

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра агроінженерії

Допущено до захисту
“ ” 2025 р.
Зав. кафедри Д.Т.Н., професор
(науковий ступінь, вчене звання)
В.В. Дідур
(підпис) (ініціали, прізвище)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА (дипломний проект)

магістр
(назва освітнього ступеня)

тема роботи **«Підвищення зносостійкості підшипникових вузлів ходової частини трактора»**

Виконав: студент 2 курсу, групи 21м-ім
освітньої програми магістр
спеціальності 208 «Агроінженерія»

Танасієнко С.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н., доцент Шевчук В.В.
(науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

м. Умань – 2025 рік

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ І ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ.....	8
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	15
2.1. Дослідження зразків на тертя кочення та ковзання за допомогою експериментальної установки.....	15
2.2. Аналіз зносостійкості зразків з покриттями різного типу	22
РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ	37
3.1. Комплекс заходів із захисту працівників у виробничому середовищі.....	37
3.3. Висновки по розділу	40
РОЗДІЛ 4. ВИРОБНИЧЕ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБОК І ЇХ ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ.....	42
4.1. Технічна надійність підшипників у вузлах сільськогосподарської техніки	42
4.2. Аналіз економічної доцільності відновлення підшипникових вузлів за розробленою методикою	43
ВИСНОВКИ.....	46
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	47

РЕФЕРАТ

Танасієнко С.В. Підвищення зносостійкості підшипникових вузлів ходової частини трактора. (Дипломний проект, Уманський національний університет, 2025: пояснювальна записка на 48 сторінках, у т.ч. 4 розділів, 28 рисунки, 8 таблиць, 18 джерела літератури).

У дипломному проєкті доведено, що застосування технології нітрогартування з попереднім іонним оксіязотуванням забезпечує зменшення градієнта твердості по товщині системи «покриття–основа». Це досягається за рахунок розпаду ϵ -фази, дифузії азоту в глибину матеріалу та підвищення його твердості. Встановлено, що триботехнічні властивості, а також хімічний і фазовий склад покриттів істотно впливають на інтенсивність зношування при терті ковзання.

Результати порівняльних досліджень показали, що зразки, оброблені за розробленою технологією, мають найменшу інтенсивність зношування та найбільшу довговічність. Інтенсивність їх зношування зменшується у 2,2 раза, а довговічність майже вдвічі перевищує показники гартованих зразків зі сталі ШХ15, виготовлених традиційним способом.

Мета дослідження – підвищення зносостійкості підшипникових вузлів ходової частини трактора шляхом застосування технології нітрогартування з попереднім іонним оксіязотуванням.

Об’єкт дослідження: підшипникові вузли ходової частини трактора як елементи, що зазнають зношування у процесі експлуатації.

Предмет дослідження: закономірності зміни триботехнічних характеристик поверхонь тертя підшипникових вузлів залежно від способів та режимів їх обробки.

Ключові слова: НІТРОГАРТУВАННЯ, ХОДОВА ЧАСТИНА ТРАКТОРА, ПІДШИПНИКОВИЙ ВУЗОЛ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

ВСТУП

Зносостійкість і довговічність підшипників кочення значною мірою визначаються фізико-механічними властивостями, структурою, а також хімічним і фазовим складом поверхневих шарів. Для збільшення реальної площі контакту та зниження контактних напружень на доріжках кочення в початковий період експлуатації поверхні жолобів підшипників піддають шліфуванню, досягаючи високої якості шорсткості. Однак, як свідчать результати досліджень, мікронерівності (навіть на дуже гладких поверхнях) під час контакту з іншими деталями зазнають деформацій уже при відносно невеликих навантаженнях.

Аналітичні розрахунки взаємодії циліндрів із різною шорсткістю показали, що контактні напруження істотно залежать від стану поверхні та перевищують значення, розраховані за класичною теорією Герца. Знизити контактні напруження в зоні контакту можливо шляхом раціонального конструювання профілю поверхні жолоба кільця підшипника — зокрема, завдяки вибору оптимального радіуса поперечного перерізу канавки та формуванню її як спряження двох криволінійних поверхонь. Додаткового ефекту можна досягти оптимізацією форми робочої поверхні тіла кочення (ролика), що сприяє рівномірному розподілу контактних напружень при заданому навантаженні.

Одним із ефективних способів підвищення експлуатаційних характеристик підшипників кочення є створення на доріжках кочення регулярного мікрорельєфу у вигляді гвинтових канавок.

Метою дослідження є підвищення зносостійкості підшипникових вузлів ходової частини трактора шляхом застосування технології нітрогартування з попереднім іонним оксідотуванням.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі **завдання**:

- провести аналіз існуючих методів підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення;
- розробити експериментальну установку для вивчення процесів тертя кочення і ковзання зразків;
- здійснити дослідження зносостійкості зміцнених зразків із різними типами покриттів.

Об’єкт дослідження – процеси, що відбуваються під час зношування підшипникових вузлів у ходовій частині трактора.

Предмет дослідження – закономірності зміни триботехнічних властивостей поверхонь тертя підшипникових вузлів залежно від методів та режимів їх зміцнювальної обробки.

Методи дослідження. Роботу виконано із застосуванням теоретичних і експериментальних методів механіки, трибології та прикладної фізики. Аналіз і статистичну обробку експериментальних даних проведено за допомогою математичних методів та спеціалізованого програмного забезпечення.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути використані під час виробництва, модернізації та ремонту підшипникових вузлів ходової частини тракторів для підвищення їхньої надійності, зносостійкості та терміну служби.

РОЗДІЛ 1.

МЕТОДИ ЗБІЛЬШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ І ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

Зносостійкість і тривалість служби підшипників кочення значною мірою визначаються фізико-механічними характеристиками, структурою та хімічно-фазовим складом їхніх поверхневих шарів. Щоб збільшити реальну площу контакту та знизити контактні напруження на доріжках кочення в початковий період експлуатації, поверхні жолобів підшипників піддають шліфуванню, забезпечуючи високий клас шорсткості [1–17]. Однак дослідження [6–8] показали, що навіть на дуже гладких поверхнях мікро виступи під навантаженням легко деформуються.

Розрахунки [14] контакту циліндрів із різним рівнем шорсткості вказали, що контактні напруження прямо залежать від стану поверхні і перевищують значення, отримані за теорією Герца. Зниження контактних напружень у зоні контакту можна досягти шляхом раціонального проектування профілю жолоба кільця підшипника: вибору оптимального радіуса поперечного перерізу канавки та формування жолоба як спряження двох криволінійних поверхонь [90], а також оптимізацією профілю ролика, що дозволяє рівномірно розподілити робочі напруження [12].

Ще одним ефективним способом підвищення експлуатаційних характеристик підшипників є формування на доріжках кочення регулярного мікрорельєфу у вигляді гвинтових канавок [16]. Цей рельєф отримують під час шліфування та суперфінішування жолобів. Методика, розроблена в Саратовському державному технічному університеті, дозволяє отримувати мікрорельєф із різними геометричними параметрами, що впливають на фактичну площу контакту тіл кочення та доріжок [16].

Однією з ключових характеристик контактної поверхні, що суттєво визначає зносостійкість та довговічність підшипників, є твердість доріжки кочення.

Було проведено дослідження підшипників кочення з різними значеннями твердості доріжки, яка змінювалася в діапазоні від 39 до 64 HRC [9] та від 180 до 1280 HV [8]. Результати показали, що межа контактної втоми підвищується зі збільшенням твердості поверхні. Зокрема, при підвищенні твердості доріжки кочення від 39 до 64 HRC кількість мікровпадин на 1 мм² зменшилася з 130 до 40 [7]. На відпалених та покращених зразках із сталі S45C (HV 180–333) руйнування починалося з формування пітингів; на зразках тієї ж сталі після гартування та низького відпуску (HV 360–755) — з пітингів з подальшим відшаруванням; у випадку цементованих зразків із сталі SNC21 та азотованих зразків із сталі SAMC1 (HV 500–1280) руйнування відбувалося виключно через відшарування.

У роботах [8, 14] показано, що лазерна обробка поверхні підшипників кочення сприяє підвищенню контактної витривалості та зносостійкості матеріалу. Зносостійкість сталі 9X після лазерного опромінювання з оплавленням збільшується пропорційно потужності лазерного променя. Максимальний опір контактній втомі для цієї сталі досягається при оптимальному поєднанні потужності та швидкості переміщення лазера [14]. Тривалість служби підшипників після лазерного опромінювання з оплавленням також зростає із збільшенням потужності променя. Довговічність сталі 9X під циклічним контактним навантаженням корелює з параметром $z^3 \cdot H$, де z — товщина, а H — мікротвердість шару, отриманого лазерним гартуванням. При значенні $z^3 H \geq 20$ мДж контактної-втомної ресурс після лазерного гартування перевищує ресурс, отриманий стандартною термообробкою [14].

У роботі [15] відзначено, що дробоструминна обробка поверхні підшипників кочення позитивно впливає на їхню довговічність і демонструє перспективність застосування цього методу.

Підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення може бути досягнуто шляхом нанесення покриттів на доріжку кочення. У дослідженнях [10] вивчалися ділянки зношування підшипників, що проявлялися появою блискучих зон на доріжці кочення. Таке зношування виникало через контактну втому навіть після короткочасної роботи підшипника (від 10 хвилин до 2 годин). Порівняльні дослідження [10] включали аналіз доріжок кочення та тіл кочення після традиційної обробки, після нанесення покриттів TiN , MoS_2 та Ag методом осадження з парової фази, а також доріжок, які після шліфування пройшли термічну обробку у вакуумі. Топографію доріжки кочення досліджували за допомогою електронного мікроскопа. Встановлено, що покриття TiN гальмує розвиток тріщин під час експлуатації завдяки високій твердості та зносостійкості, проте при контакті з непокритими тілами кочення відбувається інтенсивне зношування останніх. Покриття MoS_2 забезпечує хороші антифрикційні властивості та високу зносостійкість, при цьому блискучі зони втоми не спостерігалися. Термообробка у вакуумі дозволяє усунути дефектні шари, що утворюються під час шліфування, підвищує твердість та зносостійкість доріжки кочення й зменшує деформації порівняно з гартуванням у захисному середовищі після нагріву.

Дослідження [13] показали, що контактна витривалість підшипникової сталі М50 під коченням значно підвищується при нанесенні покриттів TiN методом осадження у вакуумі з одночасною іонною імплантацією іонів азоту. У розбавленому розчині $NaCl$ довговічність сталі з покриттям товщиною 1 мкм була у 4 рази більшою, ніж у сталі без покриття. Менші товщини покриття призводили до його швидкого руйнування. Було відзначено високу адгезію покриття до основи. Автори пояснюють підвищення довговічності підшипників уповільненням процесу мікрОВикришування завдяки частинкам, які проникли у поверхневий шар сталі.

У дослідженні [2], присвяченому контактній втомі сталей $P6M5$ і $20XH3A$ з нанесеними покриттями TiN в умовах тертя кочення у середовищі

проточної води, встановлено, що використання тонких покриттів TiN підвищує контактну витривалість цих матеріалів. Це спостерігається за умови відсутності суттєвих пластичних деформацій основного матеріалу. Зокрема, довговічність сталі $20XH3A$ в умовах експлуатації у проточній воді зросла в 1,7–2,5 рази після проведення хіміко-термічної обробки з подальшим нанесенням покриття TiN методом магнетронного розпилення. Таке підвищення довговічності пояснюється ефективним гальмуванням утворення та розвитку втомних тріщин завдяки зносостійким і корозійно-стійким властивостям нанесених покриттів.

