення, компаратор перемикається зі стану «лог.1» на «лог.0». Це запускає два одинвібратори (ОВ1 та ОВ2): вихідний сигнал ОВ1 блокує керуючі імпульси для ЕК через відкриття ключа ЕКБ, тоді як сигнал ОВ2, посилений емітерним повторювачем (ЕП), відкриває допоміжний ключ ДЕК. Перехід камери у безперервний режим забезпечує захист як від перевантаження за

струмом, так і від перенапруги, яка є критичною для транзисторів ЕК у закритому стані. Цикл захисту триває, поки на виході компаратора підтримується сигнал «лог.1», що свідчить про наявність перевантаження. У цей час керуючі імпульси для основного ключа залишаються заблокованими завдяки відкритому діоду VD. Коли ж перевантаження зникає, і фактори блокування ключа ЕК усунені, система автоматично повертається до нормального циклічного режиму комутації при отриманні першого позитивного керуючого імпульсу. ЕК відкривається, шунтує тиристор ДЕК, після чого останній закривається, завершуючи цикл захисту. Для забезпечення запуску системи або виконання налагоджувальних робіт передбачена можливість ручного перемикання режимів роботи.

Практична реалізація вищезгаданого пристрою контролю параметрів розряду (КПР) на установці для азотування в умовах тліючого циклічно-комутованого розряду підтвердила його повну працездатність у реальних промислово-технологічних процесах. У ході реалізації вдалося досягти всіх запланованих ключових передумов, що створює перспективу для експериментального впровадження циклічно-комутованого розряду як основи для інноваційного підходу до модифікації поверхонь металевих сплавів. Використання запропонованого методу відкриває можливість вирішення цілого спектра технологічних задач, серед яких найбільш ваговою є ефективна модифікація деталей складних геометричних форм, включно з такими, що мають отвори чи заглиблення із малими поперечними розмірами, але значною протяжністю. Раніше подібні деталі піддавалися успішному азотуванню виключно за допомогою пічних процесів у середовищах на основі аміаку. Однак подібний підхід у нинішніх умовах стає все менш прийнятним через кілька суттєвих недоліків. Насамперед це стосується незадовільних економічних показників даного методу та недотримання сучасних вимог екологічної безпеки. Новий метод дає можливість не лише усунути ці обмеження, а й суттєво зменшити ризик пошкодження поверхні деталей. Зокрема, цей ризик раніше виникав через спонтанний перехід тліючого

розряду в дуговий стан, що часто спостерігалось під час використання методів безперервного живлення розрядної камери. У новій системі це питання мінімізовано завдяки оптимізації умов комутації, що забезпечує стабільність процесу та підвищує його загальну надійність.

### **3 ДОСЛІДЖЕННЯ СФОРМОВАНИХ ТРИБОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ ТЛЮЧОМУ РОЗРЯДІ**

#### **3.1 Загальні положення методик випробувань триботехнічних систем**

Оцінку ефективності поверхневої модифікації металевих деталей, інструменту чи оснащення доцільно здійснювати з урахуванням умов їх подальшої експлуатації. Важливим етапом є обґрунтування і вибір методики випробувань, адже вони відіграють ключову роль у формуванні достовірних висновків щодо ефективності технології обробки. При цьому критично важливо, наскільки це можливо, забезпечити максимальну відповідність умов випробувань до реальних режимів роботи деталей. Відхилення у методах випробувань, а також у межах зміни основних параметрів досліджень, можуть значною мірою вплинути на об'єктивність висновків щодо результативності модифікації. Головна мета поверхневої модифікації, серед іншого, полягає у підвищенні зносостійкості пар тертя. Варто врахувати, що основні процеси зносу та втрати працездатності в оброблених об'єктах починаються саме з поверхні. У цьому контексті зношування є одним із найбільш значущих чинників. До того ж термін "модифікація" найточніше описує сутність процесу, оскільки охоплює зміну властивостей виробу без зміни його основної природи. Такий підхід значно ширший за поняття зміцнення, підвищення корозійної стійкості чи витривалості до втоми. Надзвичайно важливим є правильний вибір методів випробувань на зносостійкість. Методика повинна максимально відповідати реальним умовам використання виробів. Водночас

тривалість випробувань має бути настільки короткою, наскільки це допускає рівень об'єктивності отриманих результатів. На схемі (Рисунок 3.1) представлені ключові фактори, які формують методологію експериментальних досліджень та їх взаємозв'язок. Аналіз схеми показує складність цієї системи як у кількісному, так і в структурному аспекті. Навіть спроба створити повну класифікацію цих факторів є мало ймовірною через їх багаторівневу взаємодію та складний характер. Враховуючи цей складний характер, неможливо охопити усі зв'язки при розробці цілісної методології. На Рисунку 3.1 позначено лише ті характеристики, які мають найбільший вплив на формування експериментальної методики. Більшість реальних експлуатаційних схем пар тертя відносяться до фрикційної моделі взаємодії, яка описується комплексом параметрів. Ці параметри враховують основні процеси зношування та зміцнення поверхонь внаслідок фрикційної взаємодії, механізм руйнування фрагментів, а також еластичні та пластичні явища на поверхні до моменту її значного зношення чи пошкодження. Серед поширених типів зношування пар загального призначення важливими є адгезійні та абразивні процеси. При розробці методики випробувань особливу увагу слід приділити вибору контрольованих параметрів, які адекватно відобразатимуть характеристику тертя. Найпростіший спосіб відслідковувати характер тертя – це визначати коефіцієнт тертя. У сучасних машинах для дослідження тертя цей показник вираховується співвідношенням сили нормального тиску в зоні контакту до колової сили через вимірювання моменту тертя. Об'ємне і лінійне зношування напряму пов'язані, але для точного визначення об'ємних параметрів потрібно знати фізичну площу контакту. Цей параметр є складним для точного визначення навіть теоретично, оскільки залежить від мікропрофілю поверхонь. Масове визначення зношування є менш складним із методологічної точки зору, однак потреба кожного разу знімати зразки зі стенда.

Вибір виду тертя значною мірою визначається конструктивними особливостями і реальними умовами експлуатації пар тертя, що мають місце

в конкретних механізмах або пристроях. Найбільш поширеним типом тертя є тертя ковзання, яке рідко виступає як єдиний варіант, але все ж таки відіграє важливу роль завдяки своїй поширеності та впливу на швидкість зношування компонентів. Тертя ковзання вирізняється високою продуктивністю в контексті зношувального процесу, що робить його надзвичайно актуальним при оцінці довговічності механізмів. Особливе значення в цьому контексті набуває правильний вибір режиму змащення, адже від цього залежить як ефективність роботи пари тертя, так і характер наслідків у процесі зношування. Сухе тертя, хоча й демонструє максимальну швидкість зношування, що потенційно зменшує тривалість експериментів, може призводити до викривлення реалістичної картини процесу зношування. Це обумовлено тим, що в умовах сухого тертя значно підвищується температура як у зоні контакту, так і в деталях пари тертя загалом, змінюючи властивості матеріалів через теплове навантаження. Варто також зазначити, що чистий вид сухого тертя фактично майже неможливо досягти у реальних експлуатаційних умовах, де завжди присутні мікрочастинки мастильних матеріалів або природні домішки. Рідинний режим тертя є технічно складнішим для реалізації, оскільки потребує спеціальних конструкцій або строго визначених умов випробувань, які могли б гарантовано підтримувати цей режим без значних відхилень. У більшості практичних випадків реальні пари тертя функціонують у межах граничного режиму тертя, який поєднує риси рідинного і сухого тертя. Контроль за таким режимом є достатньо простим завдяки безпосередній залежності від коефіцієнта тертя, який слугує ключовим показником при оцінці стану пари.

