

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

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра машиновикористання та сервісу технологічних систем

**Кваліфікаційна робота
на правах рукопису**

Мандра Владислав Вікторович

УДК 621.793

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Підвищення зносостійкості підшипникових вузлів ходової
частини трактора**

208 “Агроінженерія”

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ **В. В. Мандра**

Керівник роботи

Борак К.В.

Кандидат технічних наук

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Мандра Владислав Вікторович. Підвищення зносостійкості підшипникових вузлів ходової частини трактора. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – Агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

В магістерській роботі встановлено, технологія нітрогартування з попереднім іонним оксіазотуванням забезпечує зниження градієнта твердості по товщині композиції “покриття-основа” за рахунок розпаду ϵ -фази і дифузії азоту в глибину та підвищення твердості. Триботехнічні характеристики і хімічний та фазовий склад покриттів мають визначальне значення інтенсивності їх зношування при терті ковзання.

Порівняльні дослідження зносостійкості зразків з різними покриттями показали, що нацменш інтенсивно зношуються і володіють найвищою довговічністю дослідні зразки. Інтенсивність зношування цих зразків є в 2,2 рази меншою, а довговічність майже в 2 рази перевищує довговічність гартованих зразків із сталі *ШХ15*, виготовлених за традиційною технологією.

Для максимального збільшення довговічності конструкційних елементів при терті кочення з проковзуванням, рекомендується нанесення дифузійних покриття максимально допустимої товщини з мікротвердістю поверхні 7600-7800 МПа без крихких фаз на поверхні та мінімальним градієнтом твердості по товщині композиції “покриття-основа”. твердості.

Ключові слова: зносостійкість, нітрогартування, підшипниковий вузол, ходова частини трактора

ANNOTATION

Mandra Vladislav Viktorovich. Increase of wear resistance of bearing knots of a running gear of a tractor. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualification work for a master's degree in specialty 208 – Agricultural Engineering. – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

In the master's thesis it is established that the technology of nitrogardening with preliminary ionic oxiazotization provides a decrease in the hardness gradient in the thickness of the composition "coating-base" due to the decay of the ϵ -phase and diffusion of nitrogen into depth and increase hardness. Tribotechnical characteristics and chemical and phase composition of coatings are crucial for the intensity of their wear during sliding friction.

Comparative studies of the wear resistance of samples with different coatings showed that the less intensive wear and have the highest durability of the test samples. The wear intensity of these samples is 2.2 times lower, and the durability is almost 2 times higher than the durability of hardened samples of steel SHX15, made by traditional technology.

To maximize the durability of structural elements when sliding friction, in particular, rolling bearings, it is recommended to apply diffusion coatings of maximum thickness with microhardness of the surface 7600-7800 MPa without brittle phases on the surface and a minimum hardness gradient on the thickness of the coating-base composition. hardness.

Keywords: wear resistance, nitrogardening, bearing unit, tractor chassis

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ.....	8
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗРАЗКІВ НА ТЕРТЯ КОЧЕННЯ І КОВЗАННЯ.....	15
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЗРАЗКІВ З РІЗНИМИ ПОКРИТТЯМИ.....	23
ВИСНОВКИ.....	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	38

ВСТУП

Зносостійкість і довговічність підшипників кочення значною мірою залежать від фізико-механічних характеристик, структури, хімічного і фазового складів поверхневих шарів. Для збільшення фактичної площі контакту і зменшення контактних напружень на доріжці кочення в початковий період роботи жолоби підшипників шліфують, забезпечуючи високий клас шорсткості. Проте, як показують дослідження, мікроступи (навіть на самих гладких поверхнях) при контактуванні з іншими поверхнями деформуються вже при невеликих навантаженнях. Розрахунки контакту циліндрів з різною шорсткістю показали, що контактні напруження залежать від шорсткості, а їх значення перевищують величини, що одержані на основі теорії Герца. Зменшення контактних напружень в зоні контакту можна досягнути раціональним конструюванням поверхні жолоба кільця, застосовуючи оптимальний радіус поперечного розтину канавки кільця підшипника та утворюючи поверхню жолоба спряженням двох криволінійних поверхонь; оптимізацією профілю робочої поверхні тіла кочення (ролика), що забезпечує при певному навантаженні рівномірний розподіл робочого напруження на поверхні контакту. Одним із шляхів підвищення експлуатаційних характеристик підшипників кочення є створення на поверхні доріжки кочення регулярного мікрорельєфу у вигляді гвинтової канавки.

Мета і задачі дослідження. Мета досліджень – підвищити зносостійкість підшипникових вузлів ходової частини трактора за рахунок використання технології нітрогартування з попереднім іонним оксіязотуванням.

Для досягнення поставленої необхідно було вирішити такі задачі:

- Аналіз способів підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення;
- Розробка експериментальної установки для дослідження зразків на тертя кочення і ковзання;

- Дослідити зносостійкість зміцнених зразків з різними покриттями.

Об'єкт дослідження: процес зношування підшипникових вузлів ходової частини трактора.

Предмет дослідження: закономірності триботехнічних характеристик поверхонь тертя підшипникових вузлів в залежності від способів і режимів обробки.

Методи дослідження. Дослідження виконано з використанням методів механіки, трибології та прикладної фізики. Обробку експериментальних даних виконано за допомогою методів математичної статистики з використанням прикладних комп'ютерних програм.

Перелік публікацій за темою роботи:

1. **Мандра В. В.** Способи підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення. Збірник тез V-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»*. 28-29 березня 2019 року м. Житомир. ЖАТК. С. 289-890.

2. **Мандра В. В.** Експериментальна установка для дослідження зразків на тертя кочення і ковзання. Збірник тез VI-ї всеукраїнської науково-практичної конференції *«Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь»* 9-10 квітня 2020 року. Житомир : ЖАТК. С. 207-208

3. Куликівський В. Л., Мельник В. Л., Слинько В. Д., Лібиховський В. В., **Мандра В. В.** Стійкість до абразивного зношування покриття на основі порошку Stellite 6. Матеріали II Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції *«Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі»* (Мелітополь, 02-27 листопада 2020 р.). Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 418-421.

Практичне значення одержаних результатів. Результати роботи можуть бути використанні при виготовленні та ремонті підшипникових вузлів ходової частини трактора.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 18 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 39 сторінки комп'ютерного тексту, містить 4 таблиці і 14 рисунків.

РОЗДІЛ 1

СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ

Зносостійкість і довговічність підшипників кочення значною мірою залежать від фізико-механічних характеристик, структури, хімічного і фазового складів поверхневих шарів. Для збільшення фактичної площі контакту і зменшення контактних напружень на доріжці кочення в початковий період роботи жолоби підшипників шліфують, забезпечуючи високий клас шорсткості [1-17]. Проте, як показують дослідження [6-8], мікроступи (навіть на самих гладких поверхнях) при контактуванні з іншими поверхнями деформуються вже при невеликих навантаженнях. Розрахунки [14] контакту циліндрів з різною шорсткістю показали, що контактні напруження залежать від шорсткості, а їх значення перевищують величини, що одержані на основі теорії Герца. Зменшення контактних напружень в зоні контакту можна досягнути раціональним конструюванням поверхні жолоба кільця, застосовуючи оптимальний радіус поперечного розтину канавки кільця підшипника та утворюючи поверхню жолоба спряженням двох криволінійних поверхонь [90]; оптимізацією профілю робочої поверхні тіла кочення (ролика), що забезпечує при певному навантаженні рівномірний розподіл робочого напруження на поверхні контакту [12]. Одним із шляхів підвищення експлуатаційних характеристик підшипників кочення є створення на поверхні доріжки кочення регулярного мікрорельєфу у вигляді гвинтової канавки [16]. Регулярний мікрорельєф формується на операціях шліфування і суперфінішування жолоба. Метод утворення регулярного мікрорельєфу розроблено в Саратовському державному технічному університеті. Він дозволяє одержати мікрорельєф з різними геометричними параметрами, які впливають на фактичну площу контакту доріжок і тіл кочення [16].

Однією з основних характеристик поверхні контакту, що значно впливає на зносостійкість і довговічність підшипників, є твердість доріжки кочення.

Досліджувалися підшипники кочення з різною твердістю доріжки, що змінювалася в діапазонах від 39-64 HRC [9] і 180-1280 HV [8]. Дослідження показали, що межа контактної втоми збільшується зі збільшенням твердості. При збільшенні твердості доріжки кочення з 39 до 64 HRC кількість мікротріщин на 1 мм^2 зменшувалась з 130 до 40 [7]. На відпалених і покращених зразках із сталі S45C з HV від 180 до 333 руйнування розпочиналося з утворення пітингів; на зразках тієї ж сталі після гартування і низького відпуску з HV 360-755 – з пітингів з відшаруванням; на цементованих зразках із сталі SNC21 і азотованих із сталі SAMC1 з HV 500-1280 – тільки з відшаруванням.