За допомогою електронної мікроскопії було досліджено контактну втому під час кочення покриттів із нітриду титану та міді, нанесених на основі підшипникових сталей. Вплив на їх властивості аналізувався залежно від морфології, товщини, мікроструктури та хімічного складу плівок, які були отримані методами електролітичного наплення та іонної металізації. Товщина покриттів варіювала від 2000 Å до 2 мкм. Експерименти виконувались на випробувальній машині для визначення контактної втоми при частоті навантаження 60 Гц, використовуючи мастило, за умов контактних напружень 5,42 і 4,04 ГПа. Виявлено, що покриття з чистої міді впливають на контактну витривалість сталі неоднозначно: залежно від її марки, витривалість може бути як вищою, так і нижчою порівняно з випробуваннями без покриття. У той же час покриття на основі нітриду титану забезпечували покращення зносостійкості незалежно від марки сталі при контактному напруженні 5,42 ГПа.

Аналіз літератури показує, що застосування еластичних покриттів сприяє редукції пікових значень контактних напружень [14], а також суттєво нівелює вплив зовнішніх тангенціальних сил на розподіл Герцівських напружень [13]. Експериментально встановлено, що зразки зі сталі $ШХ15$ з нанесеними м'якими покриттями не демонструють ознак контактної втоми навіть після тривалого циклічного навантаження ($42 \cdot 10^6$ циклів), у той час як зразки без покриттів виявляють тріщини вже після $9 \cdot 10^6$ циклів [1]. Підвищення

терміну служби підшипників кочення також досягається шляхом модифікації їх поверхні фрикційно-хімічними композиційними покриттями на основі міді [8]. Збільшення довговічності пояснюється розширенням площі фактичного контакту та зменшенням навантаження на найбільш навантажені тіла кочення завдяки наявності тонкої пластичної плівки на основі міді. Застосування металомістких присадок до мастильних матеріалів під час випробувань сталей на контактну витривалість (двороликова машина, контактні напруження до 60 МПа) призводить до двократного збільшення кількості циклів до руйнування [3].

Суттєве поліпшення зносостійкості та довговічності підшипників кочення забезпечується за допомогою методів хіміко-термічної обробки [9]. Зокрема, дифузійне хромування підшипників кочення зі сталей *ШХ15* і *95Х18* за стандартними режимами (850-1100°C, 1-9 годин) підвищує їх стійкість до зношування та корозії [8], зберігаючи працездатність у всьому діапазоні навантажень, передбачених для цих підшипників. Встановлено кореляцію між залишковими напруженнями, роботою виходу електронів та відносною зносостійкістю підшипників.

В окремих наукових працях [16, 17] досліджувався вплив іонної цементації, газової цементації та нітроцементації сталей *20CrMnTi*, *20CrMnMo* на їх контактну витривалість з використанням методу Вейбулла. Результати показали, що сталь *20CrMnMo* після іонної цементації демонструє найвищі показники зносостійкості та витривалості. Сприятливий вплив на збільшення контактної витривалості чинять залишкові напруження стиску, що утворюються в процесі хіміко-термічної обробки. Відзначається [16], що у випадку надмірної концентрації азоту при нітроцементації, він дифундує на значну глибину, а залишкові аустеніт і напруження стиску синергічно підвищують контактну витривалість сталі.

Результати досліджень контактної витривалості різних сталей після різних методів азотування (традиційне азотування, м'яке азотування та іонне

азотування в середовищі аміаку з домішками природного газу) представлені в роботах [6, 13, 15, 18]. Усі автори підкреслюють значне зростання зносостійкості та контактної витривалості металів після азотування. Зокрема, азотування поверхні сталі 45 за традиційною технологією [133] дозволяє збільшити твердість, контактну міцність і циклічну витривалість майже вдвічі порівняно з неазотованою сталлю. У легованих сталях *30CrMoV9* і *42CrMo* після азотування контактна міцність збільшилася в 1,5-1,7 рази, а контактна витривалість до руйнування – в 2-3 рази.

Вивчався також вплив м'якого азотування сталі (в %) $0,42\text{C} \cdot 0,35\text{Cr} \cdot 0,3\text{Ni}$ на контактну витривалість при коченні циліндричних зразків по ролику із сталі 0,45 % С в середовищі мастила Теллус 15 [15]. В ході досліджень контактні напруження варіювалися від 60 до 160 кГс/мм². Встановлено, що м'яке азотування збільшує межу витривалості в 2,7 рази. Втрати металу залишаються незначними навіть при високих рівнях контактних напружень. За допомогою методу мікротвердості було показано, що деформаційне зміцнення, характерне для неазотованих зразків, відсутнє після м'якого азотування. Поверхневий шар зміцненого металу зберігає первісну пластичність, що сприяє збільшенню контактної витривалості під час кочення.

У роботі [15] проводилися дослідження зносостійкості зразків із легованої сталі En40B (хімічний склад, %: $\text{C}0,23 \cdot \text{Si}0,08 \cdot \text{Mn}0,52 \cdot \text{Ni}0,8 \cdot \text{Cr}3,21 \cdot \text{Mo}0,5 \cdot \text{Al}0,03 \cdot \text{V}0,02 \cdot \text{S}0,014 \cdot \text{P}0,006$), які були зміцнені методом іонного азотування за різних режимів — при температурах 420–500 °С у середовищі аміаку протягом 2,5–35 годин. Випробування виконувалися при терті кочення з проковзуванням без мастила на машині «Амстер» під навантаженням 200 кг. У результаті встановлено суттєве підвищення зносостійкості азотованих зразків і значний вплив режимів азотування на цей показник. Найвищу зносостійкість продемонстрували зразки з найбільшою глибиною азотованого шару. Авторами запропоновано модель, що описує вплив коефіцієнта тертя на виникнення зсувної деформації під час

контакту в процесі зношування. Виявлено складний характер дії залишкових напружень стиску на положення максимуму дотичних напружень, які формуються при коченні з проковзуванням.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Дослідження зразків на тертя кочення та ковзання за допомогою експериментальної установки

Експериментальна установка на базі свердлильного верстата була виготовлена для порівняльних випробувань зразків на зношування під час тертя кочення і ковзання, загальний вигляд якої наведено на рис. 2.1.

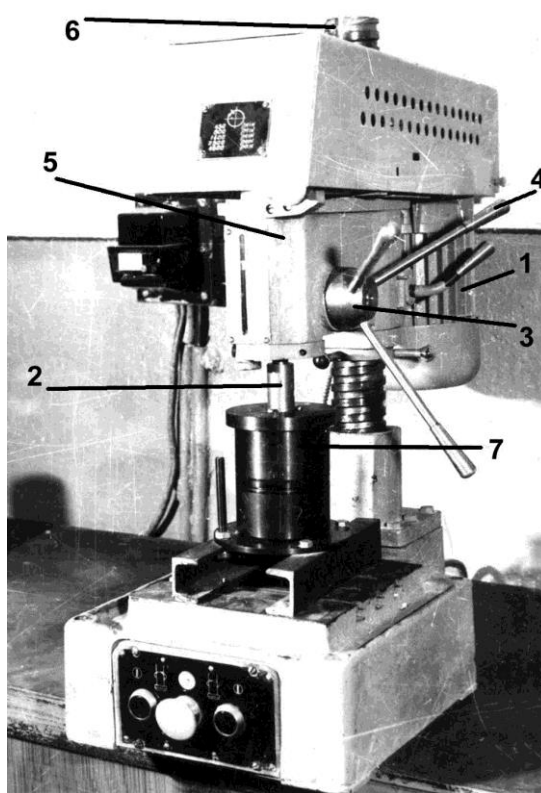


Рис. 2.1. Фотографія експериментальної установки для дослідження:

1 – електродвигун; 2 – шпиндель верстата; 3 – вал-шестерня; 4 – державка; 5 – бабка; 6 – колона; 7 – трибовузол.

Установка включає трибовузол, який приводиться в дію через свердлильний верстат. До складу верстата входять: електродвигун змінного струму АОА-211-4СО потужністю 0,6 кВт із частотою обертання валу 1350 об/хв; чотириступенева клиноремінна передача; шпиндельний вузол 2, який переміщується в шпиндельній бабці 5 за допомогою рейкової передачі при

обертанні вала-шестерні з маточиною 3 під впливом зовнішньої сили на державку 4.

З'єднання шпинделя з трибовузлом здійснюється через конусну систему Морзе. Вантаж, підвішений до державки 4, створює нормальне навантаження на пару тертя, при цьому довжина державки регулюється за потребою.

Конструкція трибовузла, представлена на рис. 3.2, має універсальний характер.

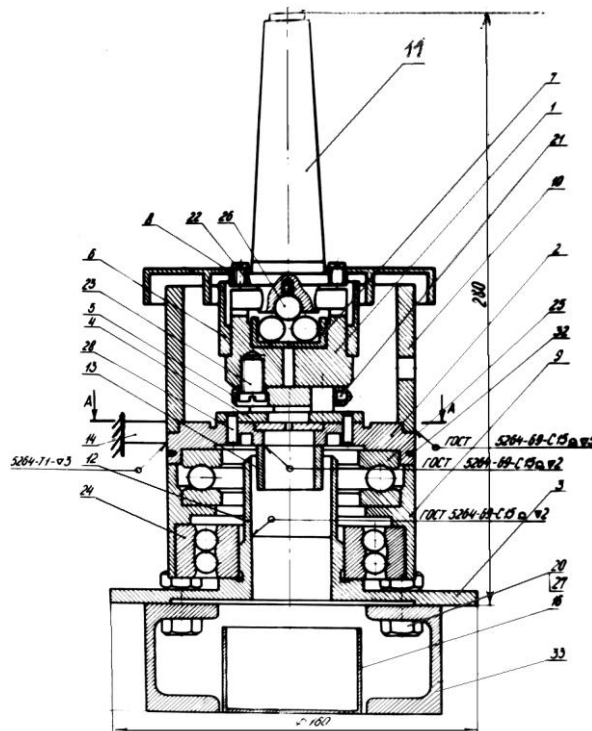


Рис. 2.2. Конструктивна схема трибовузла

Схема установки для досліджень тертя кочення представлена на рис. 2.3. На ній відтворювалась робота упорного підшипника кочення. Зразок 4 (див. рис. 3-б) кріпився гвинтом 5 в обойму 3 та контактував з кульками 9, що утримувалися сепаратором стандартного підшипника № 8204. Кульки перекочувалися по направляючому жолобу кільця 8, встановленого на нерухомій плиті 6. Обертання зразка 4 разом з обоймою 3 забезпечувалося шпинделем свердлильного верстата.