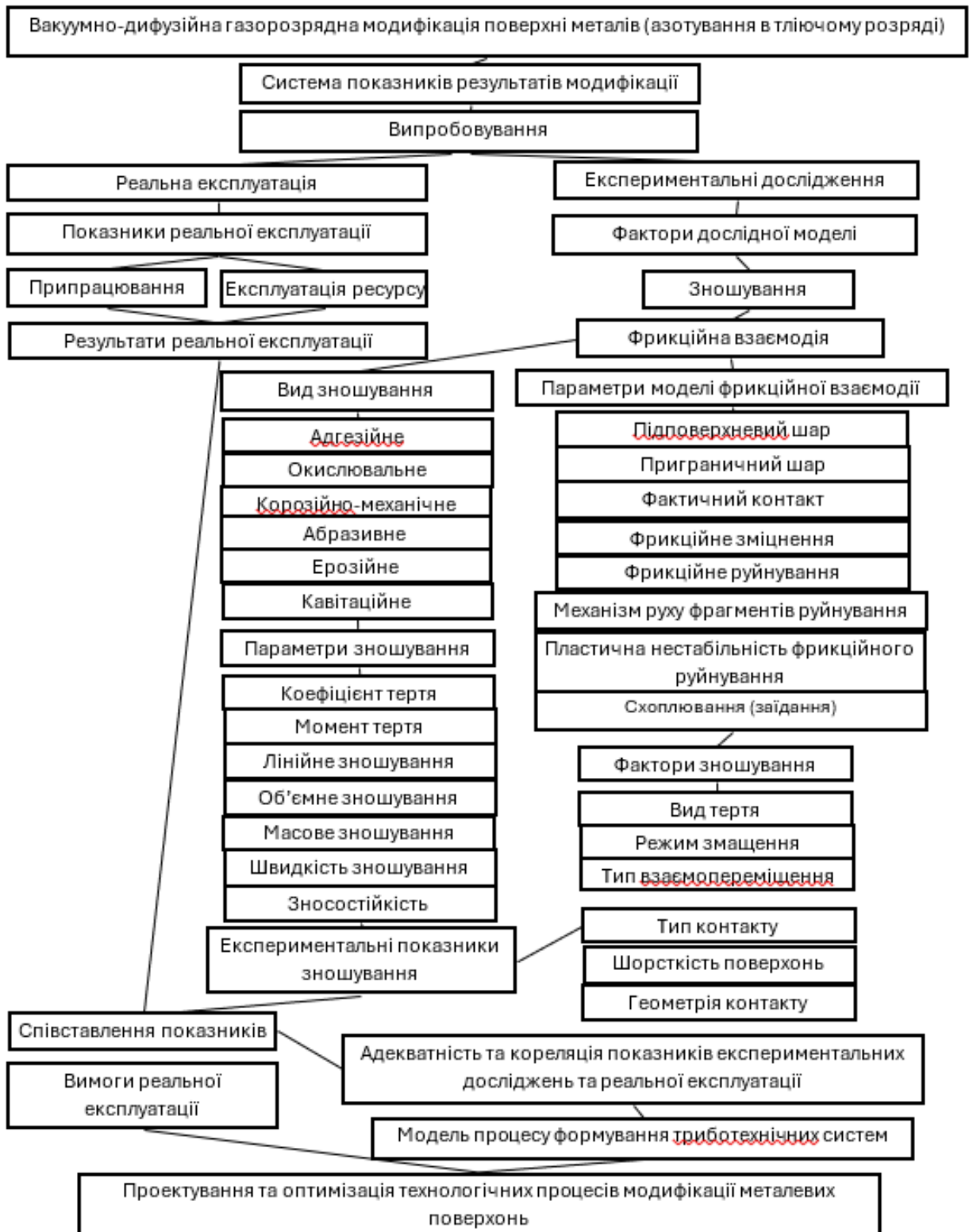
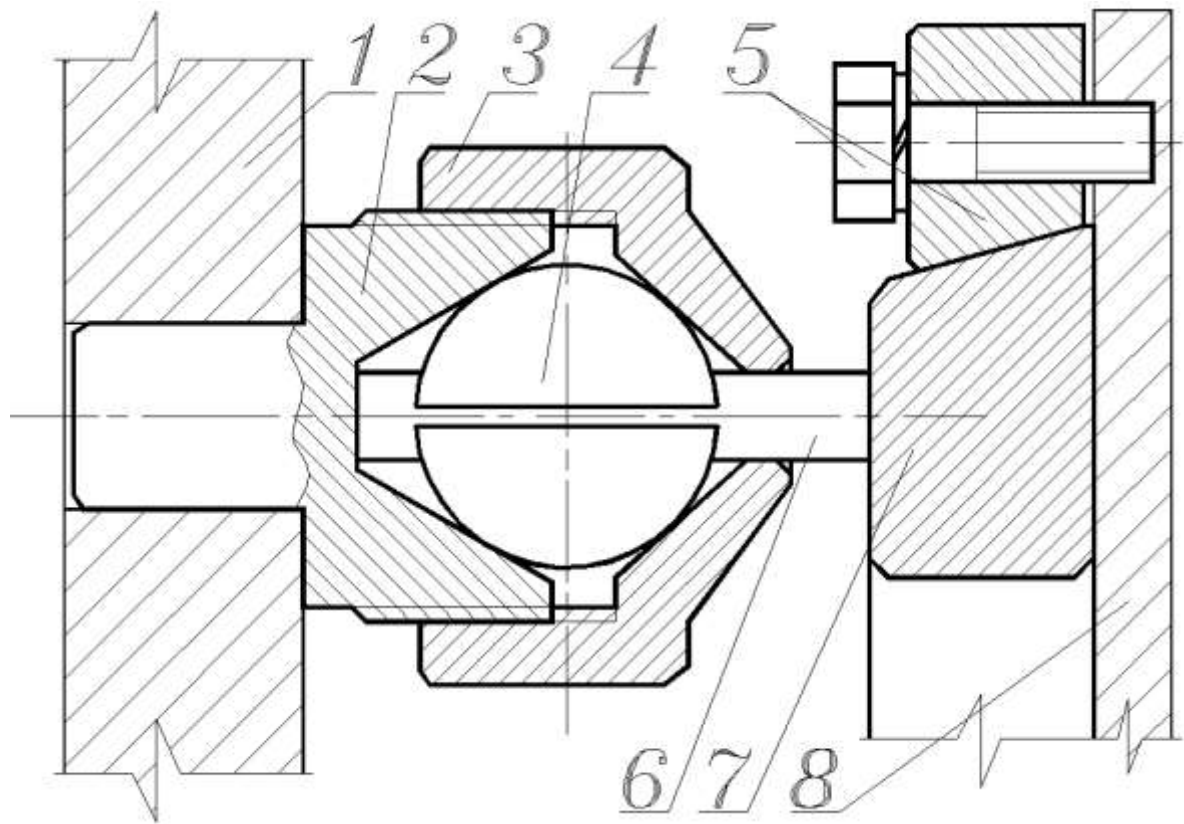


Рисунок 3.1 - Схема взаємозв'язків основних факторів формування триботехнічних систем

Геометрія контакту в значній мірі обумовлена характером взаємного переміщення взірця та контртіла, що визначає форму контакту та пов'язані з

нею параметри. Принципово контактна поверхня може мати форму площини, конуса, циліндра чи сфери. Однак, за виключенням площини, решта варіантів надають геометрію контакту у вигляді прямої або кривої лінії, причому ця крива може бути і просторовою. При цьому тип контакту, його силові характеристики та умови (пружність, пластичність або їх комбінації) впливають на реальну площу взаємодії, завдяки чому порівняння експериментальних даних стає складним завданням. Найпростіше організувати контакт у вигляді площини, оскільки номінальна площа контакту легко визначається без додаткових ускладнень. Тип взаємного переміщення також має вагоме значення. У разі плоского контакту вектор відносної швидкості повинен бути орієнтований по дотичній до контактної поверхні. Для забезпечення рівномірного зношування всієї площі контакту бажано зберігати постійність величини та напрямку цього вектора, оскільки у протилежному випадку можуть виникнути нерівномірності в терті. Це особливо важливо для уникнення схеми тертя, аналогічної тертю вертіння, або ситуацій, коли на краях контактної зони швидкість відносного переміщення значно відрізняється від її середнього значення. Наприклад, у випадках високого співвідношення ширини контактної площадки до радіуса обертання такі нерівномірності збільшуються. Важливу роль у дослідженнях відіграє шорсткість поверхонь тертя — як кожної окремо, так і тієї, яка формується в процесі припрацювання. Необхідно враховувати, що під час припрацювання поверхня взірця ущільнюється під дією нормального тиску, а також внаслідок взаємодії з уламками матеріалу в зоні тертя. При цьому характер руху цих уламків відіграє ключову роль у формуванні нових поверхневих властивостей. У зв'язку із цим виникає проблема вибору відповідного номінального тиску для пари тертя. З одного боку, тиск можна поступово підвищувати протягом експерименту, що сприятиме підвищенню мікротвердості поверхні. З іншого — можна одразу встановити високе постійне значення тиску. Однак другий підхід може призвести до небажаного явища схоплювання поверхонь через високий початковий тиск на недостатньо зміцнену поверхню. На основі

проведеного аналізу можна запропонувати кілька рекомендацій щодо



1 – супорт, 2 – сідло, 3 – гайка, 4 – сферичний шарнір, 5 – фіксатор контртіла, 6 – оптимального вибору схеми та параметрів експериментальних досліджень. По-перше, розмір контактної поверхні повинен бути максимально обмеженим, щоб забезпечити рівномірний розподіл напружень та мінімізувати їх спектр по всій площі досліджуваного об'єкта. Хоча це може збільшити співвідношення крайової зони до загальної площі контакту, цей недолік можна компенсувати ретельною підготовкою робочих поверхонь взірців із мінімальними фасками або закругленнями країв. Також мінімізація розмірів контактної зони полегшує процес встановлення взірця на контртіло, що сприяє рівномірному щільному контакту відразу після монтажу. Щодо характеру взаємного переміщення взірця та контртіла, оптимальним варіантом є нерухомість взірця при обертанні контртіла. У цій схемі взірець ковзатиме по достатньо великій доріжці обертання контртіла, що забезпечить мінімальні швидкісні відмінності між точками контактної поверхні. Логічним вибором для форВ

якості дослідного стенду вибрана машина для випробувань

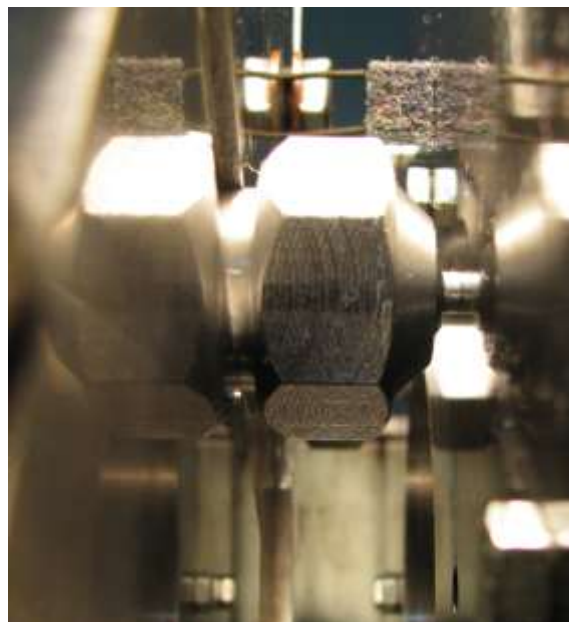
### Рисунок 3.2 - Схема закріплення взірців

матеріалів на тертя моделі 2168УМТ, яка дозволяє одночасно встановлювати три взірці, в широкому діапазоні змінювати тиск в зоні контакту, контролювати момент тертя, частоту обертання контртіла, кількість обертів (шлях тертя), в широкому діапазоні змінювати частоту обертання, відповідно – швидкість ковзання, автоматично обмежувати пройдений шлях та інші функції. Метод зношування прийнято по схемі палець-кільце, лінійне зношування контролюється за допомогою індикаторної стойки з ціною поділок вимірювального приладу 0,001 мм. Для закріплення взірців на супорті машини спроектовано та виготовлені державки, конструкція яких показана на рис. 3.2.

Основним елементом конструкції, який забезпечує самовстановлення зразка на протибічному тілі, є сферичний шарнір, виготовлений із тіла кочення підшипника. Спершу кулька проходила операцію відпускання, потім у спеціальному пристрої для центрування свердлився отвір відповідного діаметра для зразка, після чого кулька розрізалась навпіл. Для закріплення зразків супорт із тримачами переміщували до протибічного тіла. Завдяки тому, що зразки притискалися до цього тіла із заданою силою, яка відповідала номінальному тиску в контакті, вони здійснювали самовстановлення. Після завершення процесу самовстановлення вся конструкція надійно фіксувалась шляхом затягування гайок. Візуальна перевірка підтверджувала високу якість контакту, про що свідчила чітка контактна пляма.