У роботах [8, 14] показано, що лазерна обробка поверхні підшипників кочення сприяє збільшенню контактної витривалості і зносостійкості матеріалу підшипників. Зносостійкість сталі 9Х після опромінювання лазером з оплавленням зростає пропорційно потужності лазерного випромінювання. Максимальний опір контактній втомі сталі 9Х після лазерного гартування досягається при оптимальному поєднанні потужності та швидкості переміщення лазерного променя [14]. Довговічність опромінювання лазером з оплавленням зростає пропорційно потужності лазерного випромінювання. Довговічність сталі 9Х при циклічному контактному навантаженні корелює з параметром $z^3 \cdot H$, де: z – товщина, H – мікротвердість шару лазерного гартування. При $z^3 H \geq 20$ мДж контактнo-втомний ресурс після лазерного гартування більший, ніж після стандартної термообробки [14].

У роботі [15] відзначається позитивний вплив на довговічність підшипників кочення дробоструминного наклепу і перспективність такої обробки.

Збільшення зносостійкості та довговічності підшипників кочення можна досягнути нанесенням на доріжку кочення покриттів. Проводились дослідження [10] ділянки зношування підшипників кочення, що

характеризувалася виникненням блискучих ділянок на доріжці кочення. Це зношування було обумовлено контактною втомою і з'являлося навіть після короткострокової (від 10 хвилин до 2 годин) роботи підшипника. Проводились порівняльні дослідження [10] доріжок кочення і тіл кочення після традиційної обробки, після нанесення на них покриттів з TiN , MoS_2 і Ag методом осадження з парової фази, а також доріжок кочення, які після шліфування одержали термічну обробку в вакуумі. Топографію доріжки кочення аналізували за допомогою електронного мікроскопа. Було встановлено, що покриття TiN може загальмувати розвиток тріщин, що утворюються при роботі, завдяки високій твердості та зносостійкості TiN . Проте при контакті такого покриття з тілами кочення без покриття, відбувається інтенсивне зношування останніх. Покриття MoS_2 забезпечує задовільні антифрикційні властивості й високу зносостійкість. Блискучих ділянок втоми при застосуванні MoS_2 не спостерігалось. Термообробка в вакуумі дозволяє позбутись дефектних шарів, що виникали при шліфуванні, і підвищує твердість і зносостійкість доріжки кочення та зменшує деформації порівняно з гартуванням після нагріву в захисному середовищі.

Дослідженнями [13] на контактну витривалість підшипникової сталі $M50$ при коченні з покриттями з TiN , які наносилися методом осадження в вакуумі з одночасною іонною імплантацією іонів N , показали, що в агресивному середовищі в розбавленому розчині $NaCl$ довговічність сталі з покриттям товщиною 1 мкм в 4 рази вища порівняно із цією ж сталлю без покриття. При меншій товщині покриття швидко руйнувалося. Вказується висока адгезія покриття з основою. Автори стверджують, що підвищення довговічності підшипників відбувалося внаслідок сповільнення мікровикрихчення за рахунок частинок, що проникли в поверхню сталі.

У дослідженні [2] контактної втоми сталей $P6M5$ і $20XH3A$ з покриттями із TiN в умовах тертя кочення в середовищі проточної води встановлено, що нанесення тонких TiN -покриттів збільшує контактну витривалість сталей при умові, що немає значної пластичної деформації матеріалу основи. Значне (в 1,7-

2,5 рази) підвищення довговічності сталі *20ХН3А* в проточній воді досягнуто в результаті хіміко-термічної обробки з подальшим нанесенням покриття з *TiN* методом магнетронного розпилення. Збільшення довговічності пов'язане з гальмуванням зародження і розвитку втомного руйнування зносо- і корозійностійкими покриттями.

За допомогою електронної мікроскопії досліджувались контактні втомні властивості при коченні покриттів з нітриду титану і міді на основі із підшипникових сталей в залежності від морфології, товщини, мікроструктури і хімічного складу плівок, що були нанесені електролітичним напиленням і металізацією іонами [12]. Товщина покриття від 2000 Å до 2 мкм. Дослідження проводились на машині для випробувань на контактну втому при частоті навантаження 60 Гц в умовах мастила і при контактних напруженнях 5,42 і 4,04 ГПа. Встановлено, що при покриттях чистою міддю контактна витривалість залежно від марки сталі може бути як більшою, так і меншою порівняно зі сталлю без покриття. Покриття з нітриду титану незалежно від марки сталі показали підвищення зносостійкості при контактних напруженнях 5,42 ГПа.

Наявність м'яких покриттів може привести до зниження пікових значень контактних напружень [14], і вплив зовнішніх дотичних сил на розподіл Герцівських напружень значно зменшується [13]. На зразках з м'якими покриттями, що наносились на сталь *ШХ15*, при дії нормального пульсуючого навантаження не з'являлось тріщин контактної втоми навіть після $42 \cdot 10^6$ циклів навантаження, в той час як на зразках без покриттів тріщини контактної втоми виникали через $9 \cdot 10^6$ циклів [1]. Підвищення довговічності підшипників кочення досягнуто і при модифікації поверхні їх елементів фрикційно-хімічними композиційними покриттями на основі міді [8]. Зростання довговічності підшипників досягнуто через збільшення площі фактичного контакту і падіння навантаження на найбільш навантажене тіло кочення за рахунок тонкої пластичної плівки на основі міді. Добавка до мастил металоплакаучих присадок при випробуваннях сталей на двороликовій машині

на контактну витривалість при контактних напруженнях до 60 МПа збільшує в 2 рази кількість циклів до руйнування [3].

Значне підвищення зносостійкості та довговічності підшипників кочення досягається при зміцненні поверхні їх елементів методами хіміко-термічної обробки [9]. Дифузійне хромування за стандартними режимами (850-1100°C, 1-9 годин) підшипників кочення із сталей *ШХ15* і *95Х18* підвищує їх зносостійкість і корозійну стійкість [8]. Підшипники працездатні в усьому діапазоні навантажень, в яких застосовуються ці підшипники. Встановлено кореляцію між залишковими напруженнями, роботою виходу електронів і відносною зносостійкістю підшипників.

У роботах [16, 17] досліджувався вплив на контактну витривалість іонної цементації, газової цементації і нітроцементації сталей *20CrMnTi*, *20CrMnMo* з застосуванням метода Вейбулла. Показано, що найбільша зносостійкість і витривалість виявилась у сталі *20CrMnMo* після іонної цементації. Залишкові напруження стиску, що виникають в процесі хіміко-термічної обробки, позитивно впливають на підвищення контактної витривалості. Відзначається [16], що у випадку великої кількості азоту при нітроцементації, останній дифундує на велику глибину, а залишковий аустеніт і залишкові напруження стиску одночасно сприяють підвищенню контактної витривалості сталі.

У роботах [6, 13, 15, 18] наводяться результати досліджень різних сталей на контактну витривалість при коченні після різних методів азотування: за традиційною технологією, м'якого азотування та іонного азотування в середовищі аміаку з домішками природного газу. Всі дослідники вказують на значне підвищення зносостійкості та контактної витривалості металів після азотування. Зокрема поверхнєве азотування *Сталь 45* за традиційною технологією [133] дозволяє підвищити твердість, контактну міцність і циклічну витривалість майже в 2 рази порівняно з не азатованою. В легованих сталях *30CrMoV9* і *42CrMo* після азотування контактна міцність збільшилась в 1,5-1,7 рази, а контактна витривалість до руйнування – в 2-3 рази.

Вивчали також вплив м'якого азотування сталі (в %) $0,42\text{C}\cdot 0,35\text{Cr}\cdot 0,3\text{Ni}$ на контактну витривалість металу при коченні циліндричних зразків по ролику із сталі 0,45 % С в середовищі мастила Теллус 15 [15]. У процесі досліджень контактні напруження змінювалися від 60 до 160 $\text{кГс}/\text{мм}^2$. Встановлено, що м'яке азотування в 2,7 рази збільшує межу витривалості. Втрати металу є незначними навіть при високих величинах контактних напружень. Методом мікротвердості показано, що деформаційного зміцнення, яке характерне для не азатованих зразків, після м'якого азотування немає. Поверхня зміцненого металу зберігає вихідну пластичність, що сприяє підвищенню контактної витривалості при коченні.