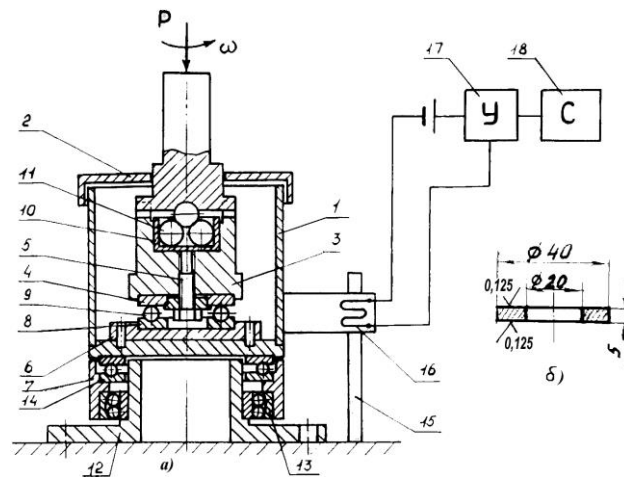


Рис. 2.3. Схема експериментальної установки для випробувань тертя ковзання:

1 – верхній корпус; 2 – кришка корпуса; 3 – обойма; 4 – зразок для дослідження; 5 – гвинт; 6 – нерухома плита; 7 – нижній корпус; 8 – нерухоме кільце упорного підшипника; 9 – кулька підшипника; 10 – стакан; 11 – кульки опори; 12 – основа; 13 – сферичний підшипник; 14 – упорний підшипник; 15 – опора; 16 – пластина з тензодатчиком; 17 – підсилювач; 18 – самописець КСП-2.

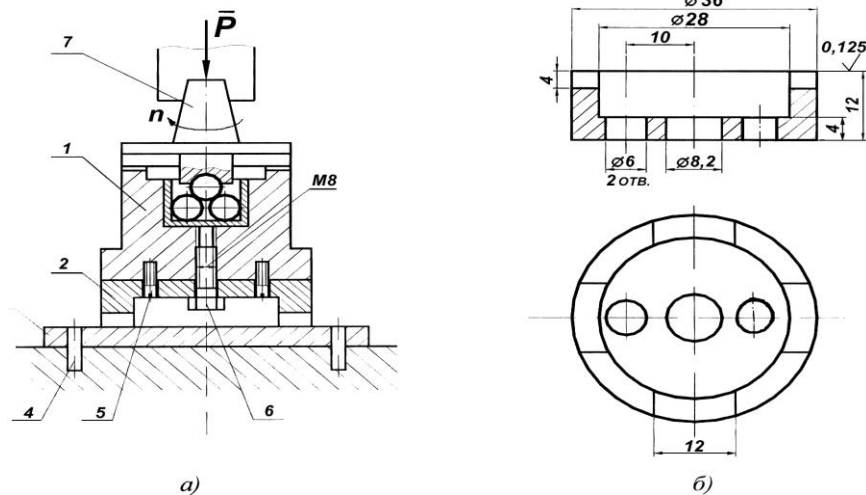


Рис. 2.4. Схема кріплення та конструкція зразка для випробувань на тертя ковзання:

1 – корпус; 2 – зразок; 3 – контртіло; 4 – штифтове з'єднання; 5 – шпилька; 6 – гвинт; 7 – хвостовик.

На рис. 2.4 зображена схема кріплення зразків у вузлі тертя під час випробувань на тертя ковзання. Навантаження та вимірювання моменту сил

тертя проводилися аналогічно випробуванням на тертя кочення. Розміщення оправки на площині може викликати значні похибки через нерівність і шорсткість установчої поверхні. Щоб зменшити ці похибки, в конструкції передбачено осьове закріплення оправки за допомогою фіксатора 14 та кутове – за допомогою фіксатора 7. Опорна площа оправки виконана перервною, залишаючи середню частину базової поверхні, а базові поверхні оправки та основи 11 були ретельно прошліфовані. Постійне зусилля прижиму оправки до базової поверхні створюється пружиною 15. Вимірювач та фіксатори закріплені на жорсткому цільному корпусі 4, який гвинтами кріпиться до основи 11. Для зняття оправки з зразками фіксатор 7 відводиться за допомогою рукоятки 1, осьове переміщення якої обмежене упором 2.

Для визначення величини зносу на певний момент часу використовувалося середнє арифметичне з 12 точок, рівномірно розташованих по доріжці кочення. Кожен експеримент повторювався тричі, що дозволяло підвищити точність отриманих даних. У початковий період випробувань, який відповідає періоду припрацювання, вимірювання проводили через 1, 2, 5 та 10 хвилин, а після виходу зразка на стабільний режим зношування – через кожні 10 хвилин.

Для аналізу процесу зношування та руйнування поверхні доріжки кочення застосовувався растровий мікроскоп РЕМ 101-М, що забезпечував високу точність спостережень та дозволяв вивчати мікроструктурні зміни поверхні після тертя.

Всі досліді на тертя кочення та ковзання виконувалися в масляному середовищі марки І-20, що забезпечувало стабільні умови змазування. Частота обертання зразка при випробуваннях на кочення складала 750 об/хв. Діаметр кульок, що контактували із зразком, становив 7,14 мм, а їх кількість у сепараторі дорівнювала 12. Кульки виготовлені зі сталі ШХ15 і мали твердість HRC 61–62. Колова швидкість центрів кульок становила 1,24 м/с, що відповідало реальним умовам роботи підшипника.

Вертикальне навантаження, що діяло на зразок, приймалося у діапазоні 500; 1000; 1600; 1800; 2500 та 3600 Н. Це відповідало навантаженню на одну кульку 41,7; 83,3; 133,3; 150; 208,3 та 300 Н та максимальному тиску в центрі контакту 2075; 2615; 3057; 3180; 3532 та 4008 МПа відповідно. Зразки з м'якою основою ($HRC < 45$), які не проходили гартування, тестували при навантаженні на кульку до 250 Н, а загартовані зразки – при навантаженні 300 Н.

Такий підхід дозволяє отримати достовірні та відтворювані дані про процес зношування підшипникових вузлів та вплив різних параметрів випробувань на контактну витривалість і довговічність матеріалу. Аналіз зібраних даних на основі середніх значень, трьохкратного повторення дослідів та високоточних мікроскопічних досліджень забезпечує наукову обґрунтованість результатів і можливість їх використання для оптимізації технологій зміцнення поверхонь та підвищення ресурсу підшипників.

Дослідження були спрямовані на вивчення процесів зношування до появи пітингу на доріжці кочення. Під час експериментів визначалися величини зносу та мікротвердість тертьових поверхонь, а також виконувалися детальні металографічні, рентгеноструктурні і фрактографічні дослідження зношених ділянок, що дозволяло оцінити структурні та фазові зміни матеріалу. Випробування на тертя ковзання проводилися при сталих параметрах швидкості ковзання 1,24 м/с та коефіцієнта перекриття 0,5. Тиск на поверхню тертя змінювався у широкому діапазоні від 2 до 30 МПа для вивчення впливу навантаження та несучої здатності поверхні при різних властивостях і покриттях. Після початкового припрацювання при тиску 2 МПа навантаження поступово збільшували через кожні 10^3 м пробігу до моменту повного схватування контактуючих поверхонь. Контртіло, яке взаємодіяло з досліджуваними зразками, виготовлялося зі сталі 45 і проходило загартування по всьому об'єму до HRC 45, забезпечуючи стабільність механічних властивостей у всіх дослідях. Вимірювання зносу здійснювалися за допомогою

приладу з індикатором часового типу з точністю 0,5 мкм, що гарантувало високу достовірність та відтворюваність отриманих даних.

Такий комплексний підхід дозволив оцінити вплив різних факторів – тиску, властивостей поверхні та покриттів – на контактну витривалість та довговічність підшипників, а також забезпечив науково обґрунтовані дані для оптимізації технологій зміцнення тертьових поверхонь.

Для підвищення зносостійкості поверхневих шарів машинних деталей використовують зміцнювальні покриття, які формують методами осадження, а також дифузійні покриття, отримані шляхом хіміко-термічної обробки.

У ході наших експериментів досліджувалися такі види покриттів:

- нітрид титану, нанесений методом фізичного осадження у вакуумі;
- хром, отриманий гальванічним осадженням;
- дифузійні покриття, сформовані в плазмі тліючого розряду за допомогою іонного азотування та оксіазотування.

Для оцінки впливу властивостей основи — твердості та структури матеріалу під покриттям, а також градієнта зміни характеристик від поверхні вглиб — на їх контактну зносостійкість проводили термічну обробку зразків (гартування та відпуск) до і після хіміко-термічного зміцнення, а також перед нанесенням покриттів методами осадження.

Нанесення нітриду титану на поверхню дослідних зразків виконували на серійній установці ННВ-6,6-И1 (рис. 2.5). Процес передбачав попередню іонну очистку у середовищі аргону при напрузі 1200 В на зразку, силі дугового струму 75 АП, струмі на стабілізуючій котушці 0,8 А, струмі на фокусуючій котушці 0,2 А та вакуумі $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па. Іонна очистка тривала до досягнення температури зразка 500 °С. Після цього проводилося напилення у середовищі особливо чистого азоту (99,99% N₂) при опорній напрузі 250 В, силі дугового струму 90 А та вакуумі $5,5 \cdot 10^{-1}$ Па. Тривалість процедури становила 15 хвилин, в результаті чого на зразках утворювався нітридний шар товщиною 5 мкм.

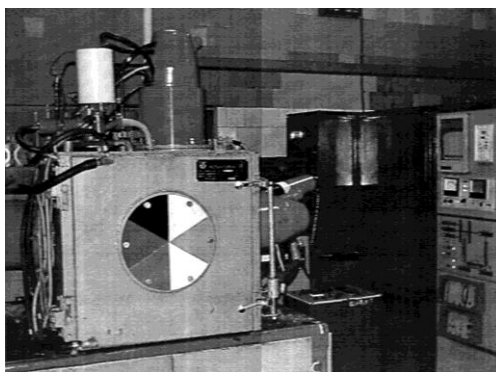


Рис. 2.5. Серійна установка ННВ–6,6–ІІ

Покриття хрому наносили на зразки методом гальванічного осадження у розведеному сульфатному електроліті (150 г/л хромового ангідриду та 1,5 г/л сірчаної кислоти) при температурі 56 °С і катодній щільності струму 35 А/дм². Після хромування зразки піддавали термічній обробці в печі при 200 °С протягом 2 годин.

Іонне азотування та оксіязотування виконували на експериментальній установці “УАТР-1”, призначеній для хіміко-термічної обробки конструктивних елементів, загальний вигляд якої показано на рис. 2.6. Установка розроблена та виготовлена в Поліському національному університеті. Принципова схема роботи пристрою представлена на рис. 2.7.

До складу установки входять розрядна камера, система вакуумування, газопостачання, енергозабезпечення та контрольно-вимірювальні прилади.

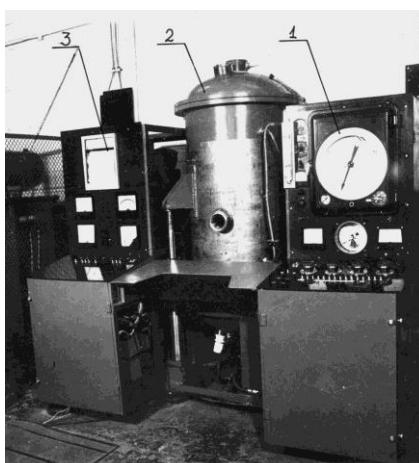


Рис. 2.7. Пристрій для хіміко-термічної обробки залізовуглецевих сплавів:

1 – блок вакуумування; 2 – розрядна камера з вакуумом; 3 – система електроживлення.

Застосування тліючого розряду значно прискорює дифузійне збагачення поверхні азотом, нітридами заліза та легуючими елементами. Під час оксіязотування після утворення азотованого шару в насичуюче середовище вводився кисень, і процес дифузії продовжувався ще 15–30 хвилин за тих самих температури та тиску, що й під час азотування. Внаслідок цього на поверхні формувалися тонкі оксидні шари з меншою твердістю, але з підвищеною пластичністю порівняно з нітридним шаром.