а



б

Рисунок 3.3 - Загальний вид супорта машини тертя

На всій площі зразка вже на перших етапах шляху тертя спостерігаються помітні зміни. Контртіло було виготовлене з кільця підшипника кочення, матеріалом для цього слугувала сталь ШХ15 із твердістю основи HRC 61. Конусність, необхідна для фіксації контртіла, формувалася шляхом обробки кільця за допомогою мінерало-керамічного різця. Загальний вигляд станда зображено на рис. 3.3 (а – загальний вигляд супорта у відведеному стані, б – державка в робочому положенні). На супорті встановлено три спеціальні

пристрої для безперервного змащування бігової доріжки перед зразком, що набігає. Це дозволяє за певних параметрів тиску та швидкості досягати режиму рідинного тертя, що підтверджується низькими значеннями коефіцієнта тертя. Зразки з різних марок сталі виготовлялися шляхом чистової обробки з допуском у межах від  $-0,05$  до  $-0,01$  мм. У заданих межах допуску зразки відбирали за розмірними параметрами та сортували у групи, що дозволяло для кожного конкретного режиму модифікації застосовувати лише зразки однієї розмірної групи. Такий підхід забезпечує рівномірність площі контакту і полегшує моделювання номінального тиску в зоні взаємодії. Далі підготовані зразки спершу шліфували на спеціальній багатопозиційній оправці з одного базового торця. Після цього виконувалося доведення до необхідного розміру по довжині з протилежного торця. Конструкція оправки забезпечувала високоточність перпендикулярності торців до циліндричної поверхні, однак, як виявила практика експлуатації зразків у машині тертя, цього рівня точності виявлялось недостатньо для забезпечення контакту всією поверхнею торця з самого початку випробувань на зносостійкість. Це і стало причиною необхідності впровадження конструкції державки, описаної вище. В осьовому напрямку (за напрямком дії нормальної сили) положення зразків забезпечувалося опорою на дно сідла 2 (рис. 3.2). Тому відстань між площиною дна сідла та базовою поверхнею супорта визначалась і витримувалась із максимальною точністю. Сам диск супорта був ретельно шліфований як по площині його прилягання до сідла, так і в посадкових отворах для встановлення хвостовика сідел. Таким чином, проведений аналіз став основою для обґрунтування схеми експериментальної моделі і методики дослідження зразків, які були модифіковані азотуванням у тліючому розряді з метою підвищення їхньої зносостійкості.

#### **4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПРИ ГРАНИЧНОМУ ТЕРТІ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ, АЗОТОВАНИХ В ЦИКЛІЧНО-КОМУТОВАНОМУ РОЗРЯДІ**

Одним із перспективних напрямів розвитку трибології є створення наукових основ для контрольованого формування модифікованих поверхневих шарів на металах та їх сплавах, з урахуванням специфічних вимог подальшої експлуатації об'єктів модифікації. Цей напрям охоплює широкий спектр завдань, які включають теоретичні дослідження, розробку технологій і забезпечення умов для впровадження процесів модифікації. Окремо слід виділити розробку методик об'єктивного оцінювання постмодифікаційних характеристик поверхні, які відображають результати обробки з точки зору зносостійкості. Усі аспекти методик експериментальних досліджень, зокрема їх детальний аналіз, викладено раніше в п. 3. Для забезпечення об'єктивності досліджень зносостійкості модифікованих поверхонь важливо порівнювати їх характеристики з аналогічними параметрами геометрично подібних немодифікованих поверхонь. При цьому як для перших, так і для других необхідно використовувати однакову методику вимірювань. Лише дотримання цього принципу дозволяє оцінювати результати модифікації як достовірні та практично значущі. У разі недотримання зазначених умов може виникнути потреба у визначенні перехідної функції між результатами експериментів, що створює додаткові труднощі як теоретичного, так і прикладного характеру. Порівняння параметрів за різнорідних умов досліджень потенційно призводить до малонадійних висновків, які часто не знаходять свого підтвердження при практичному застосуванні. Ще один важливий аспект експериментальних досліджень — це наближення умов їхнього проведення до реальних експлуатаційних характеристик. Практика показує, що результати досліджень можуть суттєво відрізнятися від реальної поведінки під дією відмінностей у випробувальних умовах порівняно зі

звичайним робочим середовищем. Також суттєву роль відіграє часовий фактор. Час проведення експериментів має бути узгодженим з реальними експлуатаційними режимами, щоб процеси зношування оцінювалися максимально точно. Інакше надто тривалі експерименти можуть привести до втрати їхньої прикладної значущості через неактуальність результатів. Таким чином, завданням цієї частини дослідження є встановлення висновків стосовно отриманих результатів експериментального вивчення зносостійкості зразків після проведення поверхневої модифікації азотуванням в тліючому розряді. При цьому метою є створення науково обґрунтованої методики для подальших масштабних досліджень процесів контрольованого формування трибосистем. Критерії оцінки повинні відповідати наведеним вище вимогам. Основні результати експериментальних досліджень. Випробування проводилися на універсальній машині для вимірювання тертя й зношування моделі 2168УМТ із модифікованим вузлом тертя (детальний опис наведено у п. 3.1). Попереднє налаштування режимів експерименту здійснювалось на зразках, технологію підготовки яких описано у тому ж розділі. Для можливості подальшого порівняння характеристик вибиралися об'єкти з різними властивостями поверхонь: немодифіковані зразки зі сталі 20 та модифіковані зі сталі 45, яка пройшла азотування в тліючому розряді. Сталь 45 перед азотуванням мала твердість HV<sub>0,1</sub> 215, а після модифікації — HV<sub>0,1</sub> 700...730. Протягом усіх експериментів у зоні тертя забезпечувалась подача рідкого мастила; коефіцієнт тертя залишався в межах 0,05

Початкова серія експериментів проводилась на взірцях зі сталі 20 без їх модифікації. Твердість контртіла з загартованої сталі становила HRC 60. Швидкість та тиск вибирались в таких межах, щоб температура поверхні взірців в зоні тертя не перевищувала 40°C, а в комплексі з величиною тиску забезпечувалась би постійна наявність мастила по площадці тертя. При швидкості відносного руху взірця стосовно контртіла  $V=1,8$  м/с та тиску 10 МПа (це значення виявилось оптимальним, оскільки при ньому спостерігається більш-менш вагоме зношування та відсутні явища схоплювання) спостерігається рівномірне зношування, величина лінійного зносу в середньому складає 15,4 мкм/км шляху. Коефіцієнт тертя коливався в межах 0,05...0,11, що в умовах експерименту відповідало силі тертя в межах 29,4...64,7 Н. Залежність від шляху усередненого по декількох взірцях лінійного зносу на один кілометр шляху показана на рис. 4.1.

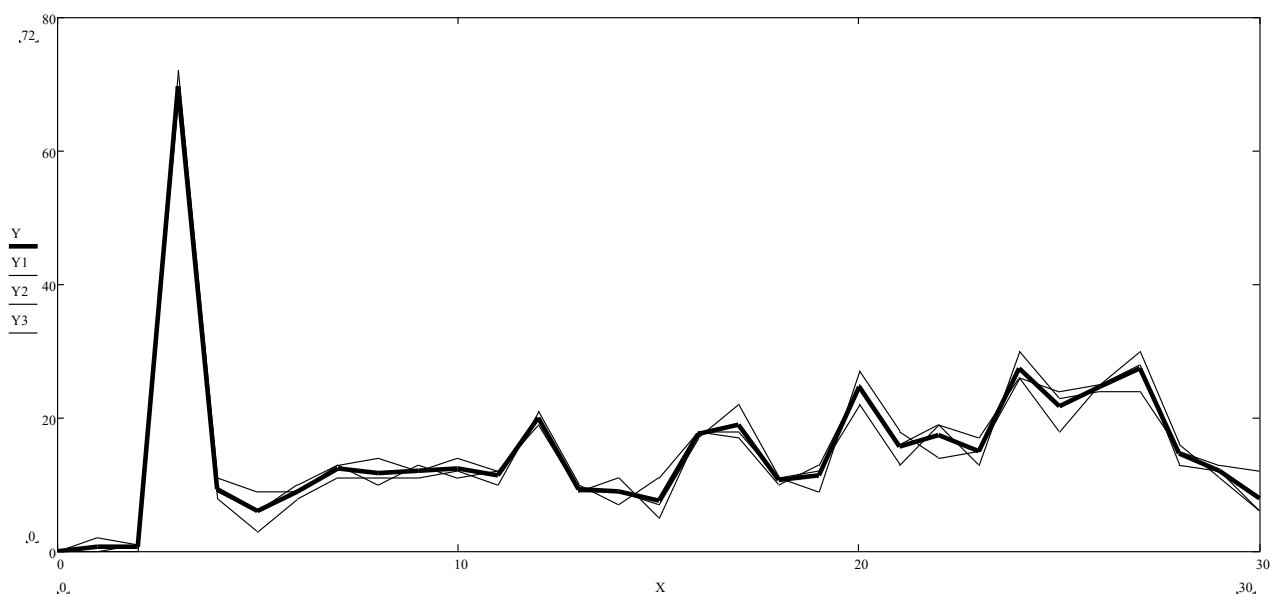


Рисунок 4.1 - Залежність від шляху тертя лінійного зносу на один кілометр шляху взірців зі сталі 20 неазотованих при тиску 10 МПа, швидкості 1,8 м/с

На рисунку 4.1 представлено графічне зображення динаміки процесу тертя та зношування матеріалу. По горизонтальній осі відкладено шлях тертя в діапазоні від 0 до 30 кілометрів, а по вертикальній осі – величина зносу, виміряна в мікрометрах. Основна лінія на графіку показує середнє значення

лінійного зносу для всіх досліджуваних зразків, тоді як тонкі лінії відображають усереднені дані для окремих груп зразків. Аналіз поданих даних дозволяє дійти важливого висновку про змінний і нерівномірний характер процесу зношування. На початкових етапах шляху тертя, тобто на перших декількох кілометрах, величина зносу практично відсутня. Це явище можна пояснити попереднім процесом припрацювання зразків, коли на них здійснювався тиск приблизно у 8 МПа для створення початкового ущільнення поверхні. У результаті такого навантаження на майбутній поверхні тертя почав формуватися ущільнений металевий шар, що виконував роль своєрідного «захисного екрану» та підвищував поверхневу твердість. Таким чином, цей шар, відомий як наклеп, обмежував процес зношування на початкових етапах. Проте, із прогресом процесу тертя та поступовим видаленням цього поверхневого захисного шару розпочиналося інтенсивне зношування. Пізніше воно починало протікати циклічно: періоди зміцнення поверхневих шарів змінювалися їх руйнуванням. Ці періодичні зміни обумовлювали й коливання коефіцієнта тертя разом із варіюванням сили тертя, що детально відслідковується на представленому графіку. Таким чином, можна зробити важливий висновок про нерівномірний характер зношування немодифікованих зразків. Це явище спричинено постійними структурними трансформаціями у зоні тертя та руйнуванням поверхневих шарів, властивості яких перевищують базову поверхневу твердість основного матеріалу зразків. Аналогічні висновки підтверджуються додатково за графіком абсолютного зносу на рисунку 4.2, де залежність величини зносу від довжини шляху тертя демонструє схожу тенденцію (позначення ліній на цьому графіку залишаються ідентичними до рисунка 4.1). Ефект зміцнення поверхневого шару внаслідок створення наклепу стає ще більш вираженим із підвищенням величини прикладеного тиску, як зазначалось у попередніх розділах (див. пункт 3.2). Було встановлено, що при збільшенні тиску поверхнева мікротвердість могла збільшуватися у кілька разів. Наприклад, для чавунної поверхні, яка піддавалася обробці тиском у 1,2 МПа, мікротвердість досягала рівнів HV0,1

1000, що суттєво перевищувало вихідні значення. Також можна припустити, що присутність мастильних матеріалів у зоні контакту між зразком і контртілом сприяє формуванню метало-мінеральних структур. Ці структури зазнають постійних утворень і руйнації під час тертя, що також може значно впливати на нерівномірність процесу зношування. Цей фактор є вартий уваги при оцінці загальної динаміки процесу та його особливостей.