Проводились дослідження [15] зносостійкості зразків з легованої сталі Eп40В (хімічний склад в % $\text{C}0,23\cdot\text{Si}0,08\cdot\text{Mn}0,52\cdot\text{Ni}0,8\cdot\text{Cr}3,21\cdot\text{Mo}0,5\cdot\text{Al}0,03\cdot\text{V}0,02\cdot\text{S}0,014\cdot\text{P}0,006$), що були зміцнені методом іонного азотування за різними режимами (при температурах від 420 до 500 ° С, в середовищі аміаку протягом 2,5-35 годин), при терті кочення з проковзуванням без мастила на машині "Амстер" при навантаженні 200 кг. Встановлено значне зростання зносостійкості азатованих зразків і великий вплив на цей показник режимів азотування. Показано, що найвищу зносостійкість мали зразки з максимальною глибиною азотування. Авторами розроблено модель для опису впливу коефіцієнта тертя на виникнення зсувної деформації при контакті в процесі зношування. Було виявлено складний вплив залишкових напружень стиску на максимум розподілу дотичного напруження, що виникає в процесі кочення з проковзуванням.

Значне підвищення контактної витривалості підшипників кочення досягнуто авторами [6] при азотуванні сталі *ШХ15* в середовищі аміаку з добавками природного газу при температурі 570-720 ° С і подальшим гартуванням. Показано значний вплив на витривалість сталі при циклічному контактному навантаженні режимів термічної обробки.

Висновки по розділу 1

Аналіз наявних досліджень показав, що зміцнення поверхні різними методами, а також конструювання контактуючих поверхонь дозволяють підвищити зносостійкість і контактну витривалість підшипників кочення. Залежно від умов експлуатації і методів зміцнення позитивний ефект був різний, а в ряді випадків – мінімальний або його зовсім не було. Найбільший ефект в підвищенні зносостійкості і контактної витривалості металів при терті кочення досягається при нанесенні покриттів та зміцнення поверхні методом хіміко-термічної обробки.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗРАЗКІВ НА ТЕРТЯ КОЧЕННЯ І КОВЗАННЯ

Для проведення порівняльних випробувань зразків на зношування при терті кочення і ковзання було розроблено експериментальну установку на базі свердлувального верстата, загальний вид якої показано на рис. 2.1.

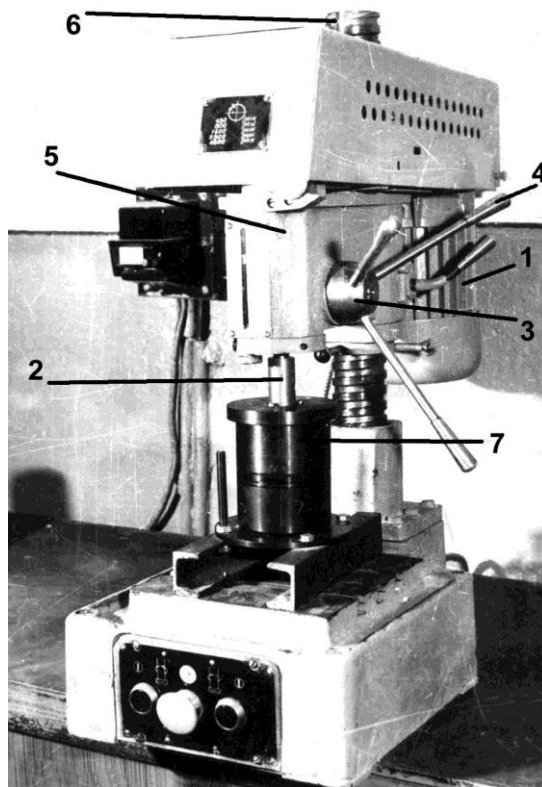


Рис. 2.1. Фото установки для дослідження: 1 – електричний двигун; 2 – шпиндель верстата; 3 – вал-шестерня; 4 – державка; 5 – бабка; 6 – колона; 7 – трибовузол.

Установка складається з трибовузла, який приводиться в рух свердлильним верстатом. Верстат включає: електродвигун 1 змінного струму АОА-211-4СО потужністю 0,6 кВт з частотою обертання валу 1350 хв^{-1} ; клиноремінну 4-х ступеневу передачу; шпиндельний вузол 2, що переміщується в шпиндельній бабці 5 за допомогою рейкової передачі при обертанні вала-шестерні з маточиною 3 за рахунок дії зовнішньої сили на держак 4.

Шпиндель з'єднується з трибовузлом за допомогою конусної системи Морзе. Нормальне навантаження на пару тертя здійснюється вантажем, що підвішується до держака 4, довжину якого можна збільшувати при необхідності.

Трибовузол, конструкцію якого показано на рис. 3.2, є універсальним.

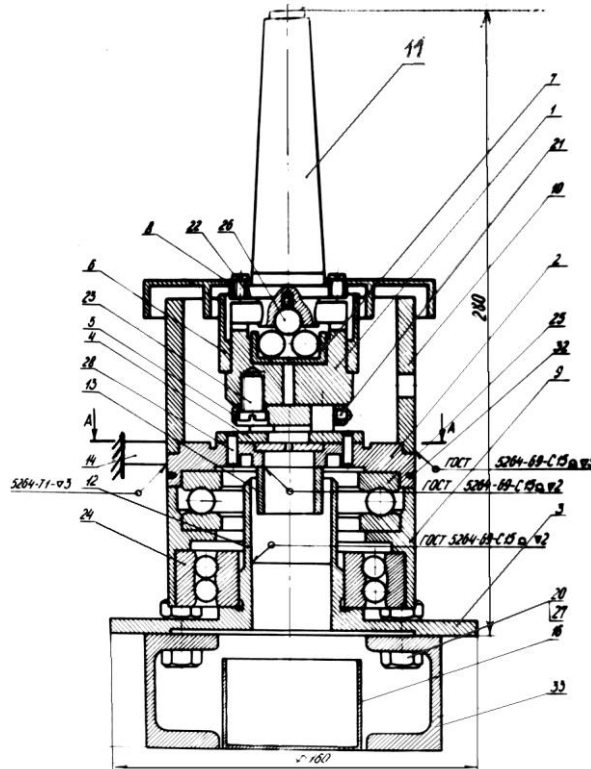


Рис. 2.2. Конструкція трибовузла.

На рис. 2.3 наведено схему установки для проведення досліджень на тертя кочення. На установці моделювалась робота упорного підшипника кочення. Зразок, що досліджувався 4, конструкцію якого показано на рис. 3-б, закріплювався гвинтом 5 в обойму 3, де і контактував з кульками 9, що утримувались сепаратором стандартного підшипника № 8204. Кульки перекочувались по напрямляючому жолобу кільця 8 упорного підшипника № 8204, яке встановлене на нерухому плиту 6. Зразок 4 разом з обоймою 3 приводиться в обертний рух від шпинделя свердлувального верстата.

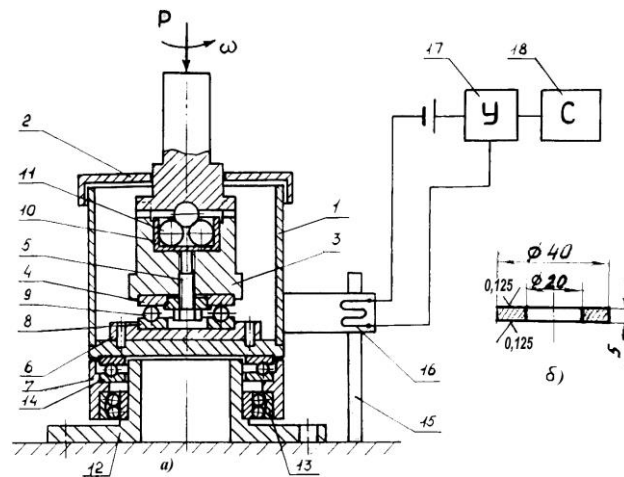


Рис. 2.3. Схема установки для випробування на тертя кочення: 1 – верхній корпус; 2 – кришка корпуса; 3 – обойма; 4 – зразок, що досліджується; 5 – гвинт; 6 – нерухома плита; 7 – нижній корпус; 8 – нерухоме кільце упорного підшипника; 9 – кулька підшипника; 10 – стакан; 11 – кульки опори; 12 – основа; 13 – сферичний підшипник; 14 – упорний підшипник; 15 – опора; 16 – пластина з тензодатчиком; 17 – підсилювач; 18 самописець КСП-2.