2.2. Аналіз зносостійкості зразків з покриттями різного типу

У таблиці 2.1 представлені результати випробувань зразків із сталі ШХ15 на тертя ковзання та кочення в маслі І-20 після проведення іонного азотування та нітрогартування за різними режимами відповідно до плану Хартлі. На основі статистичної обробки отриманих даних визначено математичні залежності трибологічних характеристик (інтенсивності зношування та коефіцієнта тертя) при терті кочення і ковзання цієї сталі, зміцненої зазначеними технологіями, від технологічних параметрів процесу іонного азотування.

Результати показують, що режими іонного азотування та нітрогартування суттєво впливають на трибологічні характеристики сталі ШХ15. Найменші значення швидкості зношування та коефіцієнта тертя спостерігаються при оптимальних режимах обробки, що свідчить про підвищення зносостійкості і зменшення тертя. Водночас деякі режими призводять до збільшення інтенсивності зношування, особливо при коченому терті, що вказує на необхідність ретельного вибору технологічних параметрів для досягнення максимального ресурсу деталі. Загалом, дані підтверджують ефективність комбінованої термічної та іонно-хімічної обробки для поліпшення експлуатаційних характеристик підшипникових сталей.

Таким чином, аналіз таблиці дозволяє зробити висновок, що правильне поєднання параметрів азотування і нітрогартування дозволяє істотно підвищити довговічність і надійність підшипників у реальних умовах експлуатації.

Таблиця 2.1

Трибологічні показники сталі ШХ15 при терті кочення і ковзання в маслі І-20 після іонного азотування та нітрогартування за різними режимами відповідно до плану Хартлі

№ режиму азотування	Азотування після гартування			Нітрогартування, час витримки 7 хв.
	Ковзне тертя		Кочене тертя	
	Швидкість зношування, $I \cdot 10^{-9}$	Коефіцієнт тертя f	Швидкість зношування, $I \cdot 10^{-11}$	Швидкість зношування, $I \cdot 10^{-11}$
1	0,286	0,183	9,080	0,470
2	0,349	0,164	14,424	0,750
3	1,117	0,108	8,564	0,550
4	1,052	0,095	17,139	0,860
5	1,357	0,100	17,280	0,810
6	1,280	0,083	22,291	1,100
7	0,326	0,245	10,788	0,760
8	0,401	0,229	19,697	1,020
9	0,467	0,137	16,959	1,184
10	0,468	0,161	6,525	0,614
11	0,86	0,177	14,013	0,644
12	1,021	0,115	16,966	0,884
13	0,400	0,141	11,777	0,864
14	0,400	0,141	11,777	0,384
15	1,888	0,051	22,098	0,964
16	0,166	0,269	16,456	0,784
17	0,400	0,141	11,777	0,520
18	0,400	0,141	11,777	0,520
19	0,400	0,141	11,777	0,520
20	0,400	0,141	11,777	0,520

Математичне вираження для розрахунку зносостійкості покриття:

$$\varphi(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \\ + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4. \quad (2.1)$$

Коефіцієнти регресії представлені в табл. 2.2.

На рис. 2.8 показано графічну залежність інтенсивності зношування сталі

ШХ15 після іонного азотування та нітрогартування від технологічних параметрів процесу. Як видно з графіків, технологічні параметри істотно впливають на величину інтенсивності зношування. Залежно від їх поєднання значення інтенсивності може змінюватися більш ніж у десять разів. Під час іонного азотування сталі (рис. 2.8) інтенсивність зношування зменшується зі збільшенням температури та тривалості процесу.

Таблиця 2.2

Коефіцієнти рівнянь регресії (2.8), що описують залежності трибологічних характеристик сталі ШХ15 при терті кочення і ковзання в маслі І-20 після іонного азотування і нітрогартування за різними режимами.

Коефі- цієнти регресії	Азотування після гартування			Нітрогартування, час витримки 7 хв.
	Ковзне тертя		Кочене тертя	
	Швидкість зношування, $I \cdot 10^{-9}$	Коефіцієнт тертя f	Швидкість зношування, $I \cdot 10^{-9}$	Коефіцієнт тертя f
β_0	0,705	0,075	16,0	0,520
β_1	-0,171	-0,0125	-2,8	-0,285
β_2	-0,028	0,008	-1,8	0,120
β_3	0,085	0,020	-5,0	-0,240
β_4	-0,780	0,028	-5,3	-0,090
β_{11}	0,271	0,031	-0,14	0,379
β_{22}	0,962	0,009	6,6	0,244
β_{33}	-0,209	0,028	3,8	0,104
β_{44}	0,627	0,019	7,5	0,354
β_{12}	0,021	0,007	6,1	0,005
β_{13}	0,090	0,029	-5,3	-0,020
β_{14}	-0,210	0,083	-0,5	0,030
β_{23}	1,825	-0,044	7,7	0,020
β_{24}	-0,320	-0,062	-11,9	-0,050
β_{34}	-0,156	0,051	-1,9	-0,270

З таблиці 2.2 видно, що коефіцієнти регресії для ковзного та коченового тертя відрізняються за величиною та знаком, що свідчить про різний вплив технологічних параметрів іонного азотування та нітрогартування на зносостійкість і тертя сталі *ШХ15*. Для ковзного тертя основний вплив на швидкість зношування мають лінійні та квадратичні коефіцієнти

Аналіз графіків на рис. 2.8 показує, що мінімальні значення інтенсивності зношування досягаються при температурі $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, вакуумному тиску $P = 80\text{--}240\text{ Па}$, концентрації аргону в азотно-аргоновій суміші $Ar = 38\text{--}57\text{ об.}\%$ та часі дифузійного насичення $\tau = 240\text{ хв}$. Вплив тиску та вмісту аргону носить екстремальний характер, що свідчить про наявність оптимального поєднання цих параметрів, яке забезпечує мінімальні значення зношування. Це обумовлено тим, що зазначені параметри визначають не лише товщину утворюваного дифузійного шару, а й формування фазового складу поверхні азотованого шару, що впливає на його пластичність. Зокрема, пластичність зростає при збільшенні концентрації аргону та зменшенні тиску в камері, що сприяє кращому поглинанню деформацій і сповільненню процесу зношування. Отже, максимальна зносостійкість матеріалу досягається при оптимальному балансі твердості та пластичності азотованого шару, що є ключовим чинником підвищення тривалості служби оброблених зразків.

Графіки на рис. 2.8 демонструють, що інтенсивність зношування нітрогартованих зразків із сталі *ШХ15* при терті кочення в маслі *I-20* зменшується зі збільшенням часу іонного азотування, досягаючи мінімуму при $\tau = 240\text{ хв}$. Залежності від температури, тиску в вакуумній камері та вмісту аргону мають екстремальний характер із чітко вираженими мінімумами, що вказує на існування оптимальної ділянки технологічних параметрів.

Оптимальні умови, при яких забезпечується найменша інтенсивність зношування:

- температура $T = 560\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- тиск в вакуумній камері $P = 80\text{--}240\text{ Па}$;
- вміст аргону $Ar = 38\text{--}57\text{ об.}\%$;
- час дифузійного насичення $\tau = 240\text{ хв}$.

Це підтверджує, що контроль технологічних параметрів іонного азотування та нітрогартування дозволяє значно підвищити зносостійкість поверхні сталі *ШХ15*.

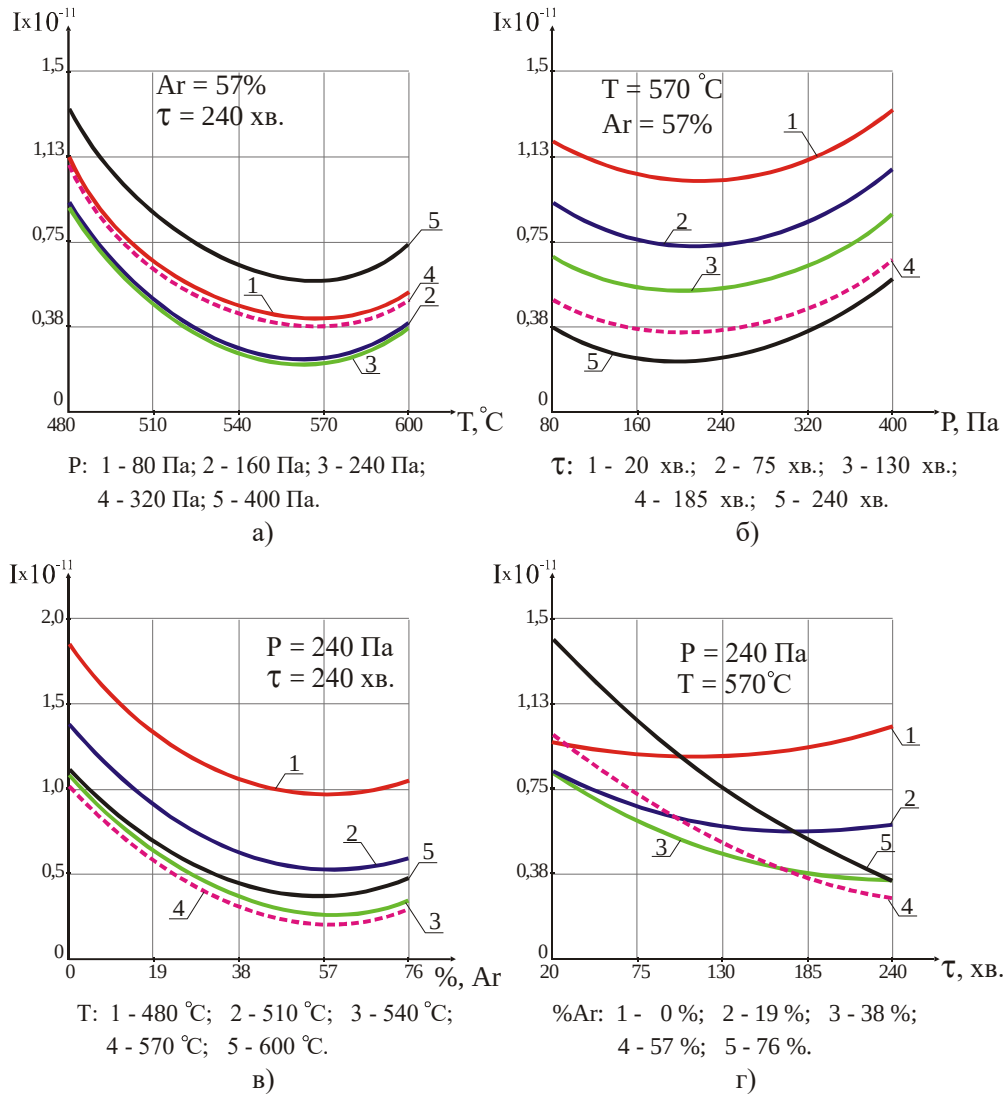


Рис. 2.8. Графік залежності інтенсивності зношування нітрогатованих зразків сталі ШХ15 у маслі І-20 від технологічних параметрів іонного азотування в безводневому азотно-аргонному середовищі при терті кочення

За оптимальних технологічних параметрів іонного азотування та нітрогартування сталі ШХ15 отримано такі фізико-механічні характеристики та фазовий склад поверхневого шару:

- товщина азотованого шару — 250–300 мкм;
- мікротвердість поверхні — 7600 МПа;
- фазовий склад: 0–40% ε -фази, 50–60% γ' -фази та 10–40% αN -фази.