Характер прикладення та, особливо, схема зміни величини тиску на поверхні тертя суттєво впливають на процес зношування. Передусім це проявляється у значному ефекті поверхневого зміцнення. Досліди, проведені зі зрізками з немодифікованої сталі 45, підтверджують вплив характеру зміни тиску. При початковому тиску 10 МПа і швидкості взаємного руху зрізка та контртіла 1,8 м/с (параметри режиму випробувань співпадали з тими, що застосовувалися для сталі 20), лінійний знос майже не фіксувався після проходження шляху у 10 км. Поступове збільшення тиску на 2 МПа після кожного кілометра до величини 16 МПа також не вплинуло на характер зношування. Однак при тиску 18 МПа на наступному кілометрі був зареєстрований лінійний знос у межах 15-17 мкм, але вже наступного кілометра знос припинився. При подальшому збільшенні тиску до 20 МПа після досягнення 18 км загального шляху зношування знову не спостерігалось. Отже, поверхня зрізка періодично ущільнюється і зміцнюється. Для її руйнування потрібен або значний шлях тертя, або підвищення тиску до конкретних меж, які викликають силу тертя, достатню для структурної зміни поверхні. Додатково відмічено, що початкова поверхнева мікротвердість HV<sub>0,1</sub> 215 після проходження 20 км шляху за умов тиску 20 МПа зросла до HV<sub>0,1</sub> 414 (HV<sub>0,05</sub> 616). При подальшому збільшенні тиску на 2 МПа з кожним пройденим кілометром лінійний знос залишався незначним аж до досягнення тиску 26 МПа. На цьому рівні тиску інтенсивність зношування різко збільшилася до значень 131-167 мкм, після чого почалися явища схоплювання. В процесі тертя при тиску 26 МПа поверхнева мікротвердість досягла HV<sub>0,1</sub> 856 (HV<sub>0,05</sub> 962), що свідчить про механічну модифікацію

поверхні. Характер зміни тиску в зоні контакту відіграє помітну роль. У проведеному експерименті тиск збільшувався поступово (на 2 МПа після кожного пройденого кілометра), у результаті чого структурні зміни на поверхні відбувалися послідовно. Проте у наступному експерименті, коли на аналогічних взірцях початковий рівень тиску одразу встановили на позначці 24 МПа (збіг з максимальним значенням попереднього експерименту), вже на першому кілометрі тертя коефіцієнт миттєво зріс до рівня, характерного для захоплювання. Поверхнева мікротвердість у таких умовах становила HV0,1 892 (HV0,05 962). Різкий стрибок напружень спричинив значні структурні зміни поверхні, які могли призвести до витискання мастильної плівки з контактної зони, перевівши процес у режим сухого тертя і викликавши захоплювання. Ефект характеру зміни тиску підтверджено наступним експериментом: при поступовому збільшенні тиску на 2 МПа/км шляху лінійний знос не спостерігався. Водночас різке підвищення тиску до 20 МПа після проходження перших п'яти кілометрів миттєво викликало явища захоплювання. Поверхнева мікротвердість наприкінці такого експерименту дорівнювала HV0,1 838 (HV0,05 905).

Стан поверхні контртіла має важливий вплив на характер процесу зношування. У попередніх дослідженнях, проведених із використанням контртіла з загартованої сталі з гладкою поверхнею (параметр шорсткості Ra 0,27), спостерігалась низка особливостей. Такі експерименти вимагали значних витрат часу — наприклад, для однієї серії зразків зі сталі 20, враховуючи час на стабілізацію температури, проведення вимірювань тощо, знадобилось би два повні робочі дні (15 годин). Водночас отримання достовірних результатів вимагало б додаткових зусиль і часу, що виглядає непрактичним, особливо у разі потреби оперативного аналізу ефективності методів модифікації або технологічних параметрів в умовах виробництва. З огляду на це, наступна стадія експериментів була спрямована на підвищення ролі механічної складової у процесі зношування. Задля цього використовували контртіла із штучно збільшеною шорсткістю поверхні. Шліфування

виконували за допомогою наждачного паперу вручну, спеціалізованих кругів на шліфувальному верстаті, нанесення титану та твердого сплаву електроіскровими методами, створення радіальних насічок тощо. У результаті цієї обробки параметр шорсткості Ra зріс: з 0,2–0,3 мкм до 0,5 мкм при ручному шліфуванні наждачкою; до 0,37 мкм після шліфування кругом на верстаті; та до 1,15 мкм при застосуванні кругової шліфувальної машинки. Після нанесення титанових і тврдосплавних покриттів за методом електроіскрової імплантації шорсткість перевищила 8 мкм. Твердість поверхні після такого оброблення варіювалась у межах HV0,1 450–800, залежно від полярності електрода, вибраного матеріалу для імплантації та методу подальшої обробки. Найвищі значення твердості спостерігались у зонах додаткового шліфування після імплантації, що підтвердило гіпотезу про ущільнення поверхневих шарів у результаті шліфування. На графіку зміни лінійного зносу зразків із немодифікованої сталі 45 (контртіло пройшло модифікацію електроіскровим методом; тиск—4 МПа, швидкість—1,8 м/с), зображеному на рисунку 4.3, можна побачити характер змін процесу зношування. На початковому етапі знос має значно вищу інтенсивність порівняно з попередніми дослідями, навіть за умови меншого тиску на поверхню. Висока різальна здатність контртіла сприяє руйнуванню поверхневих структур без їх ущільнення. Однак із часом, зі зменшенням гостроти мікровиступів на поверхні контртіла, інтенсивність зношування

помітно знижується, аж до повного призупинення.

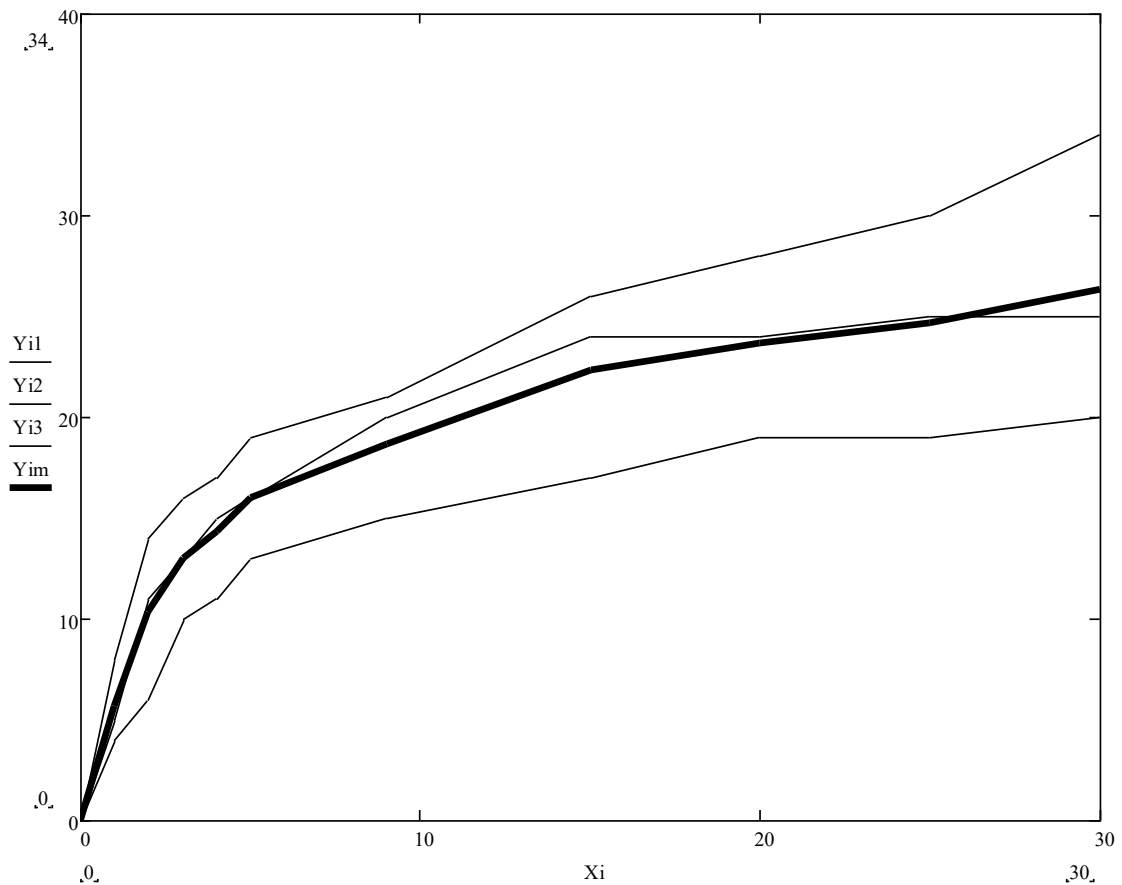


Рисунок 4.3 - Графік зміни лінійного зносу для пари взірців з немодифікованої сталі 45 – контроліло імплантоване електроіскровим методом

Подібні результати за змістом були отримані під час використання контроліло, одне з яких оброблено на токарному верстаті різцем ВОК60 при радіальній подачі 0,11 мм/об. Така обробка забезпечила параметр шорсткості поверхні Ra у межах 2-3 мкм. Інтенсивність зношування на першому кілометрі шляху при тиску 2 МПа становила 8-10 мкм на кожні 100 м шляху. Водночас, уже на початку другого кілометра цей показник зменшився до рівня 1-2 мкм на 100 м. Надалі ж інтенсивність зношування склала близько 1-2 мкм на кожен кілометр.