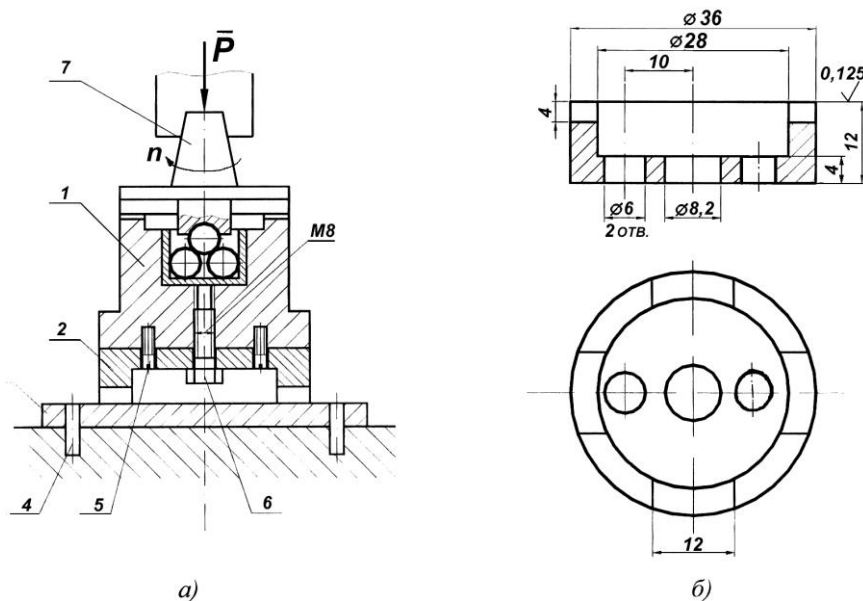


Рис. 2.4. Схема кріплення та конструкція зразка при випробуванні (тертя ковзання). 1 – корпус; 2 – зразок; 3 – контртіло; 4 – штифтове з'єднання; 5 – шпилька; 6 – гвинт; 7 – хвостовик.

На рис. 2.4 наведено схему кріплення зразків в вузлі тертя при випробуваннях на тертя ковзання. Навантаження та вимірювання моменту сил

тертя здійснювалось за аналогічною схемою, як і при випробуваннях на тертя кочення.

Встановлення оправки на площині може вносити значну похибку вимірювання через не площинність і шорсткість установлювальної поверхні. Для зменшення цієї похибки в пристрої передбачено фіксацію оправки по її осі за допомогою фіксатора 14 і кутову фіксацію за допомогою фіксатора 7. Крім того, опорна площина оправки зроблена перервною (вибрано середню частину базової поверхні). Базові поверхні оправки і основи 11 прошліфовано. Зусилля прижиму оправки до базової поверхні основи є постійним і створюється пружиною 15. Вимірювач і фіксатори встановлені на жорсткому цільному корпусі 4, який гвинтами кріпиться до основи 11. При зніманні оправки з зразками з вимірювального пристрою відвід фіксатора 7 здійснюється рукояткою 1, осьове переміщення якої обмежене упором 2.

Кожне значення зносу на певний момент часу визначалося як середнє арифметичне від вимірювань зносу в 12 різних місцях, рівномірно розміщених по доріжці кочення. Всі досліди повторювались тричі. Вимірювання зносу проводилися через кожних 10 хвилин випробувань при виході на сталий режим зношування і через 1, 2, 5 і 10 хвилин в початковий період випробувань (період припрацювання).

Фактологічні дослідження процесу зношування і руйнування доріжки кочення проводилися з використанням растрового мікроскопа РЕМ 101-М.

Всі випробування на тертя кочення і ковзання проводилися в середовищі масла І-20. Випробування на тертя кочення проводилися при частоті обертання зразка 750 хв^{-1} . Діаметр кульок складав 7.14 мм. Кількість кульок в сепараторі – 12. Кульки виготовлено зі сталі ШХ15 і мали твердість HRC 61÷62. Колова швидкість центрів кульок складала 1,24 м/с. Вертикальне навантаження на зразок приймалося: 500; 1000; 1600; 1800; 2500 і 3600 Н, що відповідно давало навантаження на одну кульку: 41,7; 83,3; 133,3; 150; 208,3 і 300 Н та максимальний тиск в центрі ділянки контакту відповідно: 2075; 2615; 3057;

3180; 3532; 4008 МПа. Зразки з м'якою основою (HRC < 45), що не гартувалися, було випробувано при навантаженнях на кульку до 250 Н, зразки з загартованою основою – при навантаженнях на кульку 300 Н.

Дослідження проводилися до появи пітингу на доріжці кочення. В процесі випробовувань вимірювались величини зносу та мікротвердість доріжки кочення, проводились металографічні, рентгеноструктурні та фрактографічні дослідження зношеної поверхні.

Випробування на тертя ковзання проводилися при швидкості ковзання 1,24 м/с, коефіцієнті перекриття 0,5 і при різних тисках на поверхні тертя. Для вивчення впливу навантаження та несучої здатності поверхні тертя з різними властивостями і покриттями при різних тисках на поверхні тертя його величина змінювалася в широкому діапазоні від 2 до 30 МПа. При цьому після припрацьовування поверхні тертя при тиску 2 МПа навантаження поступово збільшувалось через кожні 10^3 м пробігу до моменту схвачування поверхонь тертя. В усіх дослідах контртіло (плоский диск) мало однакові властивості, воно було виготовлено зі сталі 45, загартовано по всьому об'єму до твердості HRC = 45. Вимірювання зносу проводилося за допомогою пристрою з індикатором часового типу (рис. 2.5) з точністю до 0,5 мкм.

Для зміцнення поверхні деталей машин застосовуються зміцнюючі покриття, що одержуються методами осадження і дифузійні покриття, що одержуються методами хіміко-термічної обробки.

У наших дослідженнях випробовувалися такі покриття:

- з нітриду титану, що одержувалися методом фізичного осадження в вакуумі;
- з хрому, що одержувалися гальванічним осадженням;
- дифузійні покриття, що отримувались в плазмі тліючого розряду методом іонного азотування та оксіазотування.

Для вивчення впливу властивостей основи (твердості і структури), на яку наносилось покриття, і градієнта зміни властивостей матеріалу від поверхні в глибину зразків на їх зносостійкість при випробуванні на контактну

витривалість проводилася термічна обробка (гартування та відпуск) матеріалу зразків до і після хіміко-термічної обробки та до нанесення покриттів методами осадження.

Для нанесення нітриду титану на поверхню дослідних зразків методом осадження у вакуумі застосовувалась серійна установка ННВ-6,6-ІІ (рис. 2.5). Покриття наносилось за такою технологією. Спочатку проводилася іонна очистка в середовищі аргону при напрузі на зразку 1200 В, силі струму дуги 75 АП, силі струму на стабілізуючій котушці 0,8 А, силі струму на фокусуючій котушці 0,2 А і вакуумі в камері $6,65 \cdot 10^{-3}$ Па. Іонна очистка проводилася до тих пір, поки температура на зразку не досягла 500 °С. Після цього проводився режим напилення в середовищі особливо чистого азоту (99,99% N_2) при опорній напрузі 250 В, силі струму дуги 90 А і вакуумі в камері $5,5 \cdot 10^{-1}$ Па. Час напилення складав 15 хвилин. У результаті одержано на зразках нітридний шар товщиною 5 мкм.

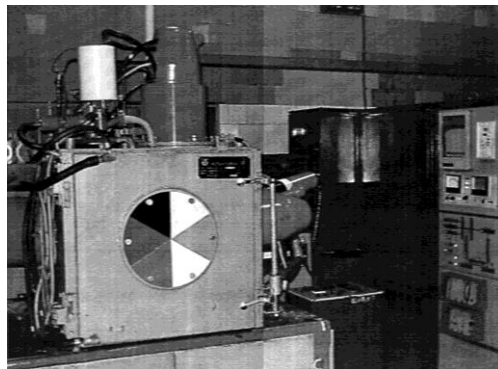


Рис. 2.5. Установка ННВ–6,6–ІІ

Покриття зі хрому наносилося на зразки гальванічним методом в середовищі розбавленого сульфатного електроліту (150 г/л хромового ангідриду і 1,5 г/л сірчаної кислоти) при температурі 56 °С, катодній щільності струму 35 А/дм². Після хромування проводилася термообробка в печі при температурі 200 °С протягом 2 годин. Для забезпечення кращої адгезії хромового покриття з основою зразки перед хромуванням обезжирювалися, промивалися в воді, підігрівалися в електроліті до температури 56 °С після чого проводилося анодне активування поверхні.

Іонне азотування і оксіязотування проводилися на експериментальній установці “УАТР-1” для хіміко-термічної обробки конструктивних елементів, загальний вид якої показано на рис. 2.6. Цю установку розроблено і виготовлено в Поліському національному університеті. Принципову схему установки показано на рис. 2.7.

Установка включає в себе: розрядну камеру, систему вакуумування, газозабезпечення, енергозабезпечення та контрольно-вимірвальних приладів.