Ці показники забезпечують високий рівень зносостійкості та оптимальне співвідношення твердості й пластичності поверхневого шару.

Для проведення порівняльних досліджень зносостійкості покриттів, нанесених різними технологіями на сталях із різною твердістю основи, були обрані режими іонного азотування з оптимальної ділянки технологічних параметрів, які забезпечують найкращі властивості покриття за показником зносостійкості.

На рис. 2.9 представлені графіки залежності трибологічних характеристик сталі *ШХ15* після іонного азотування і нітрогартування при терті ковзання та кочення від змін одного з технологічних параметрів режиму за умови фіксованих значень інших параметрів. Оскільки обраний режим належить до ділянки оптимальних параметрів, визначеної на основі графіків рис. 2.8, залежності на рис. 2.9 дозволяють наочно оцінити значущість кожного технологічного фактору іонного азотування та його вплив на трибологічні властивості сталі *ШХ15* при терті кочення і ковзання.

Під час тертя ковзання азотованої сталі найбільший вплив на процес зношування та інтенсивність зносу мають технологічні параметри — тиск у вакуумній камері та вміст аргону в насичуючому середовищі. Саме вони визначають фазовий склад поверхневого азотованого шару, від якого безпосередньо залежать трибологічні властивості матеріалу. Натомість температура та тривалість дифузійного насичення чинять значно менший вплив на інтенсивність зношування, оскільки при терті ковзання процес руйнування відбувається переважно у тонкому приповерхневому шарі. У цьому шарі фазовий склад має вирішальне значення для формування вторинних структур, тоді як температура і час насичення лише незначно впливають на його формування під час іонного азотування.

На рисунках 2.10, 2.11 і 2.12 подано графіки, що ілюструють залежність зношування та мікротвердості доріжок кочення від кількості циклів навантаження для зразків зі сталей *20Х13*, *45* і *ШХ15* — як без покриттів, так і з дифузійними покриттями, отриманими шляхом іонного азотування (за режимами 1а і 2а) та іонного оксіазотування. Випробування проводилися в

умовах тертя кочення, що дозволило оцінити вплив різних типів покриттів на зносостійкість і стабільність мікротвердості поверхневих шарів.

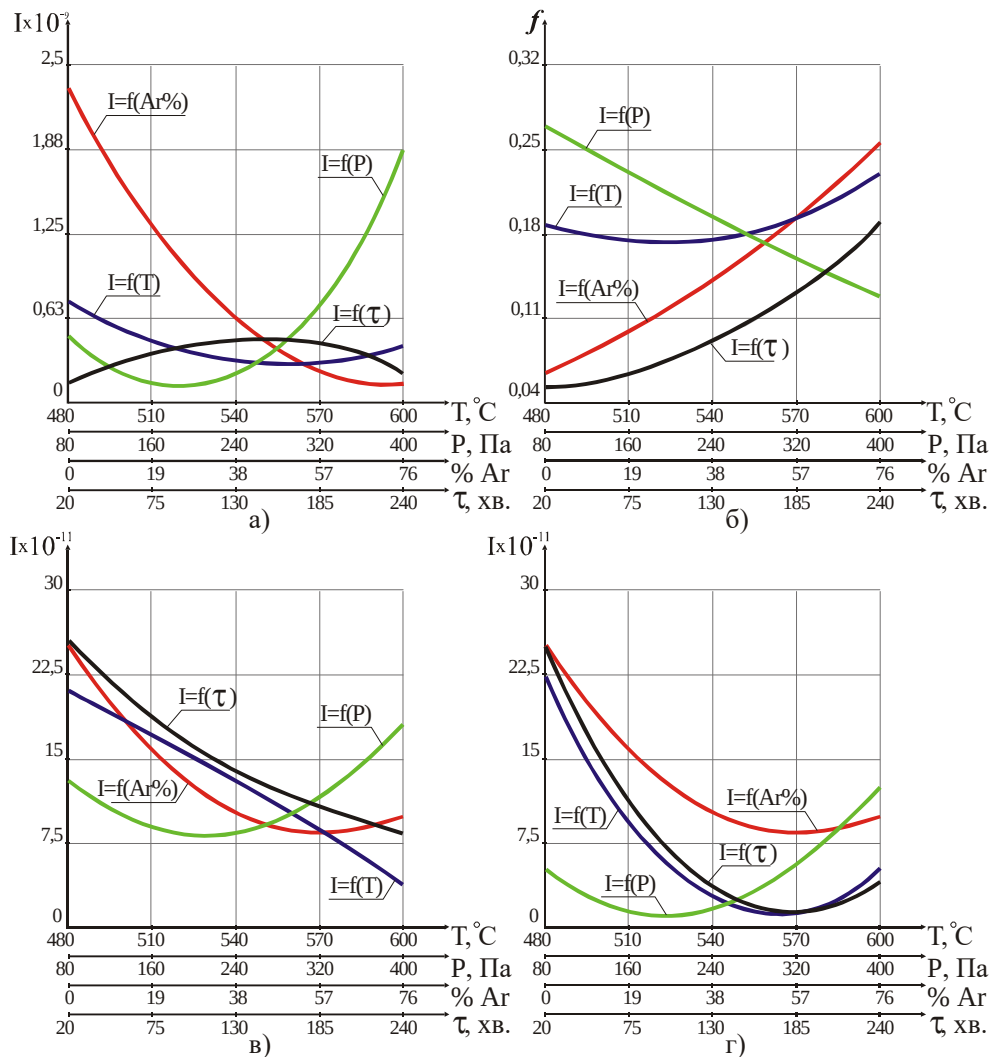


Рис. 2.9. Вплив технологічних параметрів іонного азотування на інтенсивність зношування (I) та коефіцієнт тертя (f) сталі 30X15 в маслі І-20 після обробки азотуванням (а, б, в) та нітроцементациєю (г)

Дослідження проводилися при сталих значеннях інших параметрів процесу ($T = 570^\circ\text{C}$, $P = 240$ Па, $Ar = 57$ об.%, $\tau = 240$ хв.). Діаграми а, б ілюструють умови тертя ковзання, тоді як в, г – тертя кочення з проковзуванням.

Експериментальні дані виявили, що при застосуванні навантаження у 150 Н на кульку, вже після короткочасного періоду випробувань (1 хвилина або 9 тисяч циклів навантаження) у зразках зі сталей 20X13, 45 та 30X15, що не

пройшли термічну обробку та не мали покриттів, внаслідок пластичної деформації формувалася канавка глибиною 17...18 мкм на поверхні кочення.

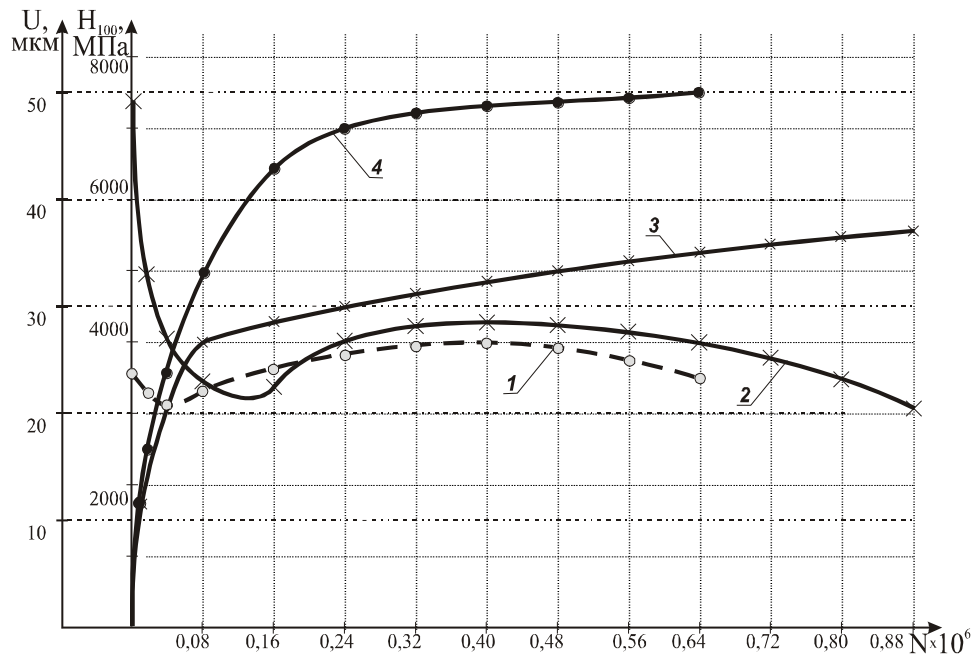


Рис. 2.10. Залежність зміни мікротвердості H_{100} (криві 1, 2) і зносу U (криві 3, 4) сталі 20X13 від кількості циклів навантаження:

1 і 4 – сталь без термообробки; 2 і 3 – сталь азатована за режимом 1а.

Навантаження на кульку $P_0 = 150$ Н.

Вздовж країв сформованої канавки спостерігалось утворення валиків, що являли собою виступи над поверхнею кільця з вертикальним розміром до 30 мкм. Подібні утворення виявлялися і на зразках, що не піддавалися термічній обробці, але були азотовані іонним способом; проте їх розмір був значно скромнішим і не перевищував 10 мкм. На зразках з підвищеною твердістю матеріалу основи (після процесу гартування) формування подібних валиків не було зафіксовано. Після 10 хвилин експерименту (90 тисяч циклів навантаження) величина пластичної деформації становила 60% від загального значення деформації і руйнування внаслідок зношування за весь період випробувань, від початку і до моменту появи сколів на поверхні кочення. У зразках із тих же марок сталі, оброблених азотуванням за режимами 1а і 2а, значення пластичної деформації поступово знижувалося і за аналогічних умов було в 1,5...1,7 рази меншим (див. таблиці 2.3 та 2.4). Згідно з проведеними

обчисленнями, внесок зношування від проковзування на даному етапі є несуттєвим і не перевищує 5-8% від величини пластичної деформації.

Під час циклічного навантаження спостерігається поступове зменшення пластичної деформації. На наступному етапі зношування стабілізується, досягаючи мінімальних абсолютних значень. У цей період домінуючим механізмом зношування є тертя ковзання, що виникає при відносному русі елементів контакту. Пластична деформація, хоч і присутня, відбувається на мікроскопічному рівні, доки не буде вичерпаний потенціал для її подальшого протікання. Після вичерпання можливості мікропластичного деформування ініціюється процес викришування, що призводить до різкого зростання інтенсивності зношування

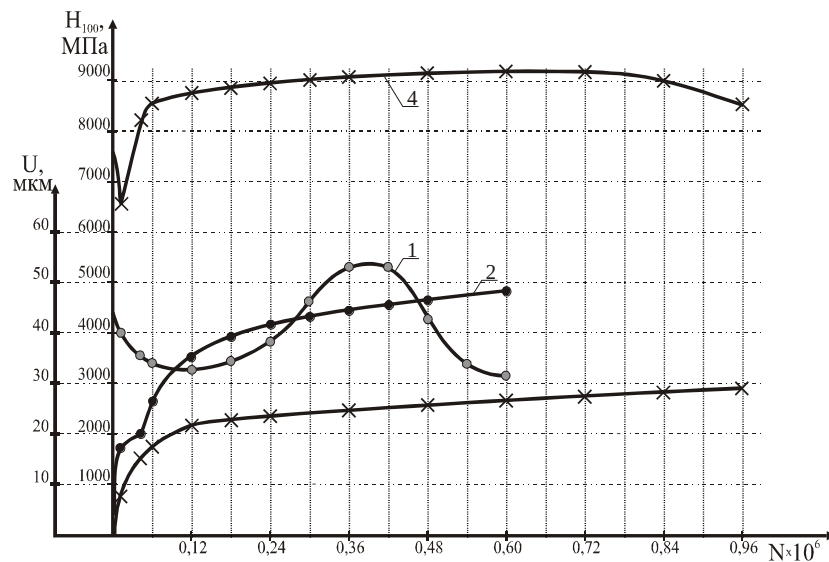


Рис. 2.11. Залежність зміни мікротвердості H_{100} (1, 4) та показників зносу

U (2, 3) зразків зі сталі 45 від кількості циклів навантаження:

1, 2 – зразки сталі 45 без попередньої термічної обробки; 3, 4 – зразки сталі 45 без термообробки, що пройшли іонне азотування за режимом 1а.