Характер зношування азотованих взірців в порівнянні з неазотованими демонструється рис. 4.4. Азотовані взірці (сталь 45, поверхнева

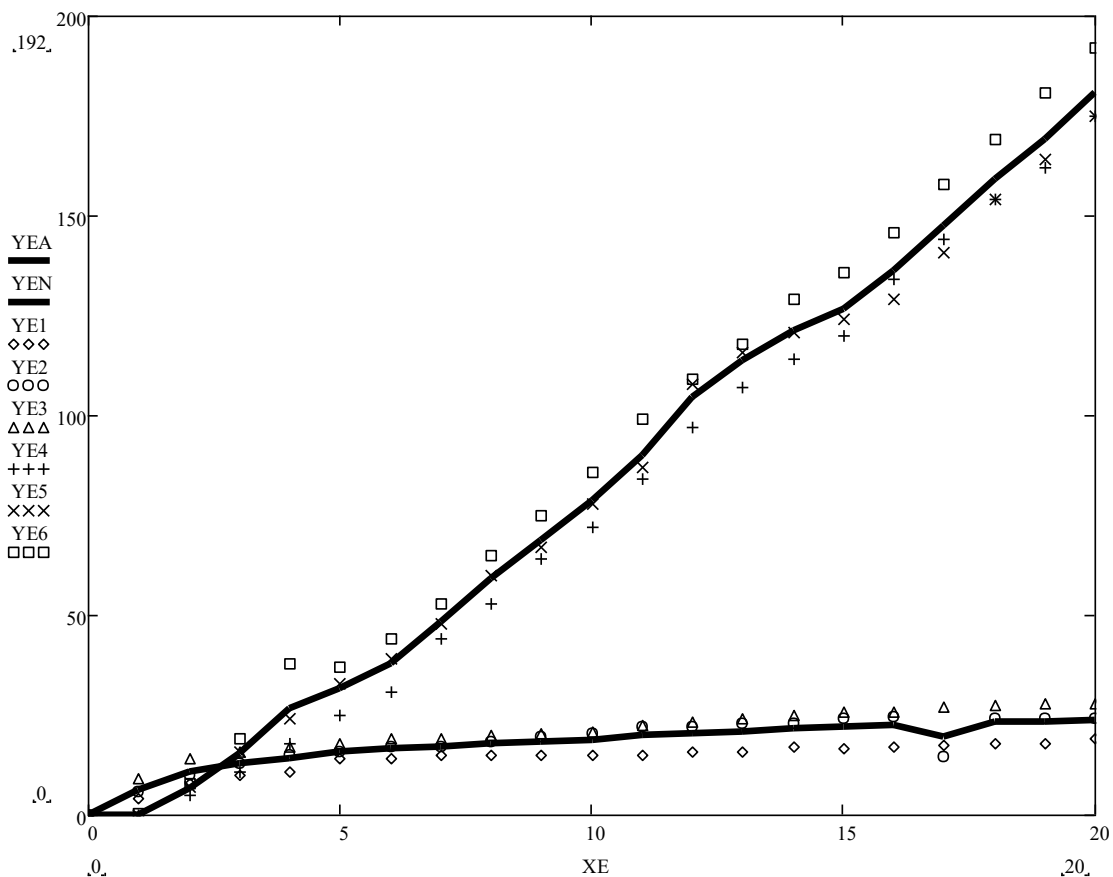


Рисунок 4.4 - Зношування азотованих (верхня область) та неазотованих взірців (нижня) за рахунок дії механічної складової тертя (тиск 4 МПа, контртіло – імплантований електроіскровим методом твердий сплав ВК8) мікротвердість  $HV_{0,1}$  466) зношувались в тих же умовах, які наведені вище з використанням проточеного різцем контртіла, проте тиск складав 4 МПа. Як слідує з рисунка процес зношування для неазотованих взірців – традиційний з утворенням ущільнених поверхневих структур та практично припиненням зношування вже після п'яти кілометрів шляху. Азотовані взірці на першому кілометрі практично не зношуються, оскільки в роботу вступає найбільш міцний прошарок  $\epsilon$ -фази. Проте його товщина незначна, буквально декілька мікрметрів, тому вже на наступних кілометрах шляху починається процес зношування практично зі сталою інтенсивністю. Пов'язано це з тим, що реально однорідний прошарок  $\gamma'$ - фази та  $\alpha$ -твердого розчину з достатньо значними показниками твердості не піддається ущільненню і знімається за рахунок в основному впливу на достатньо крихку структуру механічної

складової процесу зношування. Крім того, в експериментах, результати яких відображені на рис. 4, застосовувався відносно невеликий тиск.

У ході подальших досліджень основна увага була зосереджена на вивченні впливу тиску на процес зношування, причому діапазон робочих значень тиску поступово зростав до досить високих величин. Результати експериментальної серії, присвяченої цьому питанню, представлені на рисунку 4.5. Як свідчить аналіз графічних даних рисунка 4.5, незалежно від рівня прикладеного тиску існує характерний момент, коли процес зношування практично зупиняється. Водночас, шлях до досягнення подібної стабілізації варіюється залежно від конкретного рівня тиску. Висунута раніше гіпотеза, згідно з якою зношування в умовах домінування механічного чинника є результатом сукупності двох взаємозалежних і конкуруючих процесів – зміцнення поверхні та її подальшого руйнування – знайшла підтвердження у цих дослідженнях. Графічні залежності з рисунка 4.5 демонструють, що чим твердіший контактуючий матеріал, тим вищим є критичне значення тиску, при якому починається руйнування ущільненого поверхневого шару. Зауважено також екстремальний характер впливу тиску на інтенсивність зношування. Найбільш виражена динаміка цього процесу спостерігалася при тиску, еквівалентному 65 МПа. У той же час при значеннях тиску, менших або більших за цю величину, інтенсивність зношування суттєво знижувалась, за умови рівності швидкості ковзання. Додатково встановлено, що зі збільшенням швидкості ковзання інтенсивність зношування зменшується, а фаза стабілізації розпочинається раніше. Це явище пояснюється скороченням часу релаксації під час процесів ущільнення поверхневого шару, спричиненої

швидшим перебігом взаємодій між матеріалами.

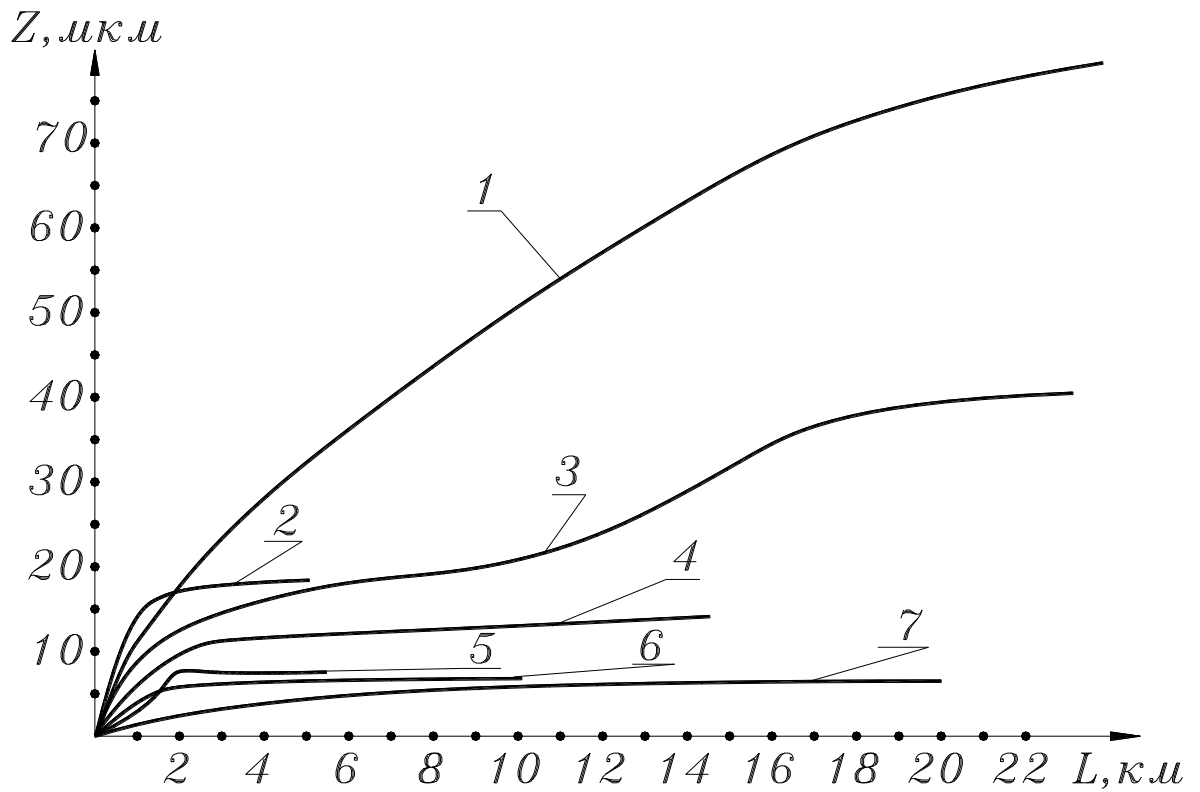


Рисунок 4.6 - Знос взірців зі сталі 45 азотованої в залежності від шляху при тиску в зоні контакту та швидкості ковзання: 1- 65 МПа, 0,1 м/с; 2 – 50 МПа, 0,1 м/с; 3 – 120 МПа, 0,1 м/с; 4 – 80 МПа, 0,1 м/с; 5 – 40 МПа, 0,3 м/с; 6 – 65 МПа, 0,2 м/с; 7 – 20 МПа, 0,2 м/с

## 5 ВИСНОВКИ

Підсумовуючи викладений матеріал, можна зазначити наступне. Процес зношування в умовах граничного тертя складається з двох протилежних за характером явищ: ущільнення поверхневого шару зі збільшенням його мікротвердості та руйнування цього шару через локальне захоплення поверхонь. Співвідношення між цими процесами значною мірою залежить від початкового стану поверхні, її фізико-механічних властивостей, тиску в зоні контакту, а також швидкості ковзання. Всі ці фактори взаємопов'язані в межах граничного режиму тертя. Через ці особливості проведення тестів на зносостійкість зразків із різних матеріалів або таких, що мають суттєво різні характеристики поверхневого шару, при ідентичних умовах випробувань, як правило, є непрактичним, оскільки отримані результати важко порівнювати між собою. Раціональним підходом є створення умов випробувань, які забезпечують можливість тестувати зразки з різними характеристиками поверхонь. Такі умови мають гарантувати достовірність результатів, їх порівнянність і прийнятні терміни виконання досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. 1064671 США, МПК С23с 11/ 16. Treatment of steel and iron surfaces : W. S. Simpson (США) - № 715638 ; заявл. 17.08.1912 ; опубл. 10.06.1913 ; НКП 204/ 164 – 6 с.

2. Пат. 1929392 США, МПК С23с 11/ 16. Method of treating metal alloys : V. T. Malkolm (США) ; The chapmen valve manufacturing company. - № 455956; заявл. 26.05.1930 ; опубл. 22.12.1931. ; НКП 204/ 164 – 3 с.

3. Пат. 1837256 США, МПК С23с 11/ 16. Process of case hardening : / J. J. Egan (США) ; Electric metallurgical company. - № 667677 ; заявл. 24.04.1933 ; опубл. 3.10.1933. ; НКП 204/ 164 – 4 с.

4. Пат. 1904457 США, МПК С23с 11/ 16. Case hardening : / J. J. Egan (США) ; Electric metallurgical company. - № 556464 ; заявл. 11.08.1931 ; опубл. 10.04.1934. ; НКП 204/ 164 – 1 с.

5. Пат. 1975064 США, МПК С23с 11/ 16. Treatment of ferrous metals : / V. T. Malkolm (США) ; The chapmen valve manufacturing company. - № 726481 ; заявл. 19.05.1934 ; опубл. 25.09.1934. ; НКП 204/ 164. – 3 с.