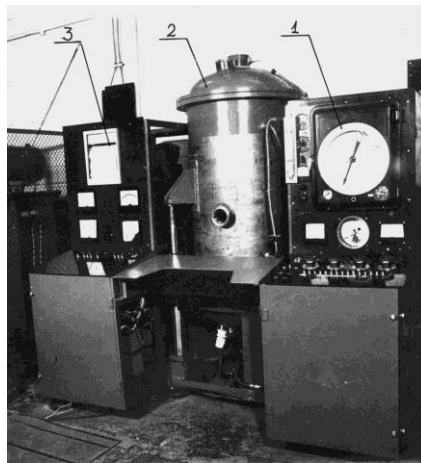


Рис. 2.7. Установка для хіміко-термічної обробки залізовуглецевих сплавів : 1 – блок вакуумування; 2 – камера з вакуумом; 3 – електрозабезпечення.

Застосування тліючого розряду дозволяє на порядок прискорити процес дифузійного насичення поверхні азотом і нітридами заліза та легуючих елементів

При проведенні оксіязотування в тліючому розряді після нанесення азотованого шару в насичуюче середовище подавався кисень і продовжувався процес дифузійного насичення поверхні протягом 15-30 хвилин при тій же температурі та тиску, що й процес азотування. У результаті на поверхні азотованого шару утворювались тонкі шари оксидних сполук меншої твердості й більшої пластичності порівняно з нітридним шаром.

Висновки по розділу 2

В другому розділі магістерської роботи розроблено обладнання для нанесення зносостійких покриттів та методику випробовування на інтенсивність зношування.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЗРАЗКІВ З РІЗНИМИ ПОКРИТТЯМИ

У табл. 3.1 наведено результати випробувань зразків із сталі *ШХ15* на тертя ковзання і кочення в маслі I-20 після їх іонного азотування і нітрогартування за різними режимами згідно з планом Хартлі. На основі статистичної обробки результатів випробувань одержано математичні залежності трибологічних характеристик (інтенсивності зношування і коефіцієнта тертя) при терті кочення і ковзання цієї сталі, зміцненої за вказаними технологіями, від технологічних параметрів процесу іонного азотування.

Рівняння з визначення зносостійкості покриття:

$$\begin{aligned} \varphi(x) = & \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \beta_{44} x_4^2 + \\ & + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{14} x_1 x_4 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{24} x_2 x_4 + \beta_{34} x_3 x_4. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Коефіцієнти регресії наведено в табл. 3.2.

На рис. 3.1 наведено графік залежності інтенсивності зношування сталі *ШХ15* після азотування і нітрогартування від технологічних параметрів процесу іонного азотування. Із графіків видно (рис. 3.1), що технологічні параметри мають значний вплив на інтенсивність зношування. Залежно від їх співвідношення величина інтенсивності зношування може відрізнятись на порядок. При іонному азотуванні сталі (рис. 3.1) інтенсивність зношування зменшується з підвищенням температури та часу азотування.

Таблиця 3.1 – Трибологічні характеристики сталі ШХ15 при терті кочення і ковзання в маслі І-20 після її іонного азотування і нітрогартування за різними режимами згідно з планом Хартлі.

№ ре- жиму азоту- вання	Азотування після гартування			Нітрогарту- вання, витримка 7 хв.
	Тертя ковзання		Тертя кочення	
	Інтенсивність зносу, $I \cdot 10^{-9}$	Коефіцієнт тертя f	Інтенсивність зносу, $I \cdot 10^{-11}$	Інтенсивність зносу, $I \cdot 10^{-11}$
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

Із графіків рис. 3.1 видно, що мінімальні значення інтенсивності зношування досягаються при температурі $T = 600$ °С; тиску в вакуумній камері $P = 80 - 240$ Па; вмісту аргону в азотно-аргонному середовищі $Ar = 38 - 57$ об.%; часу дифузійного насичення $\tau = 240$ хв.

Вплив тиску і концентрації аргону в насичуючому середовищі має екстремальний характер, що свідчить про наявність оптимуму їх значень, який забезпечує мінімальну інтенсивність зносу. Це пояснюється тим, що ці параметри, крім впливу на товщину дифузійного шару, суттєво впливають на формування фазового складу поверхні азотованого шару і його пластичність, яка збільшується зі збільшенням концентрації аргону в насичуючому середовищі і зменшенням тиску в вакуумній камері. Максимальна

зносостійкість досягається при оптимальному співвідношенні твердості і пластичності в азотованому шарі.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти рівнянь регресії (3.1), 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, витримка 7 хв.
	Тертя ковзання		Тертя кочення	
	Інтенсивність зносу, $I \cdot 10^{-9}$	Коефіцієнт тертя f	Інтенсивність зносу, $I \cdot 10^{-11}$	Інтенсивність зносу, $I \cdot 10^{-11}$
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

На рис. 3.1 наведено графіки залежності інтенсивності зносу нітрогартованих зразків із сталі ШХ15 при випробуваннях на тертя кочення в маслі І-20 при навантаженнях на кульку 300 Н. Із графіків видно, що інтенсивність зношування зменшується із збільшенням часу іонного азотування і досягає мінімального значення при $\tau = 240$ хв. в умовах експерименту (рис. 3.1 б, г). Залежності інтенсивності зношування від температури T , тиску в вакуумній камері P і вмісту аргону в азотно-аргонному середовищі мають екстремальний характер з мінімумами при $T = 560\text{--}570^\circ\text{C}$; $P = 200$ Па; $Ar = 57$ об.% .

На основі системного аналізу залежностей, наведених на рис. 4.16 і 4.17, можна зробити висновок, що при іонному азотуванні сталі ШХ15 є ділянка

оптимальних значень технологічних параметрів, що забезпечує найменшу інтенсивність зношування, а саме: температура $T = 560\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$; тиск в вакуумній камері $P = 80\text{--}240\text{ Па}$; вміст аргону в азотно-аргонному середовищі $Ar = 38\text{--}57\text{ об.}\%$, часу дифузійного насичення $\tau = 240\text{ хв}$.

Цим технологічним параметрам відповідають такі фізико-механічні характеристики і фазовий склад сталі ШХ15: товщина азотованого шару 250–300 мкм, мікротвердість поверхні 7600 МПа та фазовий склад поверхневого шару: (0–40%) ε -фаза, (50–60%) γ' -фаза і (10–40%) α_N -фаза.