Випробування проводили при навантаженні на кульку $P_0 = 150$ Н.

Аналіз мікротвердості поверхні кочення виявив суттєві модифікації її властивостей в ході експерименту. Зафіксовано початкове різке зниження мікротвердості, за яким слідує поступове підвищення до пікового значення. Після досягнення максимуму спостерігається регресивна тенденція до

зменшення мікротвердості, що передусе проявам викришування. Слід зазначити, що аналогічна динаміка, як продемонстровано на рисунках 2.10, 2.11 та 2.12, характерна для зразків, виготовлених з різних марок сталі, незалежно від наявності захисного покриття.

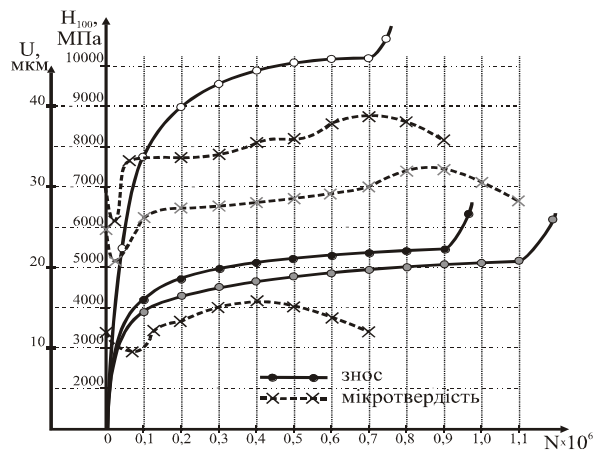


Рис. 2.12. Кінетика процесу зношування сталі ШХ15 під час тертя кочення при навантаженні на кульку $P_0 = 150$ Н для зразків із різними типами поверхневих покриттів:

1 – сталь без термообробки; 2 – сталь без термообробки, азотована за режимом 2а; 3 – сталь без термообробки, оксіязотована (азотування за режимом 1а з подальшим іонним оксидуванням протягом 30 хв при температурі 570 °С та тиску 240 Па у середовищі суміші повітря з киснем).

Результати зіставлення кількісних змін мікротвердості, що спостерігаються на поверхні кочення азотованих зразків маловуглецевої сталі 20Х13, середньовуглецевої сталі 45 і високовуглецевої сталі ШХ15 під час випробувань, свідчать про їхню диференційовану динаміку. Зокрема, для азотованої сталі 20Х13 характерне різке падіння мікротвердості на поверхні кочення на початковому етапі випробувань (зменшення майже в 2-3 рази), яке протягом перших 10 хвилин ($0,9 \cdot 10^5$ циклів навантаження) призводить до її вирівнювання з твердістю основного матеріалу. Надалі спостерігається поступове зростання мікротвердості на 10...15%, подальша стабілізація на максимальному рівні та наступне повільне зниження до моменту руйнування поверхні кочення.

Таблиця 2.3

Залежність процесу зношування сталі 20Х13 при терті кочення від різних значень навантаження на кульку

№ п/п	Час ви- про- бу- вань, хв.	К-сть цик- лів, $N \cdot 10^6$	Навантаження 50 Н				Навантаження 100 Н			
			Не азатована		Азатована		Не азатована		Азатована	
			Знос U, мкм	Мікротв. на дор. кочення H_{100} , МПа	Знос U, мкм	Мікротв. на дор. кочення H_{100} , МПа	Знос U, мкм	Мікротв. на дор. кочення H_{100} , МПа	Знос U, мкм	Мікротв. на дор. кочення H_{100} , МПа
1	0	0	0	3600	0	7305	0	3600	0	7305
2	1	0,009	16	3550	11	6680	28	3550	14	5350
3	5	0,045	21	3120	17	4725	32	4260	18	4270
4	10	0,09	25	3540	22	4920	34	4140	25	3850
5	20	0,18	26	3550	24	4140	36	3800	27	3910
6	30	0,27	30	3600	25	4160	36	3750	28	3860
7	40	0,36	31	3540	25,5	4140	38	3650	29	3860
8	60	0,54	32	3480	26	4140	40	3750	30	4100
9	90	0,81	33	3450	27	4140	42	3650	30,5	4120
10	120	1,08	35	3450	28	4140	Руйнування, піттинг		30,5	4100
11	150	1,39	37	3480	30	4115			31	3950
12	180	1,62	38	3480	32	4140			32	3750
13	240	2,16	Руйнування, піттинг		33	4170			Руйнування, піттинг	
14	300	2,7			34	4140				
15	360	3,24			Руйнування					
Навантаження 160 Н							Навантаження 250 Н			
1	0	0	0	3550	0	7380	0	3550	0	7700
2	1	0,009	18	3480	12	6400	30	3450	18	5070
3	5	0,045	23	3280	20	4040	45	4650	25	4850
4	10	0,09	35	3500	30	3650	57	4810	33	4050
5	20	0,18	43	3600	31	3650	68	4020	47	3830
6	30	0,27	44	3750	32	3850	72	4000	54	3780
7	40	0,36	45	3900	33	3950	76	3870	56	4040
8	50	0,45	46	3750	33,5	3840	80	3410	58	4120
9	60	0,54	47	3650	34	3750	Руйнування, піттинг		60	4040
10	70	0,63	48	3600	35	3680			Руйнування, піттинг	
11	90	0,81	Руйнування		36	3650				

Помітне зниження показників мікротвердості на поверхні кочення даної сталі на початковому етапі випробувань зумовлене, ймовірно, значною деформаційною здатністю матеріалу. В умовах циклічного навантаження, поверхневий нітридний шар, сформований в процесі азотування, зазнає інтенсивного руйнування та витіснення з області контакту. Як наслідок,

залишається лише зона внутрішнього азотування, що характеризується відносно низькою твердістю. Подальше циклічне навантаження призводить до зміцнення та зміни мікротвердості саме у внутрішній зоні азотування (α_N -фазі), причому ці зміни відбуваються в діапазоні значень, наближених до характеристик основної металевої матриці (рис. 2.13).

Таблиця 2.4

**Динаміка зношування сталі ШХ15 при терті кочення під навантаженням
150 Н на кульку для різних типів покриттів**

№ n/n	К-сть циклів, $N \cdot 10^6$	Сталь без термообробки		Азатована режим 2а		Азатована режим 1а + оксидування 30 хв.	
		Знос U, мкм	Мікротвердість доріжки кочення H_{100} , МПа	Знос U, мкм	Мікротвердість доріжки кочення H_{100} , МПа	Знос U, мкм	Мікротвердість доріжки кочення H_{100} , МПа
1	0	0	3440	0	7860	0	6140
2	0,01	17	3350	10	6500	9	5100
3	0,05	22	3240	15	7580	13	6500
4	0,1	30	3450	17	7600	15	6200
5	0,2	41	3550	18	7550	16	6600
6	0,3	42	3800	19	7860	17	6900
7	0,4	43	3880	20	8100	19	6850
8	0,5	44	3640	21	8150	20	6860
9	0,6	45	3500	22	8400	21	6870
10	0,7	46	3450	23	8720	21,5	7060
11	0,8	Руйнування, піттинг		24	7880	22	7500
12	0,9			25	7800	22,5	7050
13	1,0			Руйнування, піттинг		23	6640
14	1,1					23,5	6530
						Руйнування, піттинг	

При випробуваннях на терті кочення сталі ШХ15 під навантаженням на кульку 150 Н виявлено, що наявність різних покриттів суттєво впливає на динаміку зношування. Зразки без термообробки та без покриття демонструють найбільшу інтенсивність зношування, тоді як зразки з нітрогартуванням або оксіязотованим покриттям показують значне зниження зносу, що свідчить про підвищення зносостійкості поверхні за рахунок формування твердих і пластичних шарів. Оптимальні покриття дозволяють зменшити пластичну деформацію і затримати початок появи викришування на доріжці кочення.

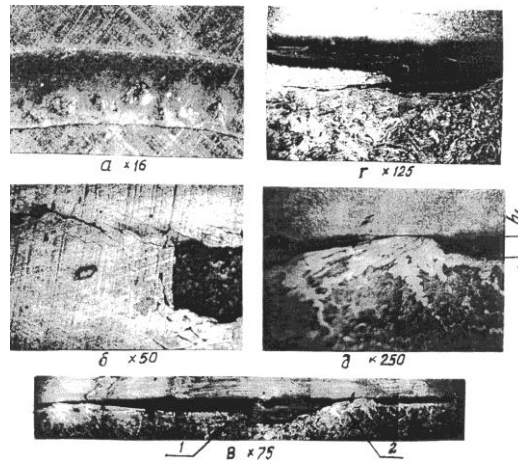


Рис. 2.13. Морфологія поверхні та перпендикулярний перетин доріжки кочення після випробувань:

а, б – сталь 45 без термообробки після 2 годин випробувань;

в, г – сталь 45 азатована за режимом 1а після 6 годин випробувань;

д, е – ділянки 1 і 2 відповідно.

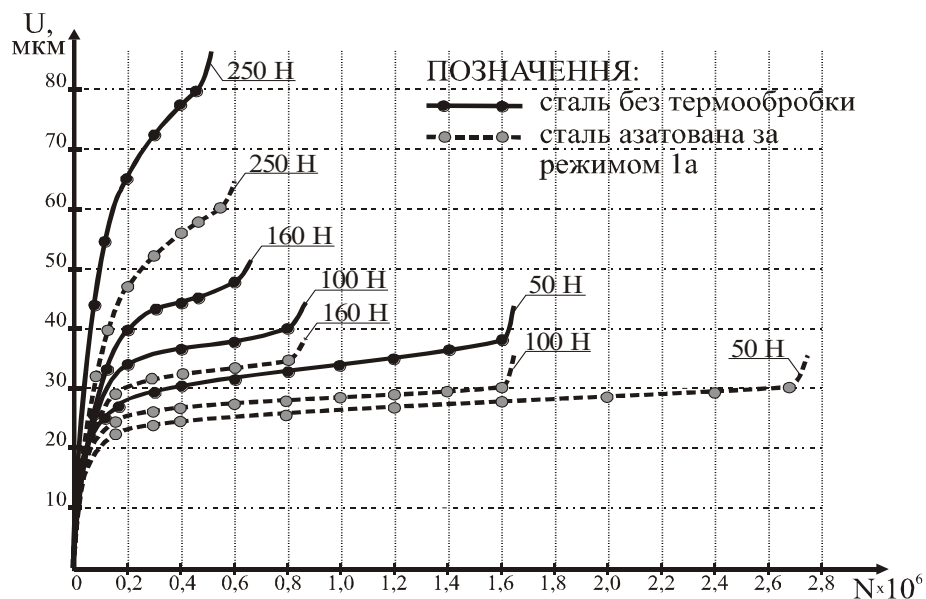


Рис. 2.14. Кінетика зношування сталі 20X13 при терті кочення з проковзуванням залежно від кількості циклів випробувань під різними навантаженнями

На відміну від сталі 20X13, яка характеризується більш високою пластичністю, сталі 45 і ШХ15, що володіють значно нижчою пластичністю, не демонструють повного руйнування та викришування нітридного шару з контактної поверхні під впливом циклічного навантаження. На початковому

етапі циклічного навантаження (до 10 000 циклів) спостерігається модифікація структури поверхневого азотованого шару, що зумовлює менше (до 30%) зниження мікротвердості на доріжці кочення, порівняно зі сталлю 20Х13. При подальшому циклічному навантаженні відбувається компактизація структури поверхневого шару та збільшення його мікротвердості до максимального значення, яке на 10–15% перевищує початкову мікротвердість поверхні. Вказана мікротвердість залишається стабільною до моменту ініціації руйнування (формування мікротріщин) і зменшується в період викришування поверхні доріжки кочення.