6. Пат. 2131710 США, МПК С23с 11/ 16. Method of treating steel : / V. T. Malkolm (США) ; (The chapmen valve manufacturing company). - № 170025 ; заявл. 20.10.1937 ; опубл. 27.09.1938. ; НКП 204/ 164 – 2 с.

7. Пат. 2188137 США, МПК С23с 11/ 16. Method of heat treating : Пат. 2188137 США, МПК С23с 11/ 16/ V. T. Malkolm (США) ; The chapmen valve manufacturing company. - № 227763 ; заявл. 31.08.1938 ; опубл. 23.01.1940. ; НКП 204/ 164. – 2 с.

8. Пат. 2916409 США, МПК С23с 11/ 16. Process and apparatus for the treatment ferrous articles : / Н. Вусек (Швейцария) ; Electrophisikalische Anstalt, Bernhard Bergaus. - № 624169 ; заявл. 5.11.56 ; опубл. 8.12.59. ; НКП 204/ 164. – 7 с.

9. Пат. 2946708 США, МПК С23с 11/ 16. Nitriding with electric glow

discharge : / В. Bergaus, Н. Bucek (Швейцария) ; Electrophisikalische Anstalt, Bernhard Bergaus. - № 534376 ; заявл. 14.09.55 ; опубл. 26.06.60. ; НКП 204/ 164. - 2 с.

10. Kolbel J. Die Nitridschichtbildung beider Glimmnitrierung / J. Kolbel / Forschungsberichte des Landes Nordrhein - Westfalen. – 1965, № 1555. - S. 1 - 19.

11. Keller K. Schichtaufbau glimmnitrieren Eisen Werkstoffe / K. Keller / Harterei - Technische Mitteilungen. - 1971. - Bd. 26, № 2. - S. 120 - 128.

12. Keller K. Jonnitriren steuerbare Oberflächenverfestigung durch Jonnitriren / K. Keller / Technische Rundschau. - 1971. - Bd. 63, № 37. - S. 33 - 39.

13. Keller K. Ionnitriren von Schenken aus Nitrierstählen und ähnlichen Werkstoffen für Extruder und Spritzgießmaschinen / K. Keller / Plastverarbeiter. - 1971, № 6. - S. 3 - 11.

14. Edenhofer B. Physikalische und metallkundliche Vorgänge beim Nitriren in Plasma einer Glimmentladung / B. Edenhofer / Harterei - Technische Mitteilungen. - 1974. - Bd. 29, № 2. - S. 105 - 112.

15. Szabo A. Zum Mechanismus der Nitrierung von Stahloberflächen in Gleichspannungsglimmentladungen / A. Szabo H. Wilhelmi // Harterei - Technische Mitteilungen. – 1984. - Bd. 39, № 4. – S. 148 - 154.

16. Лахтин Ю. М. Азотирование стали / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган - М. : Машиностроение. - 1976. - 256 с.

17. Лахтин Ю. М. Оптимизация газодинамических и энергетических параметров ионного азотирования / Ю. М. Лахтин, Я. Д. Коган, В. Н. Шапошников // Металловедение и термическая обработка металлов. - 1976. - № 6. – С. 2 - 6.

18. Григорович В. К. Электронное строение и термодинамика сплавов железа / В. К. Григорович - М. : Наука. - 1970. - 292 с.

19. Арзамасов Б. Н. Роль удельной мощности разряда при ионной химико - термической обработке сплавов / Т. А. Панайоти // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2000. - № 6. - С. 31 - 34.

20. Панайоти Т. А. Влияние давления в газоразрядной камере на глубину

диффузии азота в титановых сплавах / Т. А. Панайоти // *Металловедение и термическая обработка металлов*. - 1998. - № 9. - С. 32 - 35.

21. *Химико - термическая обработка металлов и сплавов : справочник / под ред. Л. С. Ляховича. – М. : Metallurgia, 1981. – 420 с.*

22. Лариков Л. Н. Диффузионные процессы в упорядоченных сплавах / Л. Н. Лариков, В. В. Грейченко, В. М. Фальченко – К. : Наукова думка, 1975. – 213 с.

23. Герасименко Ю. Т. Возникновение напряжений и образование дислокаций в диффузионной зоне : в кн. : *Физика прочности и пластичности металлов и сплавов / Ю. Т. Герасименко – Куйбышев, 1978. – С. 71 - 74.*

24. Бидерман В. Л. *Механика тонкостенных конструкций. Статика. / В. Л. Бидерман– М. : Машиностроение, - 1977, 488 с.*

25. Лахтин Ю. М. *Физические основы процесса азотирования / Ю. М. Лахтин– М. : Машгиз, 1948. – 144 с.*

26. Новые идеи о механизме образования структуры азотированных сталей / [С. А. Герасимов, А. В. Жихарев, Е. В. Березина и др.] // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2004. - № 1. – С. 13 - 18.

27. Шпис Х. Контролируемое азотирование / Х. Шпис, Х. Ле Тьен, Х. Бирманн // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2004. - № 7. – С. 7 - 12.

28. Домбровский Ю. М. *Физические и технологические основы метода поверхностного плазменного упрочнения : автореф. дис. на соискание уч. степени д - ра техн. наук : 05.02.01. / Ю. М. Домбровский - Ростов - на - Дону, 1999. - 51 с.*

29. *Получение покрытий на металлах в тлеющем разряде / [Д. А. Прокошкин, Б. Н. Арзамасов, Е. В. Рябченко, И. А. Михайлов] ; в кн. : Защитные покрытия на металлах, вып. 3. – К. : Наукова думка, 1970. – с. 7 - 17.*

30. Желанова Л. А. *Безводородная нитроцементация быстрорежущих сталей в плазме тлеющего разряда : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : 05.16.01 / Л. А. Желанова ; Курский техн. ун - т. - Курск,*

1998. - 18 с.

31. Калев Л. Влияние технологических параметров на основные характеристики слоя при ионном азотировании / Л. Калев: пер. с болг. // Реф. журн. «Металлургия». – 1973. - Вып. 22, № 5. - С. 215 - 218.

32. Панайоти Т. А. Создание максимальной насыщающей способности газовой среды при ионном азотировании сплавов / Т. А. Панайоти // Физика и химия обработки материалов. - 2003. - № 4. - с. 70 - 78.

33. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / Игорь Маркович Пастух - Харьков, Национальный научный центр «Харьковский физико - технический институт», 2006. – 364 с.

34. Пастух И. М., Вакуумно - диффузионная обработка поверхности металлов с применением тлеющего и дугового разрядов в газах / И. М. Пастух, А. А. Андреев, В. М. Шулаев // Новые процессы термической обработки. Библиотека ОТТОМ. – Харьков, ННЦ ХФТИ. – 2004. – С. 5 - 57.

35. Kwon S. C.,. A comparative study between pulsed and D. C. ion nitriding behavior in specimens with blind holes / S. C. Kwon,. G. H. Lee, M. C Yoo // 1<sup>st</sup> International conference of ion nitriding. – Cleveland, Ohio. – 1986. – P. 77 - 81.

36. Grun R. Industrial advances for plasma nitriding / R. Grun // 2<sup>nd</sup> International conference on ion nitriding. – Cincinnati, Ohio. – 1989. – P. 157 - 163.

## ДОДАТКИ

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії транспорту та архітектури  
Кафедра галузевого машинобудування та агроінженерії

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**На тему: Зміцнення вуглецевих сталей азотуванням в циклічно-комутованому розряді»**

Виконав здобувач 2-го курсу гр. МАХВм-24-1

Василь ВАСИЛЬКІВ

Керівник: д.т.н., професор

Мирослав СТЕЧИШИН

Хмельницький, 2025

## Вступ

Аналіз літературних джерел вказує на перспективність азотування в тліючому розряді при циклічно-комутованому живленні газорозрядної камери.

В теоретичному плані процес азотування в 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.

Більшість теоретичних досліджень процесу стосується того з можливих його варіантів, де джерело живлення постійне. Проте принципово можливі і інші варіанти живлення, причому в цьому випадку досягаються певні технологічні переваги.

Детальніший розгляд азотування в тліючому розряді саме за критерієм безперервності живлення приводить до схеми на рис. 1.