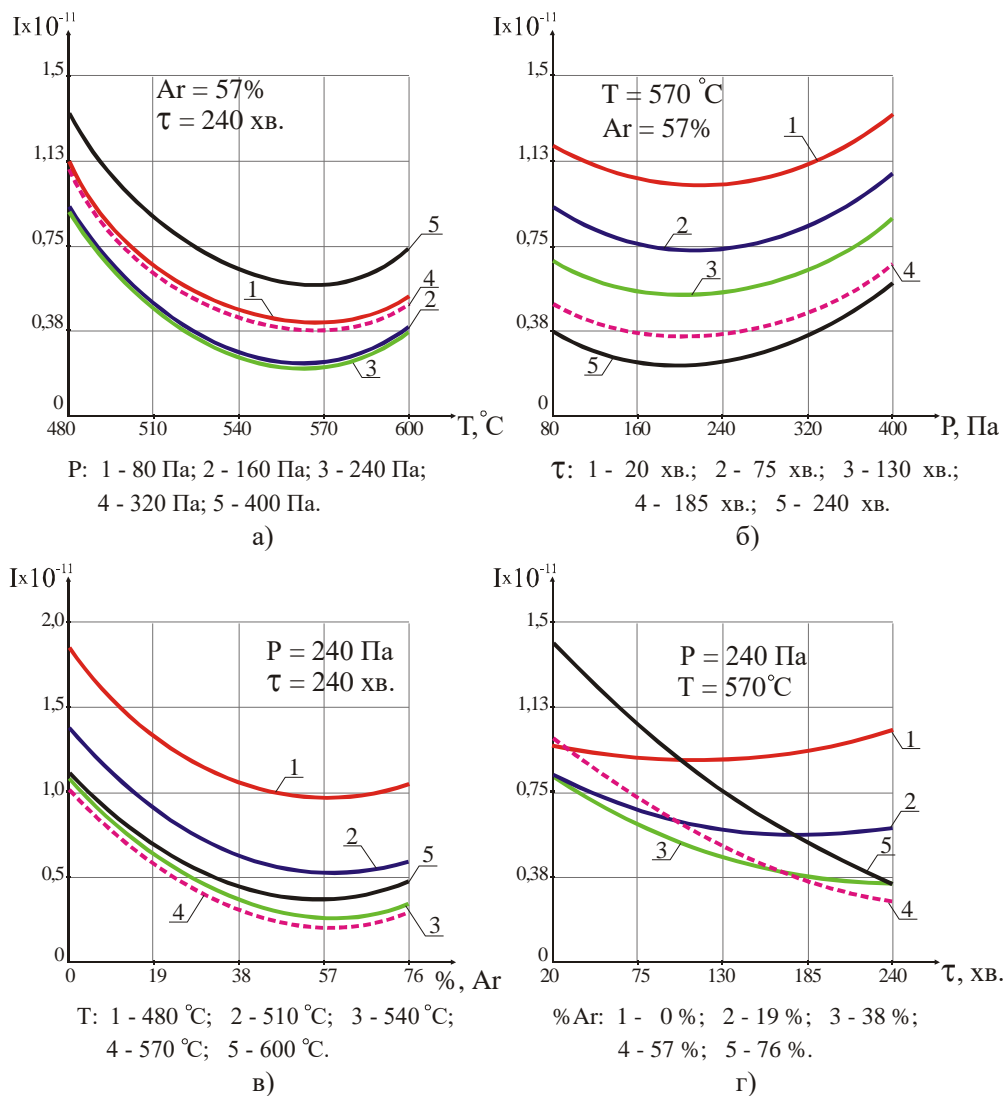


Рис. 3.1. Залежність інтенсивності зношування нітрогартованих зразків із сталі ШХ15 в маслі I-20 від технологічних параметрів іонного азотування в безводневому азотно-аргонному середовищі при терті кочення.

Для подальших порівняльних досліджень зносостійкості покриттів, одержаних за різними технологіями на різних сталях і з різною твердістю основи, вибрано режими іонного азотування з оптимальної ділянки технологічних параметрів, що забезпечували оптимальні властивості покриття за критерієм зносостійкості.

На рис. 3.2 наведено графіки залежності трибологічних характеристик сталі *ШХ15* після іонного азотування і нітрогартування при терті ковзання і кочення залежно від зміни одного з технологічних параметрів режиму при постійних значеннях інших параметрів. Так як цей режим азотування належить до ділянки оптимальних режимів, що її визначено при аналізі графіків рис. 3.1, то на основі залежностей, наведених на рис. 3.2, більш наочно видно вагомість кожного з технологічних факторів іонного азотування в процесі зношування і їх вплив на трибологічні характеристики сталі *ШХ15* при терті кочення і ковзання.

Наприклад, при терті ковзання азатованої сталі на процеси зношування та інтенсивність зносу найбільший вплив мають технологічні параметри: тиск в вакуумній камері й відсоток аргону в насичуючому середовищі, які суттєво впливають на фазовий склад поверхневого азатованого шару. Температура і час дифузійного насичення мають значно менший вплив на інтенсивність зношування. Це обумовлюється тим, що при терті ковзання процес зношування локалізується в тонкому поверхневому шарі, де фазовий склад його відіграє величезну роль в утворенні вторинних структур. Температура і час дифузійного насичення менше впливають на фазовий склад поверхні при іонному азотуванні.

На рис. 3.3, 3.4 і 3.5 наведено графіки залежності зносу і мікротвердості на доріжках кочення від кількості циклів навантаження зразків із сталей *20Х13*, *45* і *ШХ15* без покриттів і з дифузійними покриттями (іонне азотування за режимами 1а і 2а та іонне оксіязотування) при випробуваннях на тертя кочення.

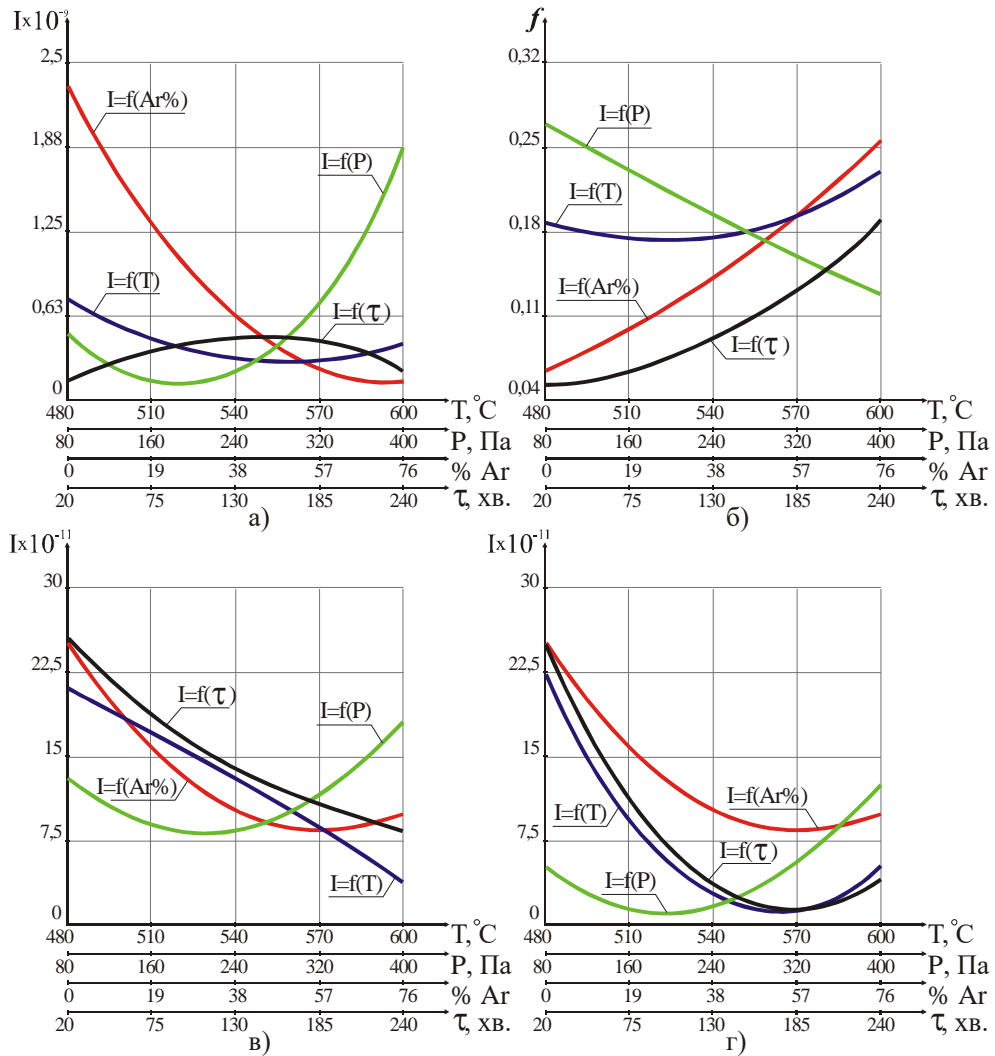


Рис. 3.2. Залежність інтенсивності зношування I та коефіцієнта тертя f сталі ШХ15 в маслі І-20 після азотування (а, б, в) і нітрогартування (г) від технологічних параметрів іонного азотування при постійних значеннях інших параметрів ($T = 570^\circ C$, $P = 240$ Па, $Ar = 57$ об.%, $\tau = 240$ хв.). а, б – тертя ковзання; в, г – тертя кочення з проковзуванням.

Експерименти показали, що при навантаженнях на кульку 150 Н вже після 1 хвилини випробувань (9 тисяч циклів навантаження) в зразках із сталі 20Х13, 45 і ШХ15 без термічної обробки і без покриттів у результаті пластичної деформації на доріжці кочення утворювалася канавка глибиною 17...18 мкм.