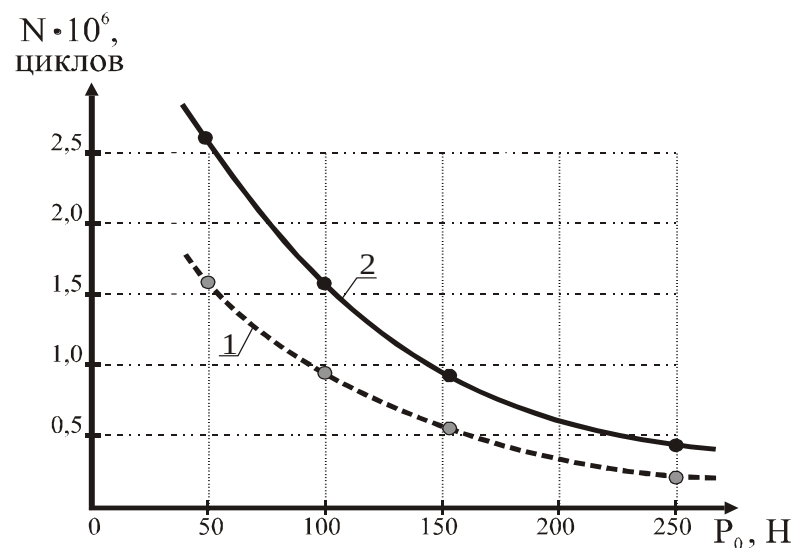


Рис. 2.15. Вплив навантаження на кульку на довговічність сталі 20Х13 при терті кочення з проковзуванням до появи пітингу:

1 – сталь без термообробки; 2 – сталь, азатована за режимом 1а.

На рис. 2.15 представлені графіки залежності зношування та мікротвердості від відстані на доріжці кочення сталі ШХ15, підданої обробці методом оксiazотування. З аналізу графіків випливає, що тенденції зміни зносу та мікротвердості на доріжці кочення аналогічні тим, що спостерігаються для азотованої сталі. Ключовою відмінністю є те, що зношування оксiazотованої сталі приблизно на 20% нижче, а термін служби, відповідно, на 20% більший, ніж у азотованої сталі. Цей ефект, ймовірно, зумовлений наявністю на поверхні тонкого оксидного шару, твердість якого поступається твердості основи (азотованого шару). Це призводить до зниження еквівалентних контактних напружень

(детальніше див. розділ 2), які є важливим чинником у втомному руйнуванні поверхні при циклічному контактному навантаженні. Крім того, присутність оксидного шару, імовірно, сприяє прискореному формуванню вторинних структур у процесі тертя ковзання, що, своєю чергою, викликає зменшення зносу при проковзуванні кульок.

На кінетику зношування та абсолютну величину зносу при фретинг-корозії з проковзуванням істотно впливає значення прикладеного навантаження на кульку. На рисунках 2.14 та 2.15 представлені залежності зносу азотованої та неазотованої сталі *20X13* від числа циклів навантаження при різних значеннях навантаження на кульку, а також залежність терміну служби зразків з даної сталі від величини навантаження на кульку. З ілюстрацій випливає, що із збільшенням навантаження суттєво зростає зношування та знижується термін служби зразків. Залежність терміну служби зразків від величини навантаження на кульку характеризується експоненціальною природою (рис. 2.15). Наявність азотованого шару значно збільшує термін служби зразків. Зі зростанням навантаження на кульку результативність нанесення покриття знижується. Даний ефект зумовлений підвищенням пластичної деформації, пов'язаної з відносно невисокою твердістю основи.

РОЗДІЛ 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1. Комплекс заходів із захисту працівників у виробничому середовищі

Служба охорони праці є окремим структурним підрозділом підприємства і підпорядковується безпосередньо роботодавцю. Керівники та фахівці цієї служби за своїм посадовим статусом і рівнем заробітної плати прирівнюються до керівників і спеціалістів основних виробничо-технічних підрозділів. Ліквідація служби охорони праці можлива лише у випадку ліквідації самого підприємства або припинення використання найманої праці фізичною особою.

Згідно з Типовим положенням про службу охорони праці, основними функціями цього підрозділу є:

- формування ефективної та цілісної системи управління охороною праці, удосконалення діяльності структурних підрозділів і посадових осіб у цьому напрямі;
- здійснення оперативного та методичного керівництва роботою з охорони праці на підприємстві;
- підготовка разом із відповідними підрозділами комплексних заходів щодо досягнення встановлених нормативів безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, а також розроблення розділу «Охорона праці» колективного договору;
- проведення вступного інструктажу для працівників із питань охорони праці;
- організація забезпечення персоналу нормативно-правовими актами та інструкціями з охорони праці;
- здійснення паспортизації цехів, діляниць і атестації робочих місць на відповідність вимогам безпеки праці;

- ведення обліку, аналізу нещасних випадків, професійних захворювань і аварій, а також оцінка завданих ними матеріальних збитків;
- складання статистичної звітності підприємства з питань охорони праці;
- розроблення поточних і довгострокових планів заходів, спрямованих на створення безпечних та нешкідливих умов праці;
- організація підвищення кваліфікації та перевірки знань посадових осіб із питань охорони праці;
- участь у розслідуванні нещасних випадків, аварій та у роботі комісій з питань охорони праці підприємства;
- участь у роботі комісій з приймання в експлуатацію, реконструкції чи технічного переоснащення виробничих і соціальних об'єктів, а також модернізованого обладнання;
- розроблення внутрішніх нормативних документів — положень, інструкцій та інших актів із питань охорони праці, що діють у межах підприємства;
- сприяння впровадженню сучасних досягнень науки і техніки, новітніх засобів колективного та індивідуального захисту працівників;
- розгляд заяв, скарг і звернень працівників щодо порушень вимог охорони праці;
- надання методичної допомоги керівникам структурних підрозділів у розробленні та реалізації заходів із підвищення рівня безпеки праці.

Отже, ефективна організація роботи служби охорони праці є необхідною умовою забезпечення безпеки працівників і стабільного функціонування підприємства. Злагоджена діяльність цього підрозділу дозволяє своєчасно виявляти та усувати потенційні небезпеки, запобігати нещасним випадкам і професійним захворюванням, підвищувати рівень трудової дисципліни та відповідальності персоналу. У результаті підвищується загальна ефективність виробництва та зміцнюється соціальна відповідальність роботодавця.

3.2. Оцінювання та моделювання ризиків для працівників гальванічних дільниць

У гальванічних цехах основними джерелами потенційної небезпеки є технологічні процеси, пов'язані з підготовкою поверхонь, приготуванням розчинів та електролітів, а також нанесенням покриттів. Процеси очищення поверхонь супроводжуються підвищеним рівнем запиленості, шумом та вібрацією. Застосування лугів, кислот і солей при приготуванні розчинів створює ризик токсичного впливу на організм працівників, що може призвести до гострих отруєнь або професійних захворювань.

Використання ручного віброінструменту для шліфування поверхонь підвищує ризик розвитку вібраційної хвороби. Робота з ультразвуковими ваннами очищення супроводжується впливом звукових і ультразвукових коливань, а велика кількість промивних ванн у приміщенні зумовлює підвищену вологість. Безпечні умови праці забезпечуються належним освітленням, ефективною припливно-витяжною вентиляцією та підтриманням нормального температурного режиму в цеху.

Найбільш небезпечні хімічні речовини, що використовуються у виробництві:

1. Натрій їдкий (NaOH). Контакт із розчином або пилом може призвести до утворення струпів, виразок, екземи, особливо в ділянках суглобів пальців. Потрапляння навіть незначної кількості NaOH в очі спричиняє тяжке ураження рогівки та внутрішніх структур ока, що може призвести до сліпоти. **Перша допомога:** промивання ураженої ділянки протягом 10 хвилин водою, потім оброблення 5% розчином оцтової або лимонної кислоти. При ураженні очей – негайне промивання водою або фізіологічним розчином упродовж 10 хвилин. **ГДК:** 0,5 мг/м³. **Засоби індивідуального захисту:** спецодяг із щільної тканини, гумові рукавички, нарукавники, фартух, гумове взуття.

2. Сода кальцинована (Na_2CO_3). Вплив пилу викликає подразнення слизових оболонок носа, дихальних шляхів, очей, може спричинити кон'юнктивіт або екзему. Концентрований розчин викликає опіки шкіри та помутніння рогівки. **ГДК:** 2 мг/м³. **Засоби захисту:** спецодяг із щільної тканини, гумові рукавички, фартух, захисне взуття.

3. Соляна кислота (HCl). При високих концентраціях пари або туману HCl спричиняють подразнення слизових оболонок, кашель, катар дихальних шляхів, руйнування зубної емалі, виразки слизових, а у тяжких випадках – пошкодження носової перегородки. **Перша допомога:** вивести постраждалого на свіже повітря, послабити одяг, промити очі, ніс та рот 2% розчином соди, провести інгаляцію киснем. **ГДК:** 5 мг/м³. **Засоби захисту:** фільтрувальний протигаз марки В, герметичні окуляри, кислототривкий спецодяг, гумові рукавиці та чоботи.

4. Синильна кислота (HCN). HCN та її сполуки є надзвичайно токсичними; вони блокують фермент цитохромоксидазу, викликаючи кисневе голодування тканин. Ознаки гострого отруєння – головний біль, нудота, задишка, уповільнення дихання, можливе зупинення серця. При хронічному впливі спостерігається втомлюваність, низький тиск, зміни у складі крові. **Засоби захисту:** промисловий протигаз, герметичні окуляри, кислототривкий спецодяг, рукавички та чоботи зі стійкої гуми.

3.3. Висновки по розділу

Отже, основними небезпечними факторами у гальванічних цехах є технологічні процеси підготовки поверхні, приготування розчинів та електролітів, нанесення покриттів, а також несправне обладнання, підвищена температура, вологість і запиленість повітря. Для запобігання негативному впливу цих факторів необхідно суворо дотримуватись правил індивідуального захисту та допускати до експлуатації лише технічно справне обладнання.