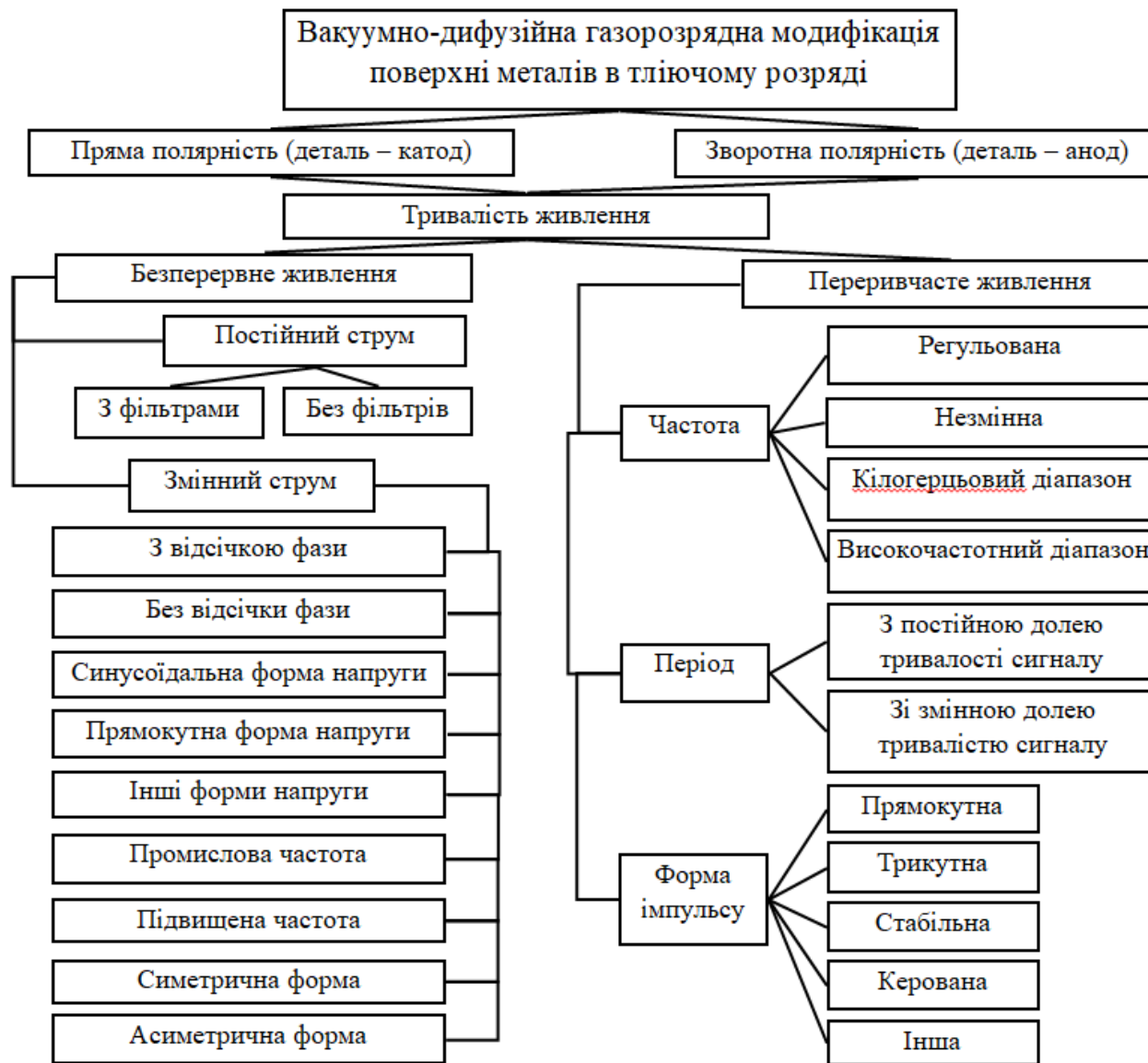
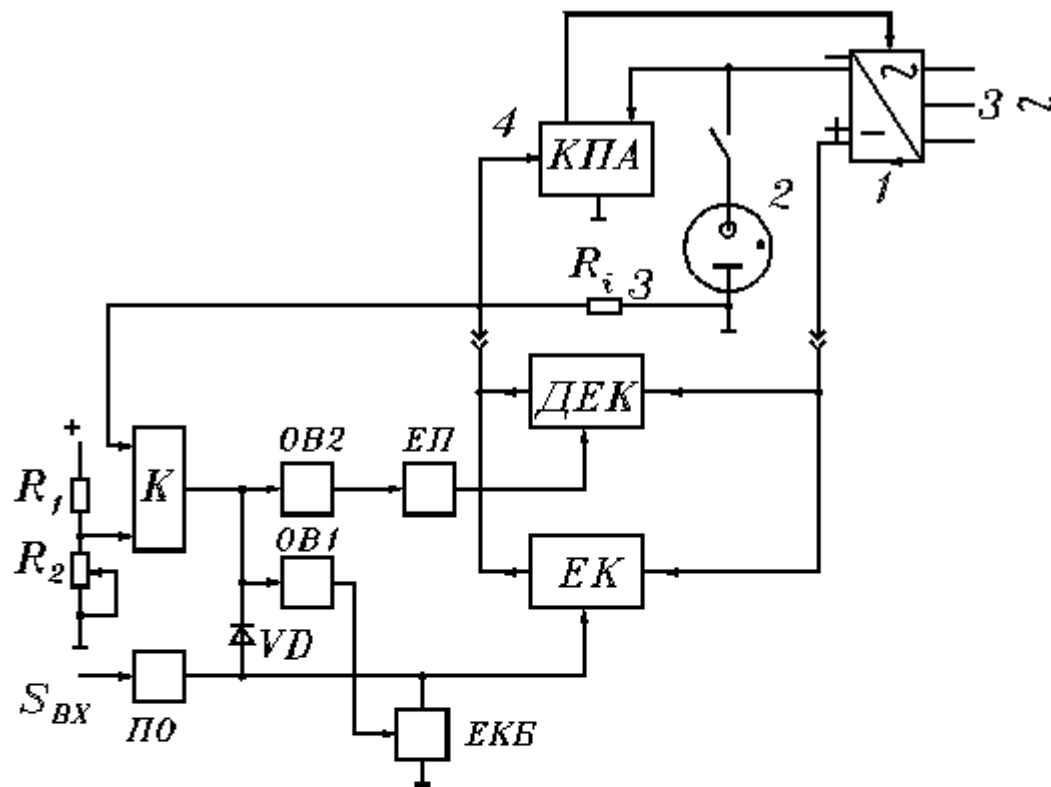


Рисунок 1. Класифікація процесів азотування в тліючому розряді за критерієм характеристик джерела живлення



1 – трифазний випрямляч; 2 – розрядна камера; 3 – датчик струму; 4 – контролер процесу азотування;  $R_i$  – датчик струму;  $R_1$ ,  $R_2$  – задатчики порогу; К – компаратор;  $S_{вх}$  – вхідний керуючий сигнал; ПО – підсилювач-обмежувач; OB1, OB2 – одновібратори; ЕК – електронний ключ; ДЕК – допоміжний електронний ключ; ЕП – емітерний повторювач; ЕКБ – електронний ключ блокування; VD – діод блокування

Рисунок 2. - Функціональна схема контролера переривчастого режиму

## Вузол машини тертя

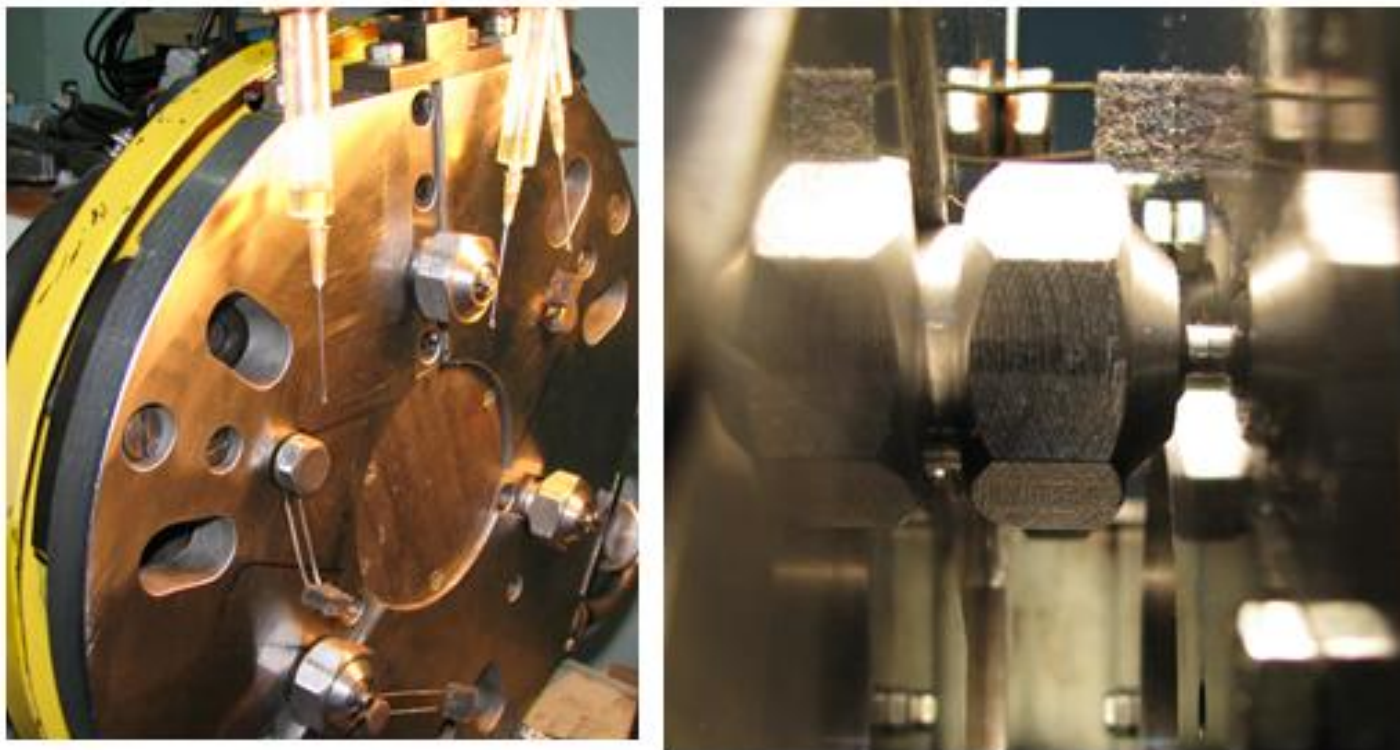


Рисунок 3 - Загальний вид супорта машини тертя

Експериментальні дослідження проводились на універсальній машині для випробування матеріалів на тертя моделі 2168УМТ з деякою модернізацією вузла тертя, що показано на рис. 3.

Для подальшого співставлення процесів зношування вибирались об'єкти з суттєво відмінними характеристиками поверхні: м'які поверхні представлені взірцями із сталі 20 без модифікації, модифіковані – зі сталі 45 після їх азотування в тліючому розряді. Оскільки в зону тертя на протязі всіх експериментів забезпечувалась подача рідкого мастила, то коефіцієнт тертя фіксувався в діапазоні 0,05...0,12, що відповідає граничному режиму тертя.

Залежність від шляху усередненого по декількох взірцях лінійного зносу на один кілометр шляху показана на рис. 4.

На рис. 4 на горизонтальній осі відкладено шлях тертя від 0 до 30 км, на вертикальній осі – величина зносу в мкм, основною лінією – величину лінійного зносу усереднену по всіх взірцях, тонкими лініями – усереднений лінійний знос по групах взірців. З наведеного рис. 4 чітко відслідковується



Рисунок 4 - Залежність від шляху тертя лінійного зносу на один кілометр шляху вірців зі сталі 20 неазотованих при тиску 10 МПа, швидкості 1,8 м/с

Щодо змінного характеру самого процесу зношування. На перших кілометрах шляху зносу практично немає, це може пояснюватись тим, що взірці попередньо навантажувались в процесі припрацювання тиском порядку 8 МПа. При цьому на майбутній поверхні тертя утворювався шар ущільненого металу, свого роду – наклеп, тобто вона поверхнево зміцнювалась. В міру зняття цього початкового поверхневого шару починався процес інтенсивного зношування. Далі зношування відбувалось за схемою періодичного поверхневого ущільнення та руйнування цього ущільненого шару. Цим і пояснюються періодичні коливання як коефіцієнта тертя, так і сили тертя. Таким чином, з викладеного слідує перший висновок стосовно нерівномірного характеру зношування немодифікованих взірців, викликаного постійними структурними перетвореннями на поверхні тертя та руйнуванням структур, характеристики котрих перевищують показники поверхневої твердості основи взірців. Цей же висновок підтверджується на рис. 5 графіком абсолютного зносу взірців в залежності від пройденого шляху тертя (позначення ліній – аналогічне рис. 4).