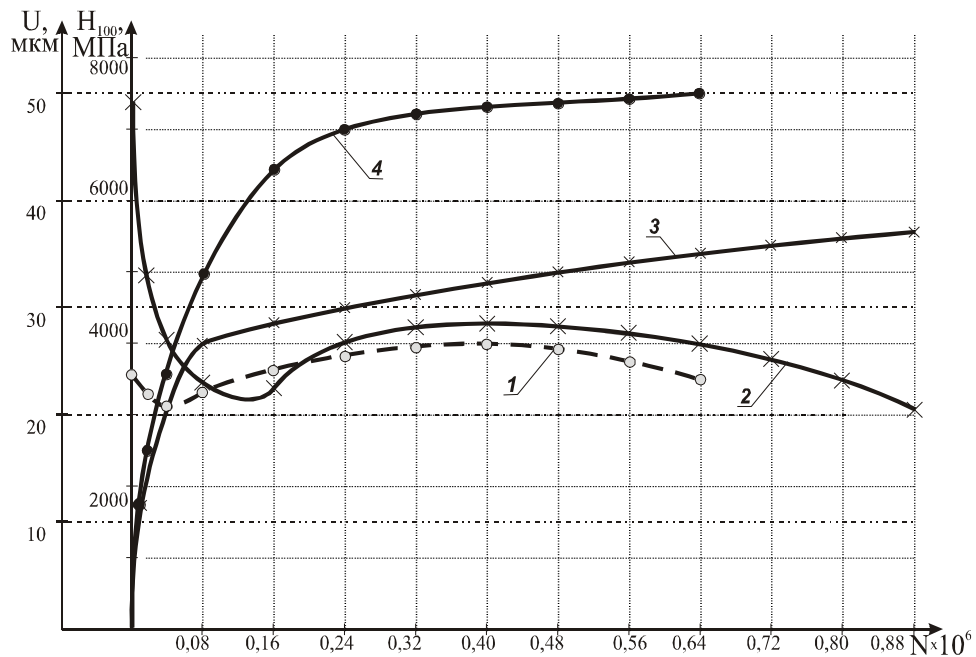


Рис. 3.3. Зміна мікротвердості H_{100} (1, 2) і зносу U (3, 4) сталі 20X13 від кількості циклів навантаження: 1 і 4 –сталь без термообробки; 2 і 3 – сталь азатована за режимом 1а. Навантаження на кульку $P_0 = 150$ Н.

На краях канавки виникали буртики у вигляді виступів над площиною кільця висотою до 30 мкм. Аналогічні буртики утворювалися і на зразках без термічної обробки з подальшим іонним азотуванням, але їх висота була значно меншою і не перевищувала 10 мкм На зразках з високою твердістю основи (гартованих) таких буртиків не утворювалось. Після 10 хв. випробувань (90 тисяч циклів навантаження) величина пластичною деформації складала 60% від сумарного значення деформації і зношування за весь період випробувань від початку і до появи викришування на доріжці кочення. У зразках з цих же сталей, азатованих за режимами 1а та 2а, величина пластичної деформації поступово зменшувалась і в аналогічних умовах була в 1,5...1,7 разів меншою (табл. 3.4 і 3.5). Розрахунки показали, що доля зношівання від проковзування в цей період незначна і не перевищує 5-8% від величини пластичної деформації.

Із збільшенням кількості циклів навантаження пластична деформація поступово зменшується. В подальшому знос стабілізується, його величина мінімізується за абсолютною величиною. У цей період в основному відбувається зношування за рахунок тертя ковзання при проковзуванні кульок,

а пластична деформація відбувається на мікрорівні до тих пір, поки не вичерпається така можливість. Після вичерпання можливості мікропластичної деформації розпочинається викришування і різке збільшення інтенсивності зношування.

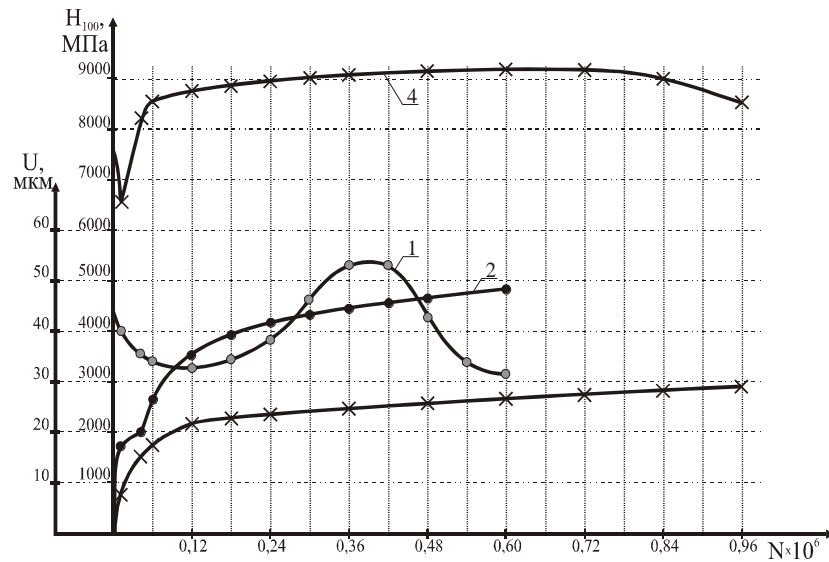


Рис. 3.4. Зміна мікротвердості H_{100} (1, 4) і зносу U (2, 3) зразків із сталі 45 в залежності від кількості циклів навантаження: 1, 2 – сталь 45 без термообробки; 3, 4 – сталь 45 без термообробки азатована за режимом 1а. Навантаження на кульку $P_0 = 150\text{Н}$.

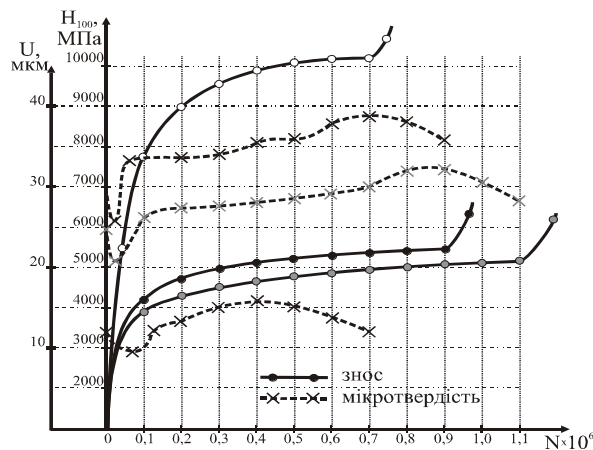


Рис. 3.5. Кінетика зношування сталі 3X15 при терті кочення з різними покриттями при навантаженні на кульку $P_0 = 150\text{ Н}$. 1 – сталь без термообробки; 2 – сталь без термообробки (режим 2а) 3 – сталь без термообробки оксіязована (азотування режим 1а + іонне оксидування 30 хв. при $T = 570^\circ\text{C}$, $P = 240\text{ Па}$ в середовищі суміші повітря з киснем).

Дослідження мікротвердості на доріжці кочення показали, що в процесі випробувань з нею відбуваються значні зміни. Мікротвердість доріжки кочення спочатку різко зменшується, а потім поступово збільшується до максимального значення, після чого знову зменшується, аж до початку викришування. Причому, як видно із рис. 3.3, 3.4, 3.5, аналогічну картину можна спостерігати на зразках з різних сталей як з покриттями, так і без покриттів.

Проте, порівнюючи кількісні зміни мікротвердості на доріжці кочення, що відбуваються в процесі випробувань азотованих зразків маловуглецевої сталі *20X13*, середньовуглецевої сталі *45* і високовуглецевої сталі *ШХ15*, ми бачимо, що вони різні. Мікротвердість на доріжці кочення азатованої сталі *20X13* в перші хвилини випробувань різко зменшується (майже в 2–3 рази) і через 10 хвилин випробувань ($0,9 \cdot 10^5$ циклів навантаження) знижується до величини твердості основи. Після цього відбувається поступове її збільшення на 10...15%, стабілізація при максимальному значенні та поступове зменшення твердості до моменту викришування доріжки кочення.

Таблиця 3.3 – Кінетика зношування сталі 20Х13 при терті кочення при різних навантаженнях 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		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				

Таблиця 3.4 – Кінетика зношування сталі ШХ15 при випробуваннях на тертя кочення при навантаженні на кульку 150 Н і різних покриттях.

№ 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			

Таке різке зменшення мікротвердості на доріжці кочення цієї сталі в початковий період випробувань пояснюється тим, що ця сталь має високу пластичність і під дією циклічного навантаження нітридна зона азатованого шару швидко руйнується, видавлюється із зони контакту, а залишається лише зона внутрішнього азотування, яка має невелику твердість. Тому при подальшому циклічному навантаженні наклеп і зміни мікротвердості відбуваються в зоні внутрішнього азотування (α_N -фазі) із значеннями, близькими до значень основи (рис. 3.6).

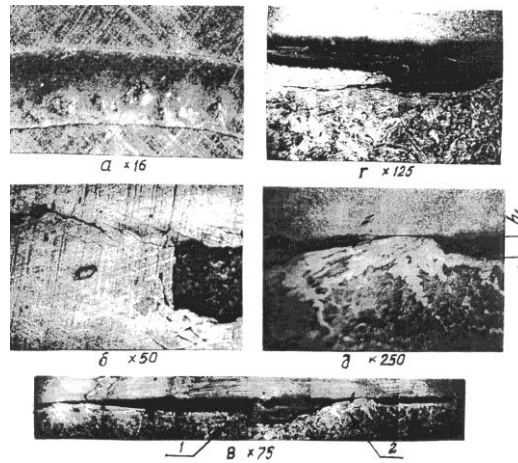


Рис. 3.6. Поверхня а, б та перпендикулярний перетин доріжки кочення після випробувань: а, б – сталь 45 без термообробки після 2 годин випробувань; б, в – сталь 45 азатована за режимом 1а після 6 годин випробувань; г, д – ділянки 1 і 2 відповідно.