Процеси очищення поверхонь супроводжуються підвищеним рівнем запиленості, шумом і вібрацією, що додатково підвищує ризики для здоров'я працівників.

РОЗДІЛ 4.

ВИРОБНИЧЕ ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБОК І ЇХ ЕКОНОМІЧНА ДОЦІЛЬНІСТЬ

4.1. Технічна надійність підшипників у вузлах сільськогосподарської техніки

Оцінка надійності здійснювалася за такими параметрами, як середнє напрацювання до відмови та коефіцієнт технічного використання. Коефіцієнт технічного використання ($K_{ТИ}$) є важливим комплексним показником надійності сільськогосподарської техніки, оскільки він дозволяє кількісно оцінити як характеристики самого об'єкта, так і ефективність його експлуатації та ремонту. При розрахунку враховується час, протягом якого техніка перебуває у працездатному стані, а також час, витрачений на технічне обслуговування та ремонт. Визначення коефіцієнта $K_{ТИ}$ проводилося за наступною формулою:

$$K_{ТИ} = \frac{T_P}{T_P + T_B + T_{ТО}}, \quad (4.1)$$

де T_P – середній час, протягом якого підшипниковий вузол перебуває у працездатному стані, год., ч; T_B – середній час на відновлення працездатності протягом періоду T_P , год., ч; $T_{ТО}$ – час, витрачений на технічне обслуговування, год.

Середній наробіток до відмови визначали за наступною формулою:

$$T_P = \frac{\sum t_i}{n_0}, \quad (4.2)$$

де $\sum t_i$ – середній час роботи між відмовами; n_0 – кількість зареєстрованих відмов.

Середній час усунення відмови визначали як:

$$T_B = \frac{\sum t_{ei}}{n_0}, \quad (4.3)$$

де $\sum t_{ei}$ – сукупний час усунення відмов.

Коефіцієнт технічного використання враховує здатність матеріалу деталей підшипникових вузлів протистояти зношуванню під час експлуатації.

4.2. Аналіз економічної доцільності відновлення підшипникових вузлів за розробленою методикою

Аналіз техніко-економічної доцільності підвищення надійності та ресурсу сільськогосподарських машин.

Річний економічний ефект від впровадження запропонованої технології відновлення підшипникових вузлів розраховували за такою формулою:

$$\mathcal{E} = [(c_1 + E_n k_1) - (c_2 + E_n k_2)] B_r, \quad (4.4)$$

де c_1 і c_2 – собівартість відповідно нової деталі та деталі, відновленої за розробленою технологією, грн.; k_1 і k_2 – питомі капітальні витрати на придбання технологічного обладнання, грн.; $E_n = 0,15$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень; B_r – річна кількість вузлів, що відновлюються за запропонованою технологією, шт.

C_y - витрати на виготовлення установки для зміцнення визначають за такою формулою:

$$C_y = C_k + C_{od} + C_{nd} + C_{cb} + C_{on}, \quad (4.5)$$

де C_k – вартість виготовлення корпусних деталей, C_{od} – витрати на виготовлення оригінальних деталей, C_{nd} – ціна покупних деталей та складальних одиниць, C_{cb} – заробітна плата виробничих працівників, задіяних у

складанні конструкції, C_{on} – загальновиробничі (цехові) накладні витрати на виготовлення або модернізацію конструкції, усі значення у гривнях.

За наведеною формулою витрати були розраховані та склали 58 781 грн. Питомі капітальні вкладення визначали за такою формулою:

$$\kappa_1 = \frac{C_{O1}}{B_{Г1}}; \quad \kappa_2 = \frac{C_{O2}}{B_{Г2}}, \quad (4.6)$$

де C_{O1} і C_{O2} – собівартість засобів виробництва за наявною технологією виготовлення та запропонованою технологією регенерації опорних втулок розподільних валів, відповідно; $B_{Г1}$ и $B_{Г2}$ – річний обсяг виробництва та регенерації з використанням розробленої технології.

Визначені на основі емпіричних залежностей питомі капіталовкладення склали $\kappa_1 = 1,34$ грн.; $\kappa_2 = 0,92$ грн.

Собівартість відновлення C визначали за формулою:

$$C = C_{з.п.} + C_m + C_{р.ф.} + C_{н.р.} + C_{п.р.}, \quad (4.7)$$

де $C_{з.п.}$ – оплата праці працівників виробництва, безпосередньо залучених до процесу відновлення, у гривнях; C_m – вартість матеріалів, використаних під час відновлення, у гривнях; $C_{р.ф.}$ – вартість фонду ремонту, що враховує витрати на придбання обладнання, у гривнях; $C_{н.р.}$ – загальновиробничі витрати, у гривнях; $C_{п.р.}$ – інші витрати у гривнях.

Середня собівартість виготовлення одного комплексу підшипникових вузлів становить $C_1 = 2742$ грн., у той час як собівартість відновленого комплексу складає а відновленого $C_2 = 1258$ грн.

Прогнозований фінансовий результат від застосування запропонованої технології полягає у наступному:

$$\Xi = [(1467 + 0,15 \cdot 1,29) - (948 + 0,15 \cdot 0,94)] \cdot 300 = 155715,75 \text{ грн.}$$

В розрахунку на одиницю продукції, загальний економічний ефект становить 519,05 грн.

У таблиці 4.1 представлено ключові показники, що характеризують техніко-економічну доцільність відновлення підшипникових вузлів.

Таблиця 4.1

Комплексні показники техніко-економічної продуктивності

Показники економічної оцінки	Діюча технологія відновлення	Розроблена технологія відновлення
1. Річний обсяг відновлених комплектів опорних втулок, шт.	300	300
2. Собівартість комплекту втулок, грн	1467	948
3. Питомі капітальні вкладення, грн	1,29	0,94
4. Очікуваний річний економічний ефект, грн	—	155 715,75
5. Економічний ефект на один комплект, грн	—	519,05

Висновки

Проведені дослідження дають змогу прогнозувати надійність технологічного комплексу, що сприятиме підвищенню якості та безперебійності його функціонування.

Середня вартість комплекту підшипникових вузлів, виготовлених за запропонованою технологією, є приблизно в 1,34 рази нижчою, ніж вартість відновленого стандартного комплекту.

Впровадження розробленої технології забезпечує економічний ефект у розмірі 155 715,75 грн при обсязі впровадження 300 комплектів.

ВИСНОВКИ

Іонне азотування у безводневих середовищах є перспективним методом модифікації фізико-механічних властивостей матеріалів. Змінюючи параметри процесу дифузійного насичення, можна контролювати товщину, мікротвердість, градієнт твердості по товщині, фазовий склад і рівень залишкових напружень стиску в азотованих шарах.

Застосування методів планування експерименту (зокрема, чотирифакторного плану Хартлі) дозволило отримати аналітичні залежності між технологічними факторами іонного азотування сталі *ШХ15* та характеристиками азотованих шарів, такими як товщина, мікротвердість поверхні та інтенсивність зношування. В результаті досліджень визначено оптимальні значення технологічних параметрів, що забезпечують мінімальну інтенсивність зношування за даних умов випробувань: температура в діапазоні 560-570°C, тиск у вакуумній камері 160-240 Па, тривалість дифузійного насичення 240 хвилин та вміст аргону в азотно-аргонній суміші 38-57 об'ємних відсотків.

Порівняльні дослідження зносостійкості зразків з різними типами покриттів виявили, що дослідні зразки демонструють найменшу інтенсивність зношування та підвищену довговічність. Інтенсивність зношування цих зразків виявилася в 2,2 рази нижчою, а довговічність майже вдвічі перевищує аналогічні показники для загартованих зразків зі сталі *ШХ15*, виготовлених за стандартною технологією.

Для досягнення максимальної довговічності конструкційних елементів, що працюють в умовах тертя кочення з проковзуванням, рекомендовано нанесення дифузійного покриття з максимально допустимою товщиною, мікротвердістю поверхні в межах 7600-7800 МПа, відсутністю крихких фаз на поверхні та мінімальним градієнтом твердості у композиції "покриття-основа".

Впровадження розробленої технології забезпечує економічний ефект у розмірі 155 715,75 грн при обсязі впровадження 300 комплектів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борисов Ю. С., Добромислов Н. Н. Корректировка показателей долговечности подшипников качения по фактическим значениям радиального зазора. Надежность и контроль качества. 1990. №2. С39-43.
2. Каган А. С. Влияние остаточного аустенита в закаленной стали ШХ15 на контактную выносливость. *Сб. тр. НПОВНИИПП*. 1988, №3. С. 171-178.
3. Голубець В. М., Білоус О. С. Розробка нового евтектичного електродного сплаву для нанесення зносостійких покриттів на ріжучий інструмент комплексним електроіскровим легуванням і лазерною обробкою. *Проблеми трибології*. Хмельницький, 2009, №2. С.48-55.
4. Добромислов Н. Н., Борисов Ю. С., Лукьянов Д. В. Расчет показателей безотказности и долговечности крупногабаритных подшипников качения по критериям контактной усталости и износа. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 1990. №2. С.67-72.
5. Дубинин Г. Н., Оганесян Г. Л., Жуков В. П., Бойков В. А. Хромирование шарикоподшипниковых сталей для повышения долговечности подшипников. *Металловедение и терм. обраб. мет.* 1990. №12. С.5-10.
6. Дупляк. О.В. Изменение микротвердости поверхностных слоев деталей скоростных совмещенных опор при испытании их на износостойкость. *Подшипниковая промышленность*, Вып. 2. 1977. С. 8-15.
7. Конвисаров Д.В., Покровская А.А. Влияние радиуса кривизны цилиндрических тел на их сопротивление перекатыванию при различных нагрузках. *Тр. Сиб. физ.-техн. ин-та*. 1985. Вып. 34. С.62-79.
8. Красовский Г. И., Филаретов Г. Ф. Планирование эксперимента. Минск : Изд. БГУ, 1982. 302 с.
9. Кудрявцев И. А., Харитонов Б. В. Влияние режима нагружения на износ при качении с проскальзыванием. *Трение и износ*, 1988. №1. С.118-121.

10. Маталин А. А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин. Киев : Техника, 1971. 144 с.
11. Дупляк. О. В Особенности кинетики микрорельефа рабочей поверхности деталей подшипников при трении качения с высокой частотой вращения. *Подшипниковая промышленность*. 1977. Вып. 4. С. 1-7.
12. Руснак З. Поверхностная контактная усталость в подшипниках качения. *Strojirenstvi*. 1988, 37, № 1. С.50-55.
13. Savies R. S Повреждение выкрашиванием подшипников качения и его влияние на усталостную долговечность. *Trans ASME:J.Tribol*. 1988, 110, №1. С.26-31.
14. Подшипники качения. Справочник-каталог. Москва .: Машиностроение, 1978. 592 с.
15. Спришевский А. И. Подшипники качения. Москва: Машиностроение, 1968. 632 с.
16. Черменский О. Н. Накопление усталостных повреждений в опорах качения. *Пробл. машиностр. и надеж. машин*. 1990. №5. С.44-49.
17. Bentall R. H., Johnson A. R. Slip in the rolling contact of two dissimilar elastic rollers. *Int. J.Mech. Sci.*, 1997. vol.9 P.389-404.
18. Dorn S., Hirsch T., Mayr P. Strukturelle Veraenderungen lokal vorgeschaedigter Kugellager bei der Waelzermuedung. *Harter.-techn. Mitl.* 1992. 47, №5. P.284-292.