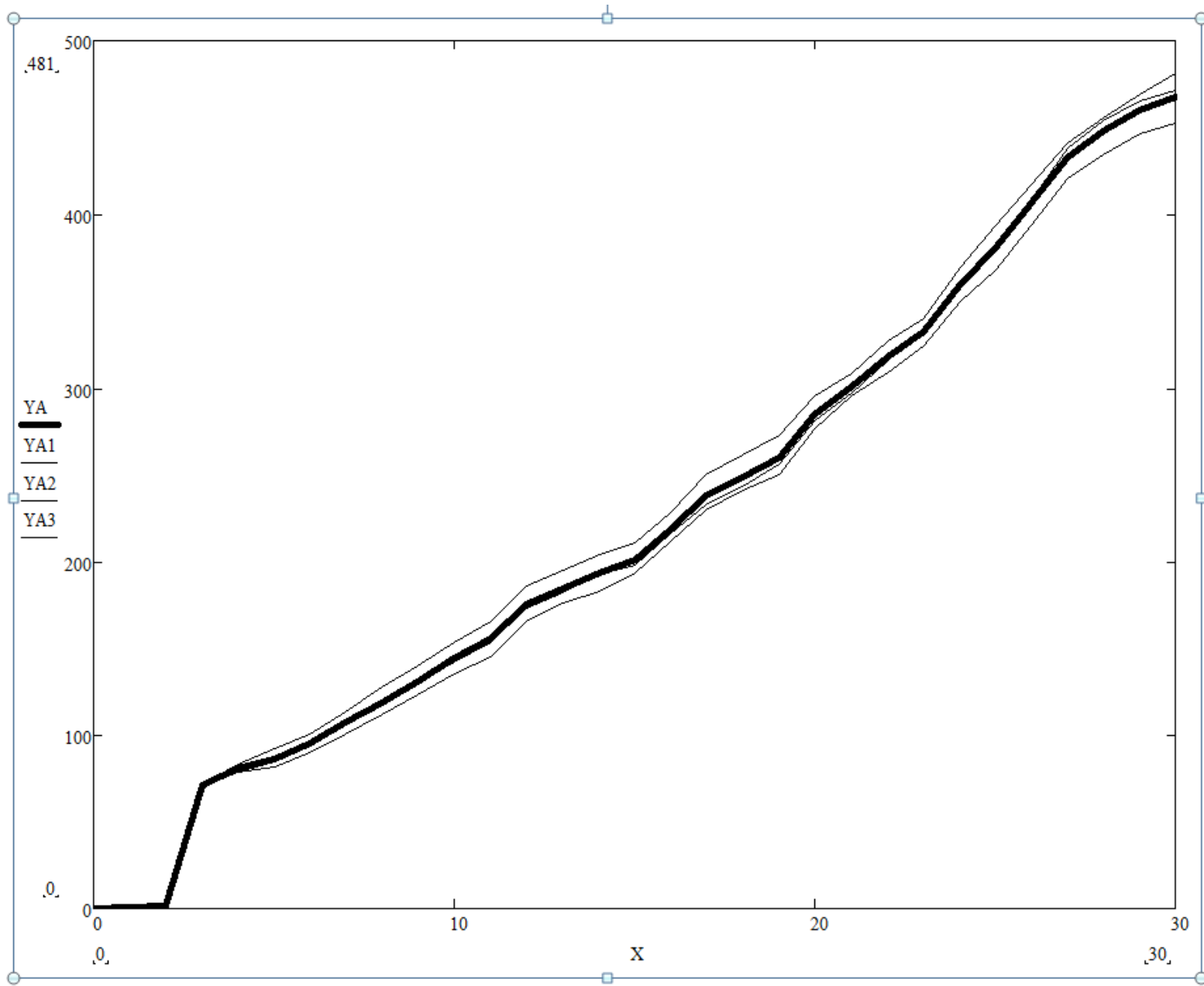


Рисунок 5 - Графік абсолютного значення лінійного зносу взірців зі сталі 20

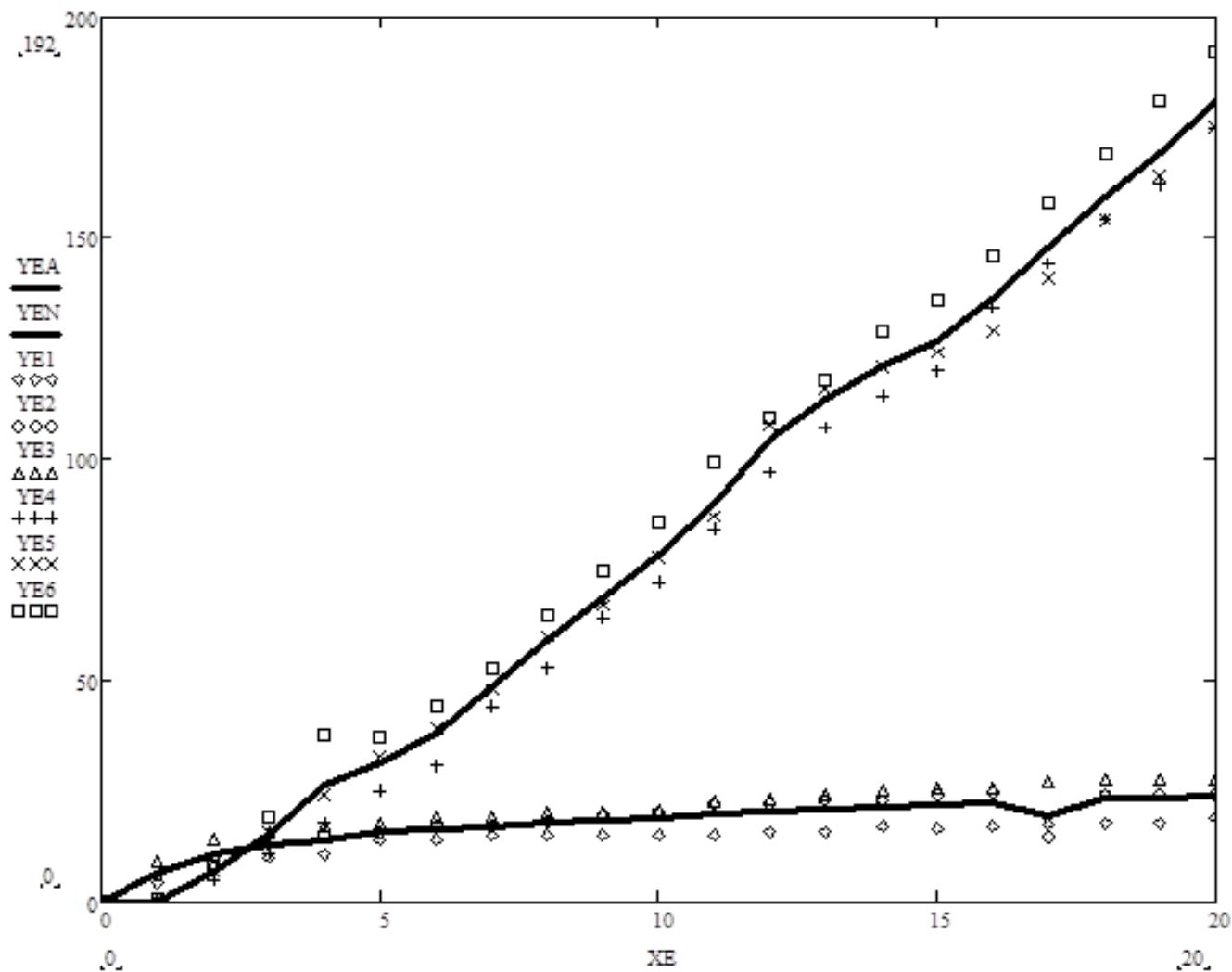


Рисунок 6 - Зношення азотованих (верхня область) та неазотованих взірців (нижня) за рахунок дії механічної складової тертя (тиск 4 МПа, контртіло – імплантований електроіскровим методом твердий сплав ВК8)

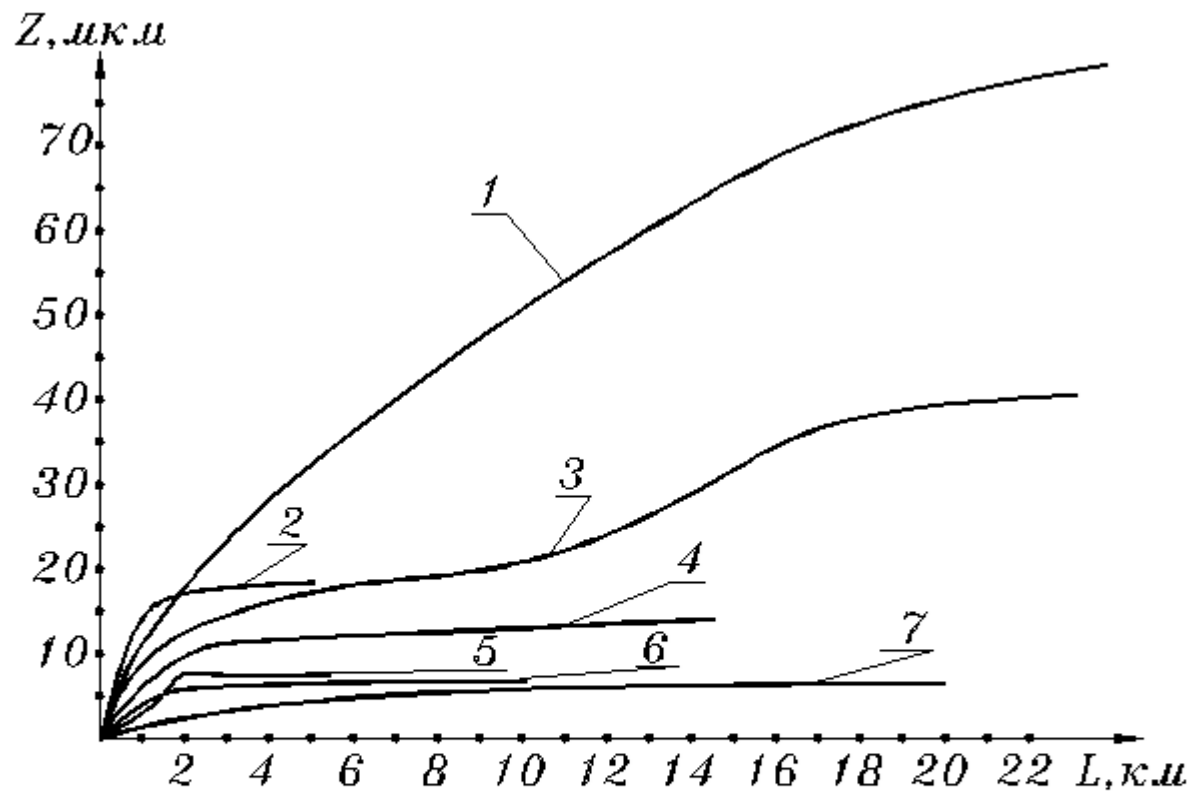


Рисунок 7 - Знос взірців зі сталі 45 азотованої в залежності від шляху при тиску в зоні контакту та швидкості ковзання: 1- 65 МПа, 0,1 м/с; 2 – 50 МПа, 0,1 м/с; 3 – 120 МПа, 0,1 м/с; 4 – 80 МПа, 0,1 м/с; 5 – 40 МПа, 0,3 м/с; 6 – 65 МПа, 0,2 м/с; 7 – 20 МПа, 0,2 м/с

## ВИСНОВКИ

Процес зношування при граничному терті фактично включає два конкуруючих процеси: ущільнення поверхневого шару зі збільшенням його мікротвердості та руйнування поверхневого шару з локальним захопленням поверхонь.

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.

Дякую за увагу!