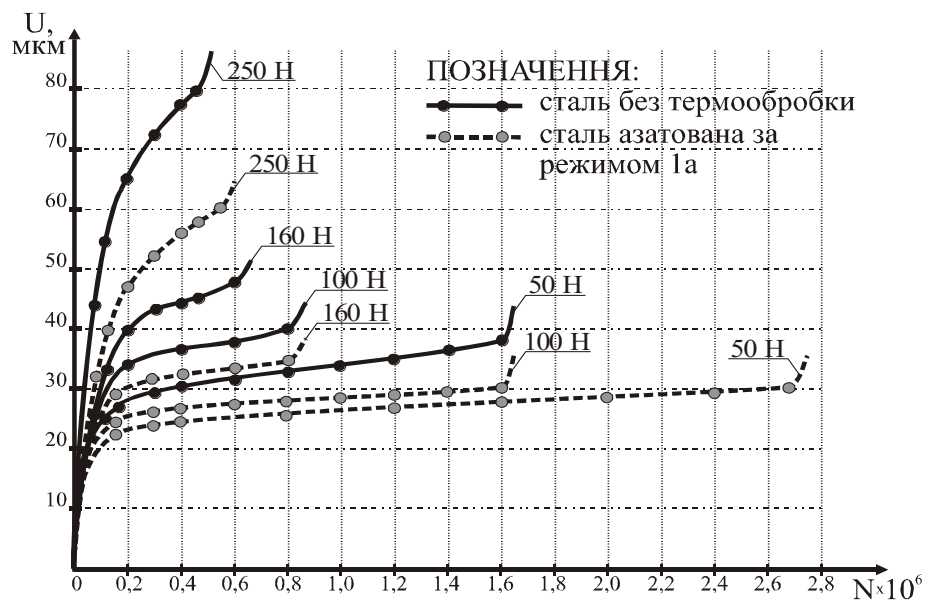


Рис. 3.7. Залежність зносу сталі 20X13 при терті кочення з проковзуванням від кількості циклів випробувань при різних навантаженнях.

У сталях 45 і ШХ15, що мають пластичність значно меншу від сталі 20X13, не відбувається повного руйнування і викришування нітридної зони з поверхні контакту під дією циклічних навантажень. У початковий період (до $0,01 \cdot 10^6$ циклів), навпаки, відбувається перебудова структури поверхні азатованого шару, що приводить до значно меншого (до 30%) порівняно зі сталлю 20X13 пониження мікротвердості на доріжці кочення. При подальшому

циклічному навантаженні відбувається ущільнення структури поверхневого шару і підвищення його мікротвердості до максимального значення, що на 10–15% перевищує мікротвердість поверхні до початку випробувань. Така мікротвердість зберігається до початку руйнування (розвитку мікротріщин) і знижується в період викришування поверхні доріжки кочення.

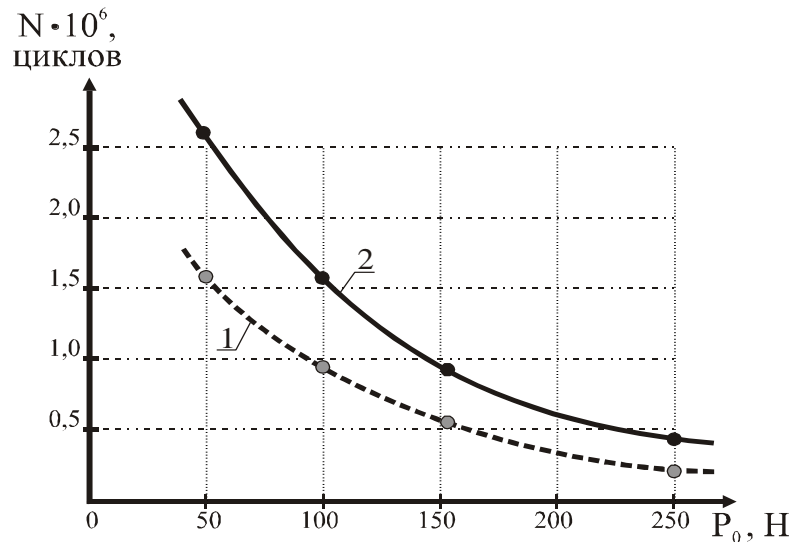


Рис. 3.8. Залежність довговічності сталі 20X13 при терті кочення з проковзуванням від навантаження на кульку до появи пітингу. 1 – сталь без термообробки; 2 – сталь азатована за режимом 1а.

На рис. 3.8 наведено графіки зміни зношування мікротвердості на доріжці кочення сталі *ШХ15*, що зміцнена методом оксіязотування. З графіків видно, що характер змін зношування і мікротвердості на доріжці кочення подібні до характеру змін цих показників азотованої сталі. Різниця лише в тому, що зношування оксіязотованої сталі на 20% менший, а довговічність на 20% більша порівняно з азотованою сталлю. Це пояснюється тим, що наявність на поверхні тонкого оксидного шару меншої твердості від твердості основи (азотованого шару) призвело до зменшення еквівалентних контактних напружень (див. розділ 2), які відіграють значну роль при втомному руйнуванні поверхні при циклічному контактному навантаженні. Крім того, наявність оксидного шару сприяла більш швидкому утворенню вторинних структур у процесі тертя ковзання, що викликало зменшення зносу при проковзуванні кульок.

На кінетику зношування і величину зносу при терті кочення з проковзуванням значний вплив має величина навантаження на кульку. На рис. 3.7 і 3.8 наведено залежності зносу азатованої і неазатованої сталі 20X13 від кількості циклів навантаження при різних значеннях навантаження на кульку, а також залежність довговічності зразків з цієї сталі від величини навантаження на кульку. З рисунків видно, що зі збільшенням навантаження значно збільшується зношування і зменшується довговічність зразків. Залежність довговічності зразків від величини навантаження на кульку має експоненціальний характер (рис. 3.8). Наявність азотованого шару значно підвищує довговічність зразків. З підвищенням навантаження на кульку ефективність від нанесення покриття зменшується. Це обумовлюється збільшенням пластичної деформації в зв'язку з малою твердістю основи.

ВИСНОВКИ

Технологія іонного азотування в безводневих середовищах дозволяє змінювати фізико-механічні характеристики (товщину, твердість і градієнт твердості по товщині), фазовий склад і залишкові напруження стиску азотованих шарів за допомогою зміни параметрів процесу дифузійного насичення.

Використовуючи метод планування експериментів (чотири факторний план Хартлі) одержано аналогічні залежності товщини і мікротвердості поверхні азатованих шарів та їх інтенсивності від технологічних факторів дифузійного насичення при іонному азотуванні сталі *ШХ15*. Визначена область оптимальних значень технологічних факторів, що забезпечують найменшу інтенсивність зношування в даних умовах випробувань, а саме: температура $T = 560-570^{\circ}\text{C}$; тиск в вакуумній камері $P = 160-240$ Па; час дифузійного насичення – 240 хвилин; вміст аргону в азот-агронному середовищі 38 – 57 об.%.

Технологія нітрогартування з попереднім іонним оксіязотуванням забезпечує зниження градієнта твердості по товщині композиції “покриття-основа” за рахунок розпаду ϵ -фази і дифузії азоту в глибину та підвищення твердості. Триботехнічні характеристики і хімічний та фазовий склад покриттів мають визначальне значення інтенсивності їх зношування при терті ковзання..

Порівняльні дослідження зносостійкості зразків з різними покриттями показали, що нацменш інтенсивно зношуються і володіють найвищою довговічністю дослідні зразки. Інтенсивність зношування цих зразків є в 2,2 рази меншою, а довговічність майже в 2 рази перевищує довговічність гартованих зразків із сталі *ШХ15*, виготовлених за традиційною технологією.

Для максимального збільшення довговічності конструкційних елементів при терті кочення з проковзуванням, рекомендується нанесення дифузійного покриття максимально допустимої товщини з мікротвердістю поверхні 7600-7800 МПа без крихких фаз на поверхні та мінімальним градієнтом твердості по товщині композиції “покриття-основа”. твердості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Борисов Ю. С., Добромыслов Н. Н. Корректировка показателей долговечности подшипников качения по фактическим значениям радиального зазора. *Надежность и контроль качества*. 1990. №2. С.39-43.
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. Добромыслов 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. Bantall 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